



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 7355

**UV-induzierte
Brechzahländerung zur
Herstellung von Wellenleitern
und Integration von
Siliziumphotodioden**

Y. Ichihashi, T. Mappes, J. Mohr
Institut für Mikrostrukturtechnik

Dezember 2007

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7355

UV-induzierte Brechzahländerung zur Herstellung
von Wellenleitern und Integration von
Siliziumphotodioden

Y. Ichihashi^{*)}, T. Mappes, J. Mohr

Institut für Mikrostrukturtechnik

^{*)} von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH)
genehmigte Dissertation

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2007

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-073557

UV-induzierte Brechzahländerung zur Herstellung von Wellenleitern und Integration von Siliziumphotodioden

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte
Dissertation

von MSc.Eng. Yasuhisa Ichihashi
aus Japan

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Oktober 2007

Hauptreferent: Prof. Dr. V. Saile
Korreferentin: Prof. Dr. U. Wallrabe

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Prozessvariante zur Herstellung polymerer Wellenleiter durch UV-induzierte Brechzahländerung auf Siliziumsubstraten erarbeitet. Dieses Verfahren wurde bei der Integration von Wellenleitern mit Siliziumphotodioden eingesetzt. Das verwendete Herstellungsverfahren basiert auf der lokalen Veränderung des Brechungsindex von Polymeren durch UV-Bestrahlung im kurzwelligen UV-Bereich. Für die lokale Strukturierung von Wellenleitern wurden konventionelle UV-Lithographietechniken mit Chrommasken eingesetzt.

Um den Einfluss der Materialwahl auf das fotochemische Verhalten zu untersuchen, wurden verschiedene optische Polymere verwendet. Nur modifiziertes Acrylat (alicyclische Methacrylat Copolymer, OPTOREZ®) zeigte eine ausreichende große Brechzahländerung für die Wellenleiterstrukturierung mittels UV-Bestrahlung. Dieses neue Material besitzt einen höheren Brechungsindex, eine höhere Glasübergangstemperatur und eine geringere Wasserabsorption als konventionelles Polymethylmethacrylat (PMMA). Bei der spektroskopischen Analyse wurde die fotochemische Reaktion von modifiziertem Acrylat nachgewiesen, die identisch ist mit der von PMMA. Erste Untersuchungen zur Immobilisierung von lebenden Zellen (L929 Fibroblasten) auf den Oberflächen von modifiziertem Acrylat wurden erfolgreich durchgeführt. Das modifizierte Acrylat eignet sich also sowohl für die Herstellung von Wellenleitern und als auch für die Immobilisierung von Zellen.

Aus den OPTOREZ®-Serien wurde OZ-1100 für die Herstellung von Wellenleitern ausgewählt und charakterisiert. Bestrahlungszeiten und Wellenlänge der Strahlung wurden hinsichtlich der optischen Eigenschaften der Wellenleiter optimiert. Hierbei konnten durch einen Maskaligner EVG 620 mit kürzerer Bestrahlungszeit monomodige Wellenleiter mit weniger Dämpfung erreicht werden (0,8 dB/cm bei 1550 nm und 0,6 dB/cm bei 808 nm).

Weiterhin konnte die Integration der Polymerwellenleiter mit einer Siliziumphotodiode demonstriert werden. Wellenleiter wurden in PMMA auf einem SiO₂-beschichteten Siliziumwafer hergestellt und charakterisiert. Die Wellenleiter waren 10 µm breit und multimodig bei einer Wellenlänge von 635 nm. Für die Dämpfung wurden 0,16-0,25 dB/cm bei 650 nm gemessen. Der Kopplungsverlust von einer Faser zu dem Chip hängt von der Qualität der Kante ab, an der der Wafer abgesägt wurde. Die Kopplungsverluste betragen 1,2-2,7 dB/Seite. Diese Werte sind deutlich besser als früher berichtete Werte (1-1,2 dB/cm und 7 dB/Seite) für SU-8 Wellenleiter auf einem Siliziumwafer.

PMMA Wellenleiter wurden mit einer Siliziumphotodiode auf einem gemeinsamen Substrat integriert. Der Photostrom wurde gemessen und die Kopplungseffizienz wurde bestimmt. Die Unsicherheiten für die Verluste über die gesamte Länge der Wellenleiter lassen nur eine sehr grobe Abschätzung der Kopplungseffizienz zu – sie liegt zwischen 30% und 90%.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Entwicklung ist ein erster Schritt hin zur Realisierung von integrierten biophotonischen Sensoren, bei denen optische Wellenleiterstrukturen mit Detektoren und ggf. mit Lichtquellen integriert werden.

UV-induced refractive index modification for fabrication of waveguides and integration of silicon photodiodes

Abstract

This thesis describes the fabrication process for polymer waveguides by UV-induced refractive index modification on silicon substrate. This process was used for the integration of waveguides with silicon photodiodes. The fabrication process is based on the local modification of the refractive index of polymers by deep UV-exposure. The local structuring of waveguides was performed by conventional photolithographic technique using a quartz/chromium mask.

In order to investigate the influence of the material selection on the photochemical process, different optical polymers were used. Only modified acrylate (alicyclic methacrylate copolymer, OPTOREZ[®]) showed enough refractive index change for the waveguide fabrication by UV-exposure. This new material owns a higher refractive index, higher glass transition temperature and lower water absorption than conventional polymethyl methacrylate (PMMA). The photochemical reaction of modified acrylate was shown to be the same as that of PMMA by spectroscopic analysis. The first investigations for the immobilization of living cells (L929 fibroblast) on the surface of modified acrylate have been successfully carried out. This modified acrylate is suitable for the fabrication of waveguides and the immobilization of living cells.

OZ-1100 was selected from OPTOREZ[®] series for the waveguide fabrication and characterized. The exposure time and exposure wavelength were optimised with respect to the optical properties of the waveguides. By using a maskaligner EVG 620 with shorter exposure time, single-mode waveguides with smaller propagation loss (0.8 dB/cm at 1550 nm and 0.6 dB/cm at 808 nm) were achieved.

Furthermore the integration of waveguides with silicon photodiodes was demonstrated. PMMA waveguides was fabricated on the SiO₂ coated silicon wafer and characterized. 10 μm wide waveguides were multimode at 635 nm. The propagation loss was 0.16-0.25 dB/cm at 650 nm. The fiber to chip coupling loss was 1.2-2.7 dB/facet, depending on the quality of the diced edged. This value is much better than the already reported value (1-1.2 dB/cm and 7 dB/facet) for SU-8 waveguide on silicon wafer.

PMMA waveguide was integrated with silicon photodiode on a substrate. The photocurrent was measured and coupling efficiency was determined. Due to the uncertainty of the total losses in the waveguide, the rough estimation of the coupling efficiency was between 30% and 90%.

The approach presented here is a first step to the integrated biophotonic sensor which contains optical waveguides, detector and light sources.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
2	Grundlagen zu polymeren Wellenleitern	4
2.1	Polymermaterial für polymere Wellenleiter	9
2.2	Herstellungsmethoden für polymere Wellenleiter	10
2.2.1	Ablative-/Ätzverfahren	11
2.2.2	Replikationsverfahren	12
2.2.3	Fotochemische Strukturierung	14
2.3	Polymere Wellenleiter durch UV-Bestrahlung	16
2.3.1	Wellenleiterherstellung aus PMMA durch UV-induzierte Brechzahländerung	16
2.3.2	Materialmodifikation zur Verbesserung der UV-induzierten Brechzahländerung	20
2.4	Optische Verlustmechanismen in polymeren Wellenleitern.....	21
2.4.1	Absorption.....	22
2.4.2	Streuung	24
3	Verfahren zur Herstellung und Charakterisierung der Wellenleiter	25
3.1	Bestrahlung mit kurzwelligem UV-Licht zur Wellenleiterherstellung.....	25
3.1.1	Quecksilber-Xenon Hochdrucklampe	25
3.1.2	Maskaligner	27
3.2	Methoden zur Bestimmungen des chemischen und thermomechanischen Verhaltens.....	29
3.2.1	Optische Spektroskopie.....	29
3.2.2	Weitere Methoden	30
3.3	Optische Messtechnik.....	30
3.3.1	Modenlinienspektroskopie	31
3.3.2	Nahfeldmessplatz	33
3.3.3	Dämpfungsmessplatz	34
4	Materialuntersuchungen.....	36
4.1	Materialeigenschaften.....	36
4.2	Brechungsindexmodifizierung durch Bestrahlung mit kurzwelligem UV-Licht	38
4.3	Ergebnisse der spektroskopische Analyse	39
4.4	DSC (Differential Scanning Calorimetry)	46
4.5	Zelladhäsion	47
4.6	Zusammenfassung der Ergebnisse der Materialbestimmungen	48
5	Optische Charakterisierung der polymeren Wellenleiter aus alizyklischem Methacrylat Copolymer	50
5.1	Einfluss des UV-Lampenspektrums.....	50
5.2	Optische Charakterisierung bei 1550 nm	54
5.2.1	Nahfeldmessung	54
5.2.2	Dämpfungsmessung	55
5.3	Optische Charakterisierung bei 808 nm	57
5.4	Y-Verzweiger	58
6	Integration von polymerem Wellenleiter und Siliziumphotodiode	60
6.1	Konzept der Integration	60
6.1.1	Simulation	62

6.2	Herstellungsprozess der polymeren Wellenleiter auf SiO ₂ -beschichtetem Siliziumwafer.....	63
6.2.1	Belackungsprozess der Polymerschichten	63
6.2.2	Sägeprozess.....	70
6.3	Optische Charakterisierung der polymeren Wellenleiter auf SiO ₂ -beschichtetem Siliziumwafer.....	71
6.3.1	Polymere Wellenleiter auf SiO ₂ -beschichtetem Siliziumwafer	72
6.3.2	Polymere Wellenleiter auf Siliziumphotodioden.....	73
7	Zusammenfassung und Ausblick	79
8	Literatur	81
9	Publikationsliste.....	90

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 2-1:	Molvolumen und Brechungsindex einiger Polymere.	8
Tab. 2-2:	Häufig verwendete Polymere für Wellenleiter und deren Eigenschaften.	9
Tab. 2-3:	Zerfallsmechanismen von PMMA durch kurzwellige UV-Bestrahlung, Elektronenbestrahlung und Röntgenstrahlen [Choi88] (*Veränderte Bindungen pro 100 Monomereinheiten).	19
Tab. 2-4:	Absorptionsbanden im NIR nach [Buba93] und [Müll00].	23
Tab. 4-1:	Untersuchten Polymere.	36
Tab. 4-2:	Materialeigenschaften der Polymere der OPTOREZ® Serien (Alle Werte sind aus dem Datenblatt des Herstellers entnommen).	37
Tab. 4-3:	Materialeigenschaften des untersuchten Polymere (*[Bäum05], ansonsten aus dem Datenblatt des Herstellers entnommen).	37
Tab. 4-4:	n , n^* -Übergänge in gesättigten Carbonyl-Verbindungen [Hesse02].	42
Tab. 4-5:	Zuordnung der wichtigsten Absorptionsbanden bei Polymethylmethacrylat nach [Humm91] und [Colo01].	44
Tab. 4-6:	Glasübergangstemperatur der OPTOREZ® Serie vor und nach UV-Bestrahlung unter Vakuum.	47
Tab. 4-7:	Bilder von Zellkulturen auf OZ-1100 und PMMA bei verschiedenen Bestrahlungsdosen.	48
Tab. 6-1:	Einfluss der Tempern auf Eigenschaften der Durimide® 7500 Serie (Datenblatt des Herstellers).	67
Tab. 6-2:	Wellenleiterstrukturen und Photodiodestrukturen (Photodiodenbreite: 60 μm).	69
Tab. 6-3:	Lichtmikroskopische Aufnahmen der gesägten PMMA Wellenleiter auf dem SiO ₂ -beschichteten Wafer (links: Einkoppelseite, rechts: Auskoppelseite. Zur besseren Veranschaulichung, wurden die beiden Wellenleiterenden gegenüberliegend dargestellt).	71
Tab. 6-4:	Vergleich des Photostroms der Proben.	76
Tab. 6-5:	Abgeschätzte Verluste in Wellenleiter mit Photodiode.	78

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2-1	Schematische Darstellung eines Filmwellenleiters.	4
Abb. 2-2	Schematische Darstellung eines Streifenwellenleiters.	5
Abb. 2-3	Schematische Darstellung eines Ausbreitung des Lichts in Wellenleiter (links: Monomode, rechts: Multimode).	5
Abb. 2-4	Schematische Darstellung der Modenverteilung (links: Monomode, rechts: Multimode).	6
Abb. 2-5	Beispiel des Rechnens des Brechungsindex nach [Krewe90].	7
Abb. 2-6	Darstellung der theoretischen Kurve (links: für die Brechzahl als Funktion der molaren Refraktion und des Molvolumens, rechts: für die Brechzahl als Funktion der molaren Refraktion und des Molvolumens für die Verhältnisse bei PMMA).	8
Abb. 2-7	Strukturen der verwendeten Polymere für die Wellenleiterherstellung.	10
Abb. 2-8	Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses der Wellenleiter durch RIE.	11

Abb. 2-9	Schematische Darstellung der Prozessschritte der Herstellung von Wellenleiter durch Replikationsverfahren.	12
Abb. 2-10	Nickel-Shim zum Heißprägen von Wellenleiterstrukturen (links) und abgeformte photonische Strukturen (rechts).	13
Abb. 2-11	Schematische Darstellung des Fotolocking-Verfahrens.	14
Abb. 2-12	Molekularstruktur von 6FDA/BTBz-co-PDAc/BTBz Copolyimid.	15
Abb. 2-13	Molekularstruktur von ORMOCER®.	16
Abb. 2-14	Wellenleiterherstellung durch UV-induzierte Brechzahländerung.	17
Abb. 2-15	Schematische Darstellung der Zerfallswege von PMMA bei UV,- Röntgen-, Elektronen- und Protonenbestrahlung nach [Choi88].	18
Abb. 2-16	Struktur der für UV-induzierte Brechzahlerhöhung schon eingesetzten Polymere.	20
Abb. 2-17	Chemische Strukturen von optischen Polymeren.	21
Abb. 2-18	Hauptstruktur des modifizierten Acrylats (OPTOREZ®).	21
Abb. 2-19	Verlustfaktoren in polymeren Wellenleiter.	22
Abb. 2-20	IR-Absorptionsspektrum von ca. 1,8 µm dicken PMMA Schichten gemessen in Reflexion auf einem vergoldeten Siliziumwafer.	23
Abb. 3-1	Schematische Darstellung der Belichtungsapparatur mit der Quecksilber-Xenon Hochdrucklampe.	26
Abb. 3-2	Am Ort der Probe gemessenes Bestrahlungsspektrum der Quecksilber-Xenon Hochdrucklampe (F-Strahler).	26
Abb. 3-3	Maskaligner EVG 620 (links: Übersicht, rechts: Lampehaus, 1: Lampe, 2: Ellipsoidspiegel, 3: 45°-Dielektrische Filter, 4: Linsenarray, 5: Verschluss, 6: Spiegel, 7: frontale Linse) [EVG03].	27
Abb. 3-4	Am Ort der Probe gemessenes Bestrahlungsspektrum der Lampe des Maskaligner EVG 620 (Lampe: UXM-501MA).	28
Abb. 3-5	Vergleich der Bestrahlungsspektren gemessen am Ort der Probe im UV-Bereich.	28
Abb. 3-6	Schematische Darstellung des Strahlengangs bei der Modenauskopplung an einem Prisma und Bild der Modenlinien und Substratübergang (Kontinuum) im Okular des Abbe-Refraktometers.	32
Abb. 3-7	Schematische Darstellung des Messplatzes bei der Nahfeldmessung.	33
Abb. 3-8	Gemessene Modenverteilungen bei 407 nm (links: Monomode, rechts: Multimode).	34
Abb. 3-9	Schematische Darstellung des Dämpfungsmessplatzes.	35
Abb. 4-1	Abhängigkeit von N_{eff} für die untersuchten Polymere von der Bestrahlungsdosis bei einer Wellenlänge von 633 nm.	38
Abb. 4-2	UV/VIS-Spektrum von ca. 0,5 µm dicken OPTOREZ® Polymerschichten nach UV-Bestrahlung unter Vakuum (links: OZ-1000, rechts: OZ-1100).	39
Abb. 4-3	UV/VIS-Spektrum von ca. 0,5 µm dicken OPTOREZ® Polymerschichten nach UV-Bestrahlung unter Vakuum (links: OZ-1310, rechts: OZ-1330).	40
Abb. 4-4	UV/VIS-Spektrum von ca. 3,2 µm dickem PMMA 950K nach UV-Bestrahlung unter Vakuum.	40
Abb. 4-5	Molekül-Orbitale und Elektronen-Übergänge.	41
Abb. 4-6	Orbitale in der Carbonylgruppe.	41
Abb. 4-7	IR-Absorptionsspektrum von ca. 0,5 µm dicken Schichten der OPTOREZ® Serie gemessen in Reflexion auf einem vergoldeten Siliziumwafer.	43
Abb. 4-8	IR-Absorptionsspektrum einer 0,5 µm dicken OZ-1000 Schicht nach UV-Bestrahlung unter Vakuum.	44

Abb. 4-9	IR-Absorptionsspektrum einer 0,5 μm dicken OZ-1100 Schicht nach UV-Bestrahlung unter Vakuum.	45
Abb. 4-10	IR-Absorptionsspektrum einer 0,5 μm dicken OZ-1310 Schicht nach UV-Bestrahlung unter Vakuum.	45
Abb. 4-11	IR-Absorptionsspektrum einer 0,5 μm dicken OZ-1330 Schicht nach UV-Bestrahlung unter Vakuum.	46
Abb. 5-1	Abhängigkeit von N_{eff} von OZ-1100 von der Bestrahlungsdosis bei verschiedenen Lichtquellen.	51
Abb. 5-2	Nahfeldmessung eines 7,5 μm breiten geraden Wellenleiters bei 1550 nm (links: bestrahlt mit EVG 620 bei 5 J/cm^2 , rechts: bestrahlt mit der UV-Lampe UVAPRINT bei 8,64 J/cm^2).	52
Abb. 5-3	Emissionsspektren der Lichtquellen EVG 620, UVAPRINT und UV-Absorptionsspektrum von OZ-1100 mit verschiedener Bestrahlungsdosis.	53
Abb. 5-4	Einfügedämpfung in Abhängigkeit von Wellenleiterlänge bei 1550 nm (links: mit EVG 620 bei 5 J/cm^2 bestrahlt, rechts: mit UVAPRINT bei 8,64 J/cm^2 bestrahlt).	53
Abb. 5-5	Nahfeldmessung eines 7,5 μm breiten geraden Wellenleiters bei 1550 nm (bestrahlt mit EVG 620 mit 3 J/cm^2).	54
Abb. 5-6	Einfügedämpfung in Abhängigkeit von der Wellenleiterlänge bei 1550 nm (bestrahlt mit EVG 620 mit 3 J/cm^2).	55
Abb. 5-7	REM Aufnahmen eines 7,5 μm breiten geraden Wellenleiters mit Bestrahlungsdosis 3 J/cm^2 (links) und 5 J/cm^2 (rechts).	56
Abb. 5-8	AFM Aufnahmen eines 7,5 μm breiten geraden Wellenleiters mit Bestrahlungsdosis 3 J/cm^2 (links) und 5 J/cm^2 (rechts).	56
Abb. 5-9	Nahfeldmessung eines 7,5 μm breiten geraden Wellenleiters bei 808 nm (bestrahlt mit EVG 620 mit 3 J/cm^2).	57
Abb. 5-10	Einfügedämpfung in Abhängigkeit von der Wellenleiterlänge bei 808 nm (durch EVG 620 mit 3 J/cm^2 bestrahlt).	58
Abb. 5-11	Mikroskopische Auflichtaufnahme eines Y-Verzweigers mit einem Öffnungswinkel von 1°.	58
Abb. 5-12	Einfügedämpfung in beiden Armen eines Y-Verzweigers mit einem Öffnungswinkel von 1°.	59
Abb. 6-1	Schematische Darstellung der Integration von Wellenleiter und Siliziumphotodioden für Sensor (rot: Wellenleiter, gelb: Photodiodenfelder, steingrau: elektrische Kontakte der Photodiode, grau: Kanal).	60
Abb. 6-2	Schematische Darstellung der Siliziumphotodiode (links) und AFM Aufnahme des Photodiodenbereichs vor Aufbringen des Wellenleiters (rechts).	61
Abb. 6-3	Schematische Darstellung des Leaky-Wave Coupling.	61
Abb. 6-4	Gekoppelte Leistung in die Photodiode gegen Kopplungslänge bei 635 nm (t: Wellenleiterdicke [μm]).	62
Abb. 6-5	Lichtmikroskopische Aufnahme einer Siliziumphotodiode auf SiO_2 -beschichtetem Siliziumwafer.	63
Abb. 6-6	REM Aufnahme von der gesägten Kante einer PMMA Schicht von 5 μm Höhe mit 5 μm breitem Wellenleiter auf einem SiO_2 -beschichteten Siliziumwafer.	64
Abb. 6-7	Schematische Darstellung der lithographischen Kante und des Sägeschnitts.	64
Abb. 6-8	Schematische Darstellung des Schichtaufbaus der Proben im Bereich der Photodiode (links: senkrecht zum Wellenleiter, rechts: entlang des Wellenleiters).	65

Abb. 6-9	Schematische Darstellung der gesamten Prozessschritte der Integration von polymerem Wellenleiter und Siliziumphotodiode.	66
Abb. 6-10	REM Aufnahmen der gesägten Wellenleiter mit lithographischer Kante mit Polyimid Haftvermittlerschicht, a): Hardbake bei 400°C für 1h, b): Hardbake bei 350°C für 2h, c): Hardbake bei 350°C für 1h.	68
Abb. 6-11	REM Aufnahme der gesägten Wellenleiter mit lithographischer Kante und Polyimid Haftvermittlerschicht mit neuer Hardbakebedingung (300°C für 4 h unter Stickstoffsatmosphäre).	68
Abb. 6-12	Lichtmikroskopische Aufnahmen der PMMA Wellenleiter auf SiO ₂ -beschichtetem Siliziumwafer ohne Photodiode (links: Übersicht, rechts: Vergrößerung der Wellenleiter).	70
Abb. 6-13	Nahfeldmessung bei 635 nm (der jeweils obere Teil der Aufnahmen stellt den Substratgrund dar (negativer Bereiche der vertikalen Achse), links: 5 µm breiter Wellenleiter, Mitte: 7,5 µm breiter Wellenleiter, rechts: 10 µm breiter Wellenleiter).	72
Abb. 6-14	Ergebnisse der Messungen zur Anwendung der Cut-Back Methode für gerade Wellenleiter bei 650 nm, Einkopplung mit monomodiger Faser, Auskopplung mit Multimodefaser.	73
Abb. 6-15	Lichtmikroskopische Aufnahme eines PMMA Wellenleiters auf einer Siliziumphotodiode.	73
Abb. 6-16	Messplatzaufbau für die Photostrommessungen (oben links: Schematische Darstellung des Messplatzes, oben rechts: Foto des Messplatzes, unten: Oberfläche der Photodiode).	74
Abb. 6-17	Abhängigkeit des Photostroms vom Abstand zwischen der Faser und der Photodiode.	75
Abb. 6-18	Fotos der Photodiode bei Kopplung zwischen optischer Faser und PMMA Wellenleiter (links: Übersicht, rechts: Photodiodebereich mit elektrischem Kontaktarm).	75
Abb. 6-19	Photostrom in Abhängigkeit von der Laserleistung.	76
Abb. 6-20	Schematische Darstellung der optischen Verlust des Eingangslights in über die gesamten Wellenleiterstrecke.	77

1 Einleitung

Der Einsatz von Licht sowohl als Übertragungsmedium in der Daten- und Telekommunikation als auch bei Erfassung von Messgrößen in der Sensorik hat in den vergangenen Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. So steigt der Anspruch an Hochgeschwindigkeits-Kommunikationsnetzen nicht nur für Büroanwendungen, sondern neuerdings auch für private Teilnehmeranschlüsse. Fiber to the home (FTTH) wird immer populärer im Alltagsleben [Gill06]. Mit dem damit notwendigen weiteren Ausbau von optischen Kommunikationsnetzen mit hohen Datenraten werden kostengünstige optische Komponenten benötigt [Agra02]. Auch in der Sensorik nimmt der Bedarf an optischen Sensoren immer stärker zu. Hierbei spielt insbesondere die Unabhängigkeit der optischen Sensoren von elektromagnetischen Feldern sowie die Miniaturisierbarkeit eine wichtige Rolle. Für biologische Messaufgaben nimmt der Bedarf an neuen, kostengünstigen, integrierten optischen Einwegsensoren zu. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, bedarf es neuer Technologien für die kostengünstige Herstellung von auf Wellenleitern basierenden optischen Komponenten [Kunz97], [Ymet02].

Bereits heute existieren eine Vielzahl von mikro-optischen Komponenten, Sub-Systemen und Systemen, die auf Wellenleitern basieren. Deren Realisierung erfolgt üblicherweise in Glas oder anderen siliziumbasierten Materialien oder im Falle von aktiven Komponenten in Lithiumniobat [Prue06]. Im Hinblick auf eine starke Kostenreduktion ist die Realisierung derartiger Komponenten in Polymeren anzustreben. Der große Nachteil der Polymere ist deren vergleichsweise hohe Dämpfung im nachrichtentechnischen Wellenlängenbereich und die thermische Stabilität. Im sichtbaren Bereich dagegen ist die Dämpfung deutlich geringer, so dass in diesem Fall beim Einsatz von Polymeren in der Sensorik keine Probleme entstehen. Ein Vorteil der Polymere ist deren Flexibilität, was die Realisierung von flexiblen Komponenten erlaubt [Elda00]. Aus materialwissenschaftlicher Sicht, können Polymere mit geringem Aufwand mit anderen Materialien verbunden werden. Der Einsatz von Polymer basierten Komponenten in der Fluidik sowie der Biologie bietet die Möglichkeit optische Biosensoren in Polymeren zu entwickeln.

In konventionellen Herstellungsmethoden für polymere Wellenleiter braucht man mehrere Prozessschritte für die Fertigung. Bei einigen Herstellungsmethoden entsteht außerdem eine erhöhte Rauheit der Seitenwände der Wellenleiter, die aus Prozessschritten wie der Entwicklung oder dem Ätzen stammt und zusätzliche optische Verluste mit sich bringt. Ein Verfahren zur Herstellung von Wellenleitern, das diese Probleme umgeht, ist die Wellenleiterherstellung in Polymeren durch UV-induzierte Brechzahländerung. Dieses Verfahren ist als eine der kostengünstigsten und genauesten Methoden zur Herstellung von Wellenleitern bekannt [Frank92]. Bei dieser Methode steigt der Brechungsindex einer UV-bestrahlten Oberfläche des Polymersubstrats gegenüber dem Substratmaterial an und bildet den Kern des Wellenleiters. Da nur eine dünne Oberflächenschicht von einigen Mikrometern durch die UV-Bestrahlung modifiziert wird, ist nur ein homogenes Substrat, das als Substrat und auch als Wellenleiter fungiert, nötig, und es werden neben der UV-Bestrahlung keine weiteren Prozessschritte wie z.B. Entwickeln oder Ätzen benötigt. Selbstverständlich kann der Prozess auch auf aufgeschleuderten Schichten auf einem massiven Substrat (z.B. Siliziumwafer) durchgeführt werden. Mit diesem Prozess können die gesamte Prozesszeit

und die Kosten für die polymere Wellenleiterherstellung reduziert werden. Obwohl die polymere Wellenleiterherstellung durch UV-induzierte Brechzahländerung einen großen Vorteil im Herstellungsprozess darstellt, ist sie nicht weit verbreitet. Einer der Gründe ist, dass die Materialauswahl sehr begrenzt ist, und bisher nur Polymethylmethacrylat (PMMA) und Polymethylmethacrylimid (PMMI) für die Wellenleiterherstellung eingesetzt wurden [Schö95], [Brun96].

Das Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) hat die Wellenleiterherstellungstechnologie auf der Basis der Modifikation des Brechungsindex von PMMA mittels kurzweiliger UV-Bestrahlung (Wellenlängenbereich zwischen 200–240 nm) weiterentwickelt. Monomodige Wellenleiter aus PMMA im nachrichtentechnischen Wellenlängenbereich wurden hergestellt [Rabus05], [Henz06]. PMMA ist zwar ein weit verbreitetes Polymer und wird industriell eingesetzt. Aber es ist unter Anwendungsgesichtspunkten nicht optimal sowohl für den Einsatz in optischen Hochgeschwindigkeits-Datennetzen als auch in der Sensorik geeignet. PMMA hat eine niedrige Glasübergangstemperatur (T_g) von 105°C und eine hohe Wasserabsorption (2,2 % [Bäum05]).

In Untersuchungen am Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für biologische Grenzflächen wurde festgestellt, dass die UV-bestrahlten PMMA Oberflächen eine verstärkte Zellimmobilisierung ermöglichen [Well02]. Diese Möglichkeit führt zu der Überlegung aus der Kombination des biologischen und optischen Verhaltens der bestrahlten Polymerwellenleiter Sensoren zu realisieren die z.B. aufgrund der hohen Empfindlichkeit von kultivierten Tierzellen für die Überwachung von Umweltveränderungen eingesetzt werden können oder mit denen direkt Zellanalytik durchgeführt werden kann. Bisher wurden für derartige Anwendungen meist nur Silizium basierte Wellenleiter verwendet [Vörö00], [Bryn02].

Unter Kostengesichtspunkten sollten derartige biophotonische Sensoren als hochintegrierte Systeme hergestellt werden. Dazu ist es notwendig, die optischen Wellenleiterstrukturen mit Detektoren und ggf. mit Lichtquellen zu integrieren. Das bedeutet, die Wellenleiter auf Siliziumphotodioden aufzubauen und über eine Evaneszente-Feld-Kopplung die vom Transducer modifizierte Lichtintensität zu detektieren. Die Integration mit einem Wellenleiter und einer Siliziumphotodiode ist bereits seit Längerem bekannt [Erman88], [Wund92]. Aber die Integration mit einem polymeren Wellenleiter wurde bis auf einige Beispiele mit multimodigen SU-8 Wellenleitern noch nicht realisiert [Fuen05], [Ruan06].

Ziel dieser Arbeit ist es, die Voraussetzungen zu erarbeiten, die es ermöglichen integrierte Sensoren für biophotonische Anwendungen zu realisieren. Hierzu war es notwendig, ein geeigneteres Material zu identifizieren, das eine höhere thermische Stabilität aufweist als PMMA. Dabei muss jedoch sichergestellt werden, dass die UV-Bestrahlung zu einer vergleichbaren Brechzahländerung führt wie bei PMMA. Dafür wurden im Rahmen der Arbeit Materialuntersuchungen für geeignete Polymere durchgeführt. Diese wurden hinsichtlich ihres chemischen Verhaltens bei der Wellenleiterherstellung durch UV-induzierte Brechzahländerung charakterisiert. Der Prozess zur Herstellung der Wellenleiter wurde optimiert. Dies erforderte die Optimierung der Bestrahlungsbedingungen. Als weitere wichtige Fragestellung musste die Integration von Wellenleiter und Photodiode nachgewiesen werden; es musste gezeigt werden, dass vom Wellenleiter in die Photodiode

ausreichend Licht übergekoppelt werden kann. Hierzu musste ein neuer Prozess zur Herstellung von zuverlässigen Wellenleiterchips erarbeitet werden.

Die Arbeiten zur Integration von Wellenleitern und Siliziumphotodioden wurden mit dem Projektpartner National Institute for R&D in Microtechnologies (IMT-Bucharest) im Rahmen des 4M Projektes (CDP Integrated Biophotonics Polymer Chip) durchgeführt.

In Kapitel 2 dieser Arbeit wird zunächst eine Übersicht über bestehende Herstellungsverfahren und Materialien für polymere Wellenleiter gegeben, um den im Rahmen der Arbeit verwendeten Prozess einordnen zu können. Dabei wird speziell in Kapitel 2.3.2 die Materialmodifikation zur Verbesserung der UV-induzierten Brechzahländerung analysiert. In Kapitel 3 werden die Methoden zur optischen Charakterisierung der Wellenleiter und zur Materialcharakterisierung sowie die verwendete Messtechnik und die UV-Bestrahlungsmethode beschrieben. Das Kapitel 4 beinhaltet die Ergebnisse der Materialuntersuchungen für die ausgewählten Polymere zur Wellenleiterherstellung durch UV-induzierte Brechzahländerung. Kapitel 5 beschreibt den Herstellungsprozess der Wellenleiter aus diesen Polymeren und die Ergebnisse deren optischer Charakterisierung. In Kapitel 6 wird die Integration der polymeren Wellenleiter mit einer Siliziumphotodiode sowie die Ergebnisse dargestellt. Kapitel 7 gibt eine Zusammenfassung der Ergebnisse und ein Ausblick der Arbeiten.

2 Grundlagen zu polymeren Wellenleitern

In optischen Wellenleitern werden elektromagnetische Wellen durch Totalreflexion geführt. Das einfachste Modell eines Wellenleiters besteht aus dem in Abb. 2-1 dargestellten Stufenindex-Filmwellenleiter [Ebel89]. Dieser Filmwellenleiter besteht aus einem zweidimensionalen planparallelen Film mit Brechungsindex n_f , der unten von einem Substrat mit einem Brechungsindex n_s , und oben von einem Deckmaterial mit Brechungsindex n_c begrenzt wird. Gilt nun für die Brechungsindizes von Film, Substrat und Deckmaterial die Beziehung $n_f > n_s, n_c$, so wird das Licht aufgrund von Totalreflexion an den Grenzflächen Film/Substrat und Film/Deckschicht in dem Film geführt. Dabei beträgt der kritische Winkel (Brewsterwinkel) ab dem Totalreflexion eintritt:

$$\Theta_c = \arcsin\left(\frac{n_s}{n_f}\right) \text{ oder } \Theta_c = \arcsin\left(\frac{n_c}{n_f}\right) \quad (2.1)$$

Der maximale Winkel, unter dem Licht einen Wellenleiter treffen darf (Akzeptanzwinkel), um in diesem durch Totalreflexion weitergeleitet zu werden, ergibt sich aus:

$$n_o \sin \Theta_a = \sqrt{(n_f^2 - n_s^2)} \quad (2.2)$$

mit n_o = Brechzahl des Mediums aus dem der Lichtstrahl austritt.

Dieser Winkel ist im Falle, dass der Lichtleiter einen höheren Brechungsindex als das Medium hat, aus dem das Licht austritt, größer als der Winkel $\Theta_m = 90^\circ - \Theta_c$, mit dem der Winkel im Wellenleiter die Grenzflächen trifft. Der Eintrittswinkel Θ_a wird auch als Numerische Apertur NA bezeichnet. Im Falle von Luft als Medium ($n_o = 1$), aus dem der Lichtstrahl austritt, ergibt sich NA zu

$$NA = \sin \Theta_a = \sqrt{(n_f^2 - n_s^2)} \quad (2.3)$$

Im Wellenleiter breitet sich das Licht mit dem Wellenvektor k mit den Komponenten k_x, k_y und k_z aus.

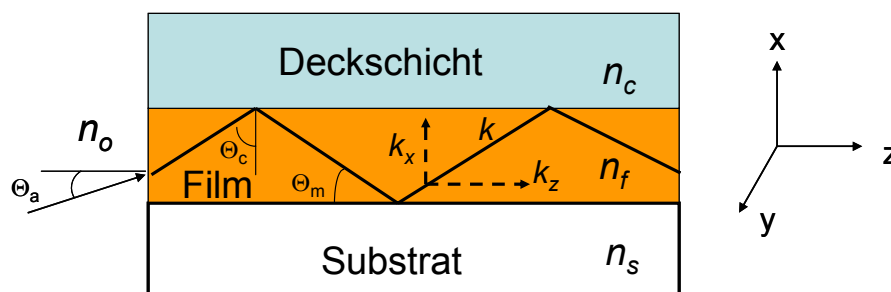


Abb. 2-1 Schematische Darstellung eines Filmwellenleiters.

Streifenwellenleiter entstehen aus planaren Wellenleitern, wenn in der Filmebene für eine zusätzliche seitliche Wellenführung gesorgt wird. Dies erreicht man etwa dadurch, dass nach

Abb. 2-2 der Brechungsindex des Films in der Ebene nicht homogen ist. Ein zentraler Streifen mit hohem Index n_f , ist von Material mit kleinerem Index n_l, n_r , eingerahmt ($n_f > n_l, n_r$). Dies hat zur Folge, dass auch an den seitlichen Grenzflächen Totalreflexion erfolgen kann und sich somit geführte Moden ausbilden.

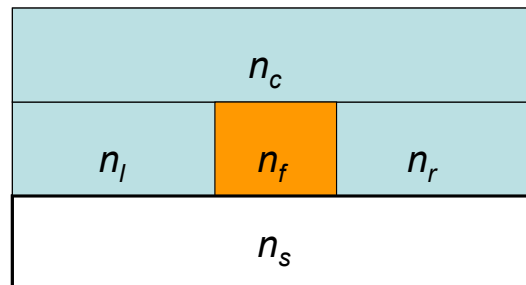


Abb. 2-2 Schematische Darstellung eines Streifenwellenleiters.

Praktische Herstellungsverfahren wie zum Beispiel Diffusion, Ionenimplantation oder Epitaxie von Mischungshalbleitern mit variierender Zusammensetzung führen zu Profilen, bei denen sich der Brechungsindex allmählich über den Wellenleiterquerschnitt ändert. In diesem Falle spricht man von Gradientenindexwellenleitern, im Gegensatz zu den Stufenindexwellenleitern, bei denen ein unstetiger Übergang des Brechungsindex zwischen Kern und Mantel erfolgt.

Für die Ausbreitung des Lichts gibt es zwei Typen von Wellenleitern, Monomode- und Multimodewellenleiter. Abb. 2-3 zeigt eine schematische Darstellung der Ausbreitung des Lichts in den beiden Wellenleitern.

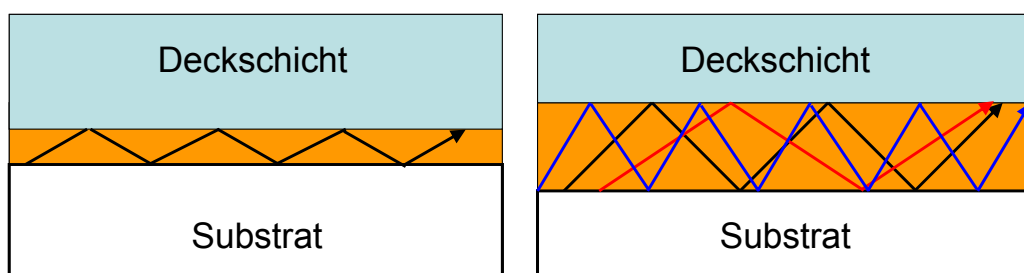


Abb. 2-3 Schematische Darstellung eines Ausbreitung des Lichts in Wellenleiter (links: Monomode, rechts: Multimode).

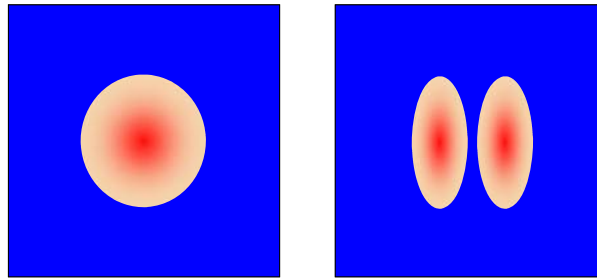


Abb. 2-4 Schematische Darstellung der Modenverteilung (links: Monomode, rechts: Multimode).

Im Falle des multimodigen Wellenleiters breiten sich viele Lichtstrahlen (Lichtwellen) im Wellenleiter aus. Die Anzahl der ausbreitungsfähigen Moden nimmt dabei mit der Größe des Wellenleiters zu. Die monomodigen Wellenleiter sind so dimensioniert, dass sich nur die Grundmode im Wellenleiter ausbreitet. Aus diesem Grunde liegen die Abmessungen im Bereich von wenigen Mikrometern. Da es zu keiner Beeinflussung während der Signalübertragung kommt, sind mit monomodigen Wellenleitern lange Übertragungsstrecken möglich.

Integrierte Wellenleiter wurden in der Vergangenheit in Materialien wie SiO_2 , GeO_2 , Na_2O , CaO oder GeO_2 erzeugt, weil diese Glasmaterialien sehr kleine Dämpfung besitzen (0,3 dB/km bei 1550 nm). Auch in Polymerschichten wurden Wellenleiter erzeugt, wobei polymere Wellenleiter jedoch eine größere Dämpfung haben als Wellenleiter in anorganischen Materialien. Ein Vorteil der Polymere gegenüber anorganischen optischen Materialien wie Glas, III-V-Halbleitern, Silizium oder ferroelektrischen Kristallen ist die Anpassungsmöglichkeit an Massenproduktionsprozesse wie Abformtechniken. Polymere sind sehr flexibel und können einfach verformt werden. Außerdem existieren unterschiedliche massenfertigungstaugliche Möglichkeiten, die optischen Eigenschaften der Polymere zu modifizieren. Ein Überblick über sämtliche Herstellungsverfahren muss wegen der großen Anzahl von Methoden unvollständig bleiben. Im Kapitel 2.2 werden einige grundlegende Verfahren zu Herstellung von Wellenleitern in Polymere beschrieben, bevor eine ausführliche Beschreibung des in dieser Arbeit verwendeten Herstellungsverfahrens erfolgt.

Grundvoraussetzung für die Wellenleiterherstellung ist die Realisierung einer Film- oder Streifenstruktur mit einem höheren Brechungsindex als das umgebende niederbrechende Material. Für die Materialauswahl bzw. Wahl der Methoden zur Einstellung der Brechzahlen erweist es sich als nützlich, über die Lorentz-Lorenz-Beziehung (2.4) eine Möglichkeit der Abschätzung der Brechzahl zu haben [Kreve90]. Die Lorentz-Lorenz-Beziehung liefert hierbei einen Zusammenhang zwischen dem Realteil des Brechungsindex und der chemischen Zusammensetzung des Materials.

$$R_m = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{N_A}{3\epsilon_0} \cdot \alpha_e \quad (2.4)$$

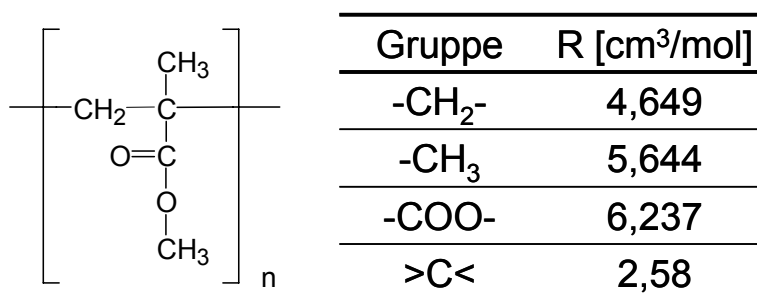
Hierbei ist R_m die molare Refraktion, α_e die Elektronenpolarisierbarkeit, M die Molmasse des Monomers, ρ die Dichte des Stoffes, N_A die Avogadrokonstante und ϵ_0 die Dielektrizitätskonstante. Der Brechungsindex ist demnach nur abhängig von dem Verhältnis zwischen der molaren Refraktion und dem über die Atomradien definierten molaren Volumen pro Struktureinheit $V = M / \rho$.

$$n = \sqrt{\frac{1 + 2 \frac{R_m}{V}}{1 - \frac{R_m}{V}}} \quad (2.5)$$

Somit kann die Brechzahl modifiziert werden, in dem eine oder beide Größen in Gleichung (2.5) unterschiedlich stark verändert werden:

- Änderung der molaren Refraktion R_m , d.h. Änderung der Dielektrizitätskonstante oder der Elektronenpolarisierbarkeit durch Änderung des chemischen Aufbaus des Polymers
- Änderung des Molvolumens V , d.h. Änderung der Dichte oder der Molmasse des Materials

Eine qualitative Abschätzung des Verhaltens des Brechungsindex bei Änderung der oben genannten Parameter kann mit den in [Kreve90] theoretisch berechneten molaren Refraktionen vorgenommen werden. Abb. 2-5 zeigt den Beispiel des Rechnens des Brechungsindex nach [Kreve90]. Für PMMA wurde im [Kreve90] die molare Refraktion folgendermaßen berechnet. Sie beträgt $24,754 \text{ cm}^3/\text{mol}$ bei einem Molvolumen von $86,5 \text{ cm}^3/\text{mol}$. Damit ergibt sich ein Brechungsindex von 1,484. Tab. 2-1 zeigt als Beispiel die Molvolumen und die Brechungsindizes verschiedener Polymere [Ide02]. Die Ähnlichkeit der Brechungsindizes bei deutlich unterschiedlichem Molvolumen lässt darauf schließen, dass sich diese Polymere sehr stark in der molaren Refraktion unterscheiden.



$$R_{m, \text{PMMA}} = 4,649 + 2 \times 5,644 + 6,237 + 2,58$$

$$= 24,754 \text{ cm}^3/\text{mol}$$

$$V_{\text{PMMA}} = 86,5 \text{ cm}^3/\text{mol}$$

$$n_{\text{PMMA}} = 1,484$$

Abb. 2-5 Beispiel des Rechnens des Brechungsindex nach [Kreve90].

Polymer	V [cm ³ /mol]	n _d
Polyethylen	30,8	1,51
Polymethylmethacrylat	85,5	1,49
Polystyrol	97,7	1,59
Nylon 6	102,7	1,53

Tab. 2-1: Molvolumen und Brechungsindex einiger Polymere.

In Abb. 2-6 wird der in Gleichung (2.5) dargestellte Zusammenhang zwischen Brechungsindex, molarer Refraktion und Molvolumen grafisch dargestellt.

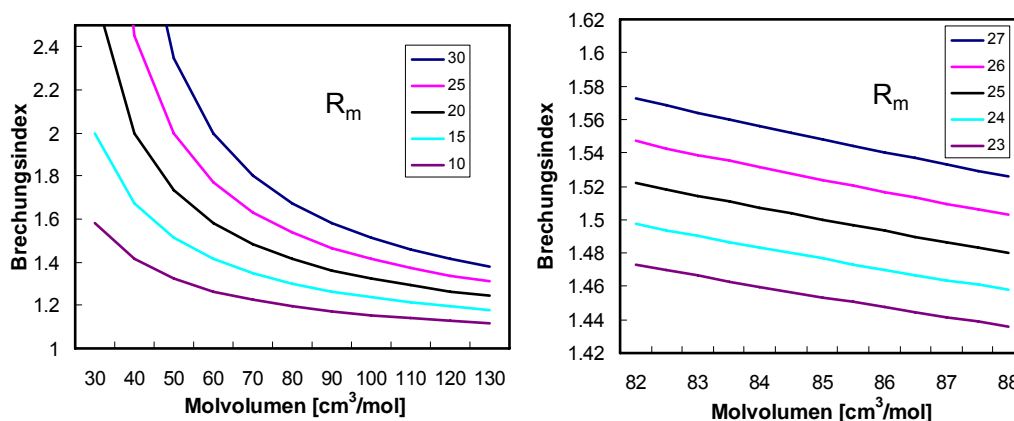


Abb. 2-6 Darstellung der theoretischen Kurve (links: für die Brechzahl als Funktion der molaren Refraktion und des Molvolumens, rechts: für die Brechzahl als Funktion der molaren Refraktion und des Molvolumens für die Verhältnisse bei PMMA).

Wie aus Abb. 2-6 zu erkennen nimmt mit zunehmendem Molvolumen die Möglichkeit, den Brechungsindex durch die Änderung der molaren Refraktion zu ändern, ab. Für PMMA liegt die molare Refraktion bei 24,8. Um eine Änderung des Brechungsindex um 0,02 zu erreichen, muss das Molvolumen bei gleich bleibender molarer Refraktion um ca. 3,5% verändert werden. Die molare Refraktion muss bei konstantem Molvolumen um ca. 4% geändert werden.

2.1 Polymermaterial für polymere Wellenleiter

Viele verschiedene Polymere für polymere Wellenleiter wurden bisher entwickelt, die im für die Telekommunikation relevanten Wellenlängenbereich (1330 nm-1550 nm) eine möglichst geringe Dämpfung besitzen. In Tab. 2-2 sind häufig verwendete kommerzielle Polymere zusammengestellt [Ma02]. Abb. 2-7 zeigt einige Polymerstrukturen, die für die Wellenleiterherstellung geeignet sind [Ma02], [Zhou02].

Polymer	Firma	Dämpfung monomode Wellenleiter [dB/cm]	λ [μm]	Strukturierung	Andere Eigenschaften
Polymethyl- methacrylat PMMA	-	0,2	0,85	RIE	hochtransparent
Fluorierte Polyimide	NTT	TE: 0,3 TM: 0,7	1,31	RIE	doppelbrechend hochtemperaturstabil
Polytetrafluoro- vinylether CYTOP®	Asahi Glass	< 0,3 0,2	1,31 1,55	RIE	hochtemperaturstabil
Perfluorocyclo- butan PFCB	Dow Chemical	0,3 0,3	1,31 1,55	RIE	hochtemperaturstabil stabil gegen chemische Einflüsse
Polycarbonat	K-JIST	TE: 0,8 TM: 1,4	1,3 1,3	RIE	thermisch stabil

Tab. 2-2: Häufig verwendete Polymere für Wellenleiter und deren Eigenschaften.

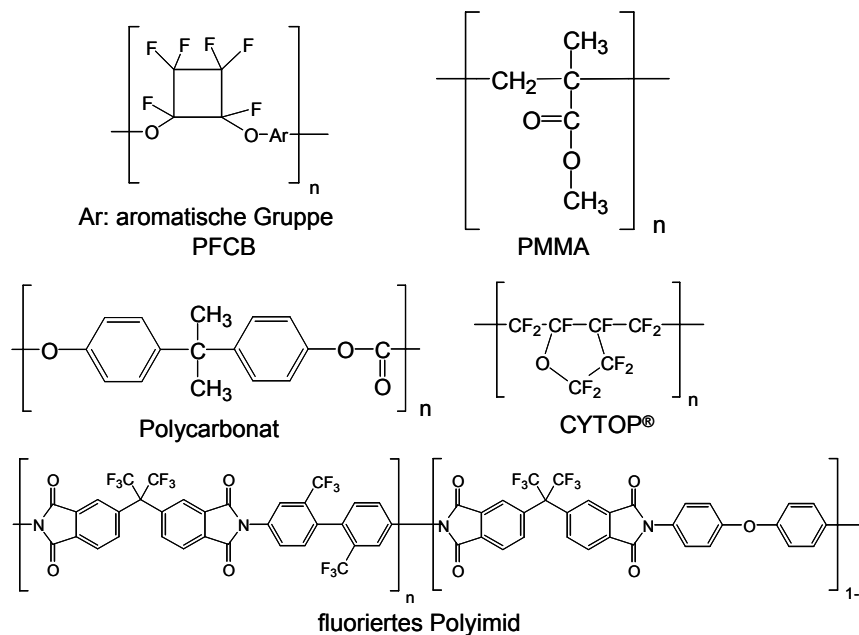


Abb. 2-7 Strukturen der verwendeten Polymere für die Wellenleiterherstellung.

Diese Polymere haben neben idealen optischen Eigenschaften (hohe Transparenz, geeigneter Brechungsindex, geringere Doppelbrechung) eine hohe Resistenz gegenüber äußeren Einflüssen; sie sind chemisch inert und haben z.B. geringe Wasserabsorption. Die Wasserabsorption ist insofern ein kritischer Parameter, da die absorbierten Wassermoleküle einen zusätzlichen Verlust verursachen, der sich aus der Vibrationsabsorption der Hydroxygruppe (OH) ergibt [Kai85]. Sollen die Polymere als Biosensoren eingesetzt werden, so müssen sie zusätzlich biokompatibel sein.

Polymere, die mittels RIE (engl. reactive ion etching) häufig strukturiert wurden, sind die hochtemperaturstabilen fluorierten Polyimide [Reu88], [Koba98] sowie Perfluorocyclobutan (PFCB) [Fisch97], [Choi00]. PFCB ist ein von Dow Chemical für die Elektroindustrie entwickelte Coatingpolymer, das eine Glasübergangstemperatur $> 350^{\circ}\text{C}$ besitzen. CYTOP® wurde für die Herstellung von Polymer Optical Fibers (POF) mit niedrigen Verlusten im sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereich durch Asahi Glass entwickelt [Zhao00], [Liu01]. Auch konventionelle optische Polymere wie Polycarbonat werden oft auch durch RIE für die Wellenleiterherstellung eingesetzt [Kang01].

2.2 Herstellungsmethoden für polymere Wellenleiter

In der Literatur wird eine Vielzahl von Verfahren zu Herstellung von Wellenleiter genannt. Die im Folgenden vorgestellten Herstellungstechnologien sind nach Kriterien der mikrotechnischen Bearbeitung gegliedert. Zusammenfassend gibt es somit 3 Klassen von Verfahren, die eine Herstellung von Wellenleitern aus Polymeren ermöglichen [Müll00].

- Ablative-/Ätzverfahren: Laserablation, reaktives Ionenätzen (RIE)
- Replikationsverfahren: Spritzgießen, Heißprägen, Spritzprägen
- Fotochemische Strukturierung: Fotolocking, Fotopolymerisation, Fotolyse

2.2.1 Ablative-/Ätzverfahren

Das wohl am häufigsten eingesetztes Verfahren zur Herstellung von Wellenleitern ist das reaktive Ionenätzen (engl. reactive ion etching, RIE). Bei diesem anisotropen Trockenätzprozess wird in einem Sauerstoffplasma ein Polymerschichtsystem mit Hilfe einer Maske strukturiert, um Rippenwellenleiter herzustellen. Die schematische Darstellung der Herstellungsprozesse der Wellenleiter durch RIE wird in Abb. 2-8 gezeigt.

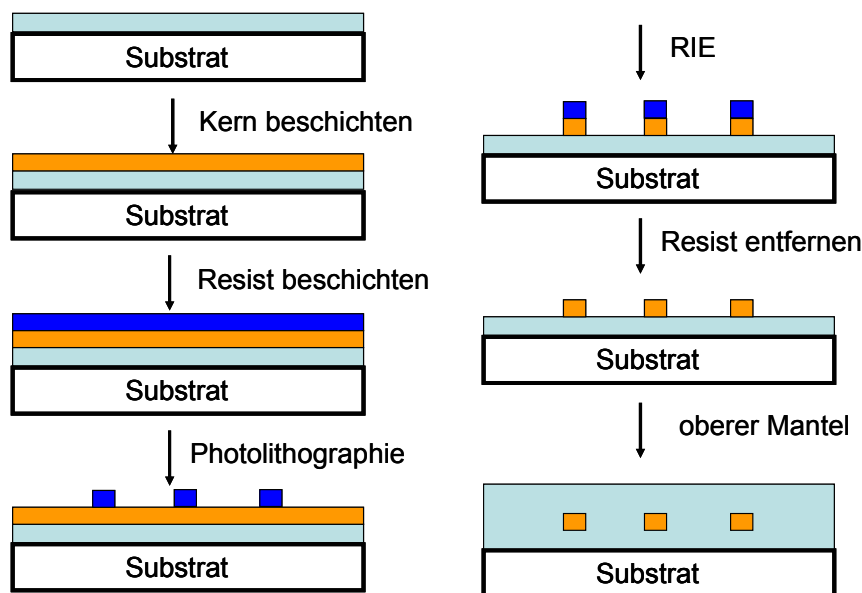


Abb. 2-8 Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses der Wellenleiter durch RIE.

Auf dem Substrat wird zunächst ein Material, das als Mantelmaterial fungiert, und dann die Kernmaterialschiicht aufgebracht. Auf die Kernschicht kommt eine Resistschicht, in der durch Photolithographie die Wellenleiterstrukturen strukturiert werden. Im folgenden Prozessschritt werden die Wellenleiterstrukturen des Resists durch reaktives Ionenätzen in die Kernschicht übertragen. Anschließend wird der Photoresist entfernt und die Wellenleiterstrukturen in der Kernschicht werden mit dem oberen Mantelmaterial übergossen. Auf diese Art und Weise entstehen vergrabene Wellenleiter mit einem Rechteckprofil.

Die Betriebsparameter des Sauerstoffplasmas müssen so gewählt werden, dass eine sehr hohe Selektivität zwischen den Ätzrate der Resistschicht und der Kernschicht besteht. Außerdem muss der Prozess so eingestellt werden, dass man entsprechende

Wellenleiterstrukturen mit rechteckigen Seitenwänden erhält. Mit diesem Wellenleiterprofil wird eine geringe Dämpfung erwartet. Dazu müssen die Plasmadichte und die Ionenergie genau reguliert werden. Allerdings ist es schwer, die Bedingung im RIE Prozess so zu optimieren, dass man optimale Seitenwände bekommt [Kim99]. Die große Anzahl von Kombinationen an Materialien, die mit reproduzierbarer Qualität mit RIE strukturiert werden können, macht dieses Verfahren sehr populär. Weiterhin ermöglicht die Integration dieser Technologie in bestehende Technologien der Halbleiterindustrie eine monolithische Integration von elektrischen und optischen Komponenten.

Eine weitere Möglichkeit der ablativen Strukturierung ist das direkt schreibende Verfahren mittels Laser. Da dies jedoch serielle Verfahren sind, eignen sie sich nicht für die Massenproduktion.

2.2.2 Replikationsverfahren

Polymere Wellenleiter werden ebenfalls mit Hilfe von Replikationstechnologien hergestellt [Krag98], [Müll00]. Abb. 2-9 zeigt schematisch den Prozess zur Herstellung von Wellenleitern durch Heißprägen.

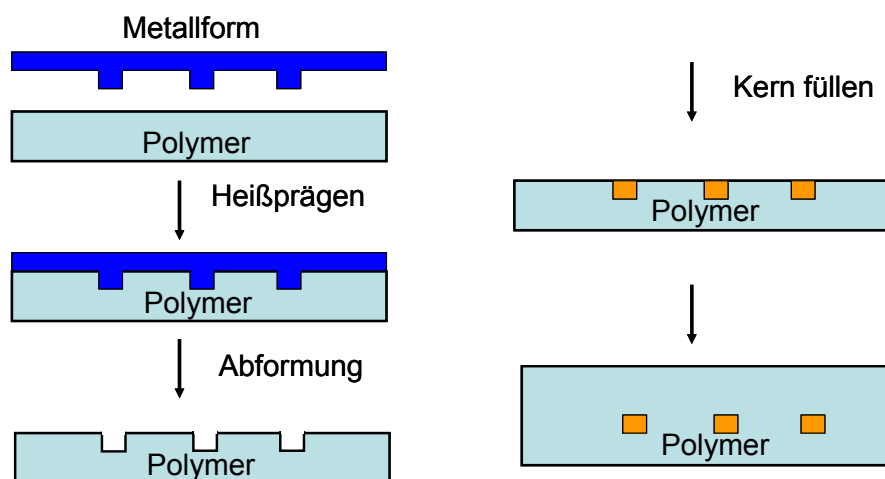


Abb. 2-9 Schematische Darstellung der Prozessschritte der Herstellung von Wellenleitern durch Replikationsverfahren.

Eine Metallform, die mit Wellenleiterstrukturen versehen ist, wird in die über Glasübergangstemperatur aufgeheizte Polymerschicht eingepresst. Dabei wird die Struktur der Metallform in das Polymer repliziert. In die entstandenen Gruben wird danach das Kernmaterial eingefüllt. Anschließend wird die Oberfläche des Kernmaterials mit der Mantelschicht bedeckt. Die befüllten Wellenleiter werden mit einem niederbrechenden Material überschichtet, das in der Regel mit UV-Licht gehärtet wird. Der kritische Schritt bei diesem Prozess ist die Befüllung der Gräben. Sie muss blasenfrei geschehen, die unvermeidliche Schicht auf dem geprägten Mantelmaterial darf nur 1-2 μm betragen, da ansonsten Licht über diese Schicht abgestrahlt werden kann und damit die Wellenleiterverluste zunehmen. Durch Spritzguss wurden monomodige polymere

Wellenleiter für 1300 nm hergestellt [Ney93]. Als Substratmaterial diente hierbei PMMA und als Kernmaterial wurde deuteriertes Ethylenglycoldimethacrylat (EGDMA) verwendet. Ein entscheidender Vorteil dieser Technologien besteht in der Möglichkeit, Faserführungsstrukturen gleichzeitig mit den Wellenleiterstrukturen herzustellen. Dadurch kann die aufwändige und teure aktive Justage von Glasfasern entfallen und durch eine einfache passive Montage ersetzt werden. Diese Replikationsverfahren benötigen aber sehr genaue Formwerkzeuge und erfordern einen präzisen Abformprozess. Die Herstellung des Formwerkzeuges kann mit unterschiedlichen Technologien erfolgen, zum Beispiel mit dem LIGA-Verfahren (Röntgentiefenlithographie **G**alvanik **A**bformung) oder dem SIGA-Verfahren (**S**ilizium-**G**alvanik-**A**bformung). Bei diesem wird eine Silizium-Urform mittels nasschemischen und anisotropem Trockenätzverfahren hergestellt. Mit Hilfe des LIGA-Verfahrens wurden z.B. 4 x 4 multimode Star Coupler hergestellt [Bau00]. Als Substratmaterial diente hierbei PMMA oder COC. Benzylmethacrylat, welches einen Farbstoff enthält wurde als Kernmaterial verwendet. Durch Veränderung der Konzentration des Farbstoffs konnte der Brechungsindex des Kernmaterials eingestellt werden. Unter Verwendung eines mit dem SIGA-Verfahren hergestellte Formwerkzeugs wurden als Beispiel 1 x 4 und 1 x 8 Power Splitter aus PMMA hergestellt [Klein94]. Abb. 2-10 zeigt einen Nickel-Shim und durch Heißprägen erzeugte abgeformte photonische Strukturen (Rippenwellenleiter durch Abformung und UV-Bestrahlung hergestellt) [Brün06].

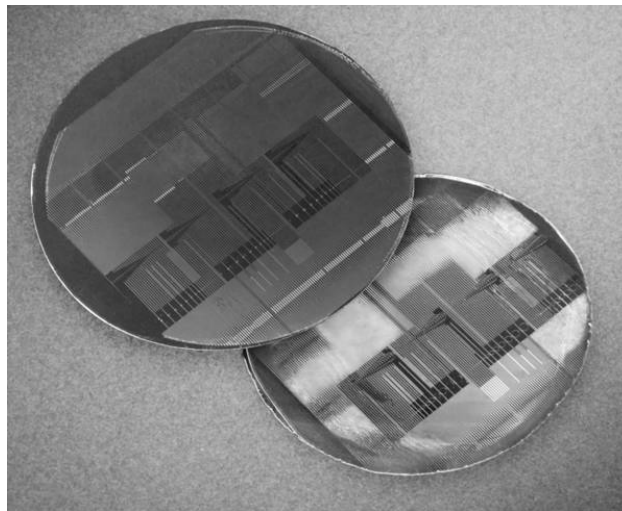


Abb. 2-10 Nickel-Shim zum Heißprägen von Wellenleiterstrukturen (links) und abgeformte photonische Strukturen (rechts).

Das Replikationsverfahren ist für die Massenproduktion mit geringen Kosten geeignet. Es erfordert allerdings sehr präzise Formeinsätze mit optischen Oberflächen der Wellenleiterstrukturen. Außerdem darf der Schwund des Materials während des Abformvorgangs die Präzision der Strukturen nicht beeinträchtigen.

2.2.3 Fotochemische Strukturierung

Eine weitere oft in der Literatur beschriebene Methode zur Modifizierung des Brechungsindex ist das Fotolocking [Chan74]. Dabei wird das Substrat mit einer Lösung, die Polymer, Monomer und Fotoinitiator enthält, beschichtet (Abb. 2-11). Durch selektive Belichtung wird nun die Wellenleiterstruktur hergestellt. Die Polymerisation des gelösten Monomers mit Fotoinitiator in einer Polymermatrix oder die Vernetzung oder Anbindung der Polymermatrix an den Fotoinitiator führt hierbei zu einem Polymer mit höherem Brechungsindex. Anschließend werden alle flüchtigen Produkte (nicht reagierter Fotoinitiator oder Monomer) in einem Tempersschritt ausgetrieben. Aus den belichteten Bereichen wird das Material nicht entfernt, da dort eine Einbindung in die Polymermatrix stattgefunden hat. Durch Einbau des Fotoinitiators in das Polymer können in Abhängigkeit vom Fotoinitiator verschiedene Brechzahländerungen realisiert werden. Abschließend kann ein Cladding aufgebracht werden. Durch die Struktur der Polymere oder die Auswahl des Fotoinitiators können verschiedene stabile polymere Wellenleiter hergestellt werden. Zum Beispiel wurde, Benzildimethylketal/Polymethylmethacrylat in Lösung von Methylmethacrylat untersucht [Fran84], [Kuli90]. Dabei wurde ein Brechzahlhub von $\Delta n < 0,05$ mit hoher Konzentration von Benzildimethylketal erreicht. Die Brechzahlerhöhung basiert auf einer fotoinduzierten Polymerisation mit Fotolocking von Monomer mit hohem Brechungsindex und Fotolocking von Ketalfragmenten mit hohem Brechungsindex sowie einer fotochemischen Reaktion von Ketal. Die polymeren Wellenleitern sind kommerziell unter dem Namen Polyguide™ (eingetragenes Warenzeichen von Dupont) bekannt [Boot89].

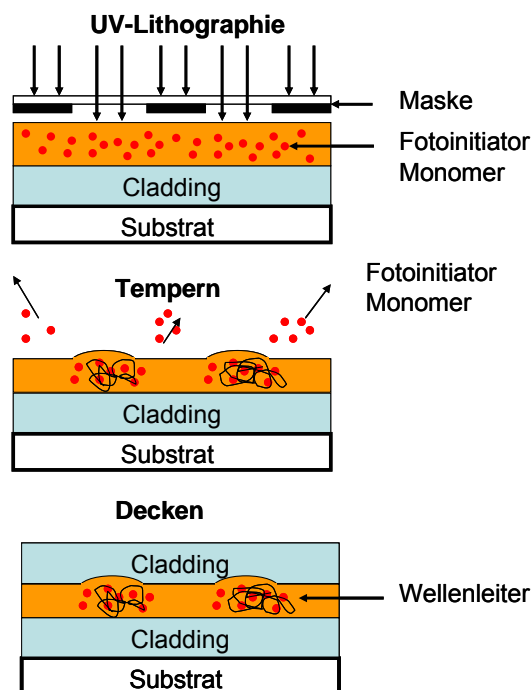


Abb. 2-11 Schematische Darstellung des Fotolocking-Verfahrens.

Neben Fotolocking wird auch die sogenannte selektive Polymerisation für die polymere Wellenleiterherstellung eingesetzt [Kuro78], [Kuro80], [Taka82]. Dabei wird z.B. Polycarbonat (PC) als Matrix, Methacrylat (MA) als Monomer und Benzoinethylether (BZEE) als Fotoinitiator benutzt. Im Allgemeinen wird das Substrat durch Aufschleudern mit einem Präpolymer, welches Monomer und Fotoinitiator enthält, beschichtet. Rippenwellenleiter werden durch Fotopolymerisation über eine Maske oder mittels UV-Laserlithographie [Elda96] erzeugt. In den unbelichteten Bereichen wird das Material anschließend mit Lösungsmittel entfernt. Die spätere Abdeckung mit Claddingmaterial ist möglich. Die Kombination von fotosensitiven Monomeren wurde untersucht, um monomodige polymere Wellenleiter mit wenigem Verlust zu erhalten. Dabei konnte durch die Mischung der verschiedenen Monomere der Brechungsindex genau eingestellt werden [Naka94]. In dem einfachen Polymersystem auf der Basis von Methacrylat wurden Wellenleiter mit Verlusten von 0,15-0,2 dB/cm bei 633 nm hergestellt. In Di-/Tri-Acrylat Systemen wurden mittels Maskenbelichtung monomodige Wellenleiter mit Dämpfungswerten von 0,56 dB/cm bei 1,3 μm hergestellt [Phel97].

Auch fotosensitive Polymere können zur Herstellung von Wellenleitern verwendet werden, solange nach der UV-Bestrahlung ein ausreichender Brechzahlhub erreicht wird [Web72]. Da das Polymer selbst fotosensitiv ist, sind zusätzliche Monomere und Fotoinitiatoren nicht nötig. Thermisch stabile polymere Wellenleiter wurden aus fotosensitivem fluoriertem Polyimid hergestellt [Kang02]. Die Molekularstruktur wird in Abb. 2-12 dargestellt. Dieses Polyimid enthält p-Phenylendiacyrylol (PDAc). Durch die UV-Bestrahlung wird das Polymer inter- und intramolekular vernetzt. Wegen der Fotovernetzung wird der Intermolekularabstand in der Polymerkette verkürzt, was zur Abnahme des Molvolumens führt. Damit steigt der Brechungsindex. Die Dämpfung von derart hergestellten Wellenleitern betrug 0,3 dB/cm bei 1,3 μm und 0,5 dB/cm bei 1,55 μm für TE-polarisiertes Licht.

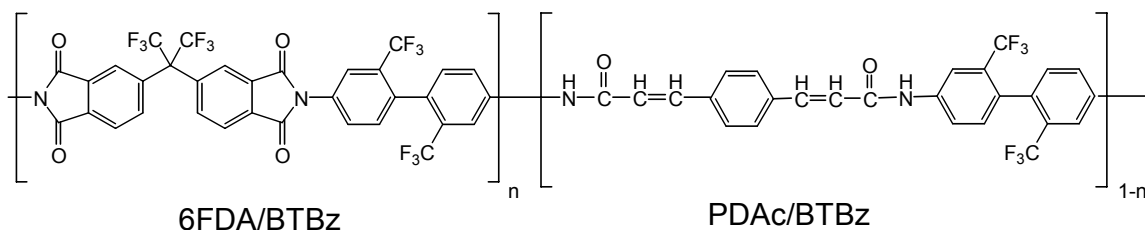


Abb. 2-12 Molekularstruktur von 6FDA/BTBz-co-PDAc/BTBz Copolyimid.

Aus materialwissenschaftlicher Sicht kommen zunehmend anorganisch-organische Hybridpolymere in Mode. Für die Wellenleiterherstellung wird eine konventionelle UV-Bestrahlung benutzt. Ein solches Beispiel ist ORMOCER[®] (anorganisch-organisches Hybridpolymer, Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.). ORMOCER[®] besitzt anorganische Eigenschaften wie eine hohe Stabilität und eine hohe optische Qualität, es besitzt gleichzeitig aber auch eine hohe Prozessfähigkeit (Abb. 2-13). ORMOCER[®] kann in einem organischen Lösungsmittel gelöst und aufgeschleudert werden. Wegen des Silanprecursors besitzt ORMOCER[®] eine gute Haftung auf verschiedenen

Substraten. Die Dämpfung für monomodige Wellenleiter liegt zwischen 0,5-0,6 dB/cm bei 1,55 μm [Stre02].

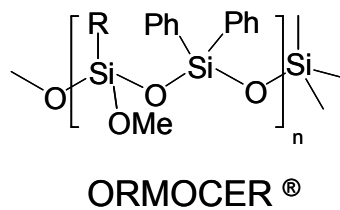


Abb. 2-13 Molekularstruktur von ORMOCER®.

Eine weitere Variante der fotochemischen Strukturierung ist das Fotobleaching. Beim Fotobleaching wird die aufgetragene Schicht, die fotosensitives, farbstoffdotiertes Material enthält, durch eine Maske belichtet. In den bestrahlten Bereichen wird durch fotochemische Prozesse die Brechzahl des Materials abgesenkt. Die nicht bestrahlten Bereiche können somit als Wellenleiter genutzt werden [Roch89], [Horn93]. Dabei werden oft nichtlineare optische Polymere eingesetzt, um aktive optische Bauelemente herzustellen, z.B. 4-Dimethylamino-4'-Nitrostilben (DANS) [Diem90], [Van91], [Jäg96]. Die für die nichtlinearen Eigenschaften verantwortlichen Farbstoffe sind entweder über sogenannte Spacer direkt an die Polymerhauptkette gebunden (side-chain polymers), oder in der Polymermatrix gelöst (guest-host polymers) [Tom99]. Wellenleiter wurden auf Basis dieser Technologie hergestellt und die Wellenleiterdämpfungen betragen 0,1 dB/cm bei 1305 nm und 0,15 dB/cm bei 1565 nm [Diem95]. Durch Fotobleaching wurden z.B. Modulatoren, Mach-Zehnder-Interferometer und elektrooptische Schalter hergestellt [Möhl94]. Beispielsweise wurden aus Urethan-Urea Copolymeren TE modenselektive polymere Wellenleiter hergestellt [Wata97].

2.3 Polymere Wellenleiter durch UV-Bestrahlung

2.3.1 Wellenleiterherstellung aus PMMA durch UV-induzierte Brechzahländerung

Die Forderung nach einer Massenproduktion mit daraus resultierendem günstigem Preis ergibt sich auch bei der Herstellung von Wellenleiterbauelemente für Anwendung in der Sensorik und insbesondere in der Telekommunikation. Dafür bedarf es nicht nur kostengünstiger Materialien, sondern auch kostengünstiger und zuverlässiger Herstellungsmethoden. Bei den bisher beschriebenen konventionellen Herstellungsmethoden für polymere Wellenleiter sind mehrere Prozessschritte für die Fertigung notwendig. Außerdem ergibt sich bei den ablativen Prozessen und der Abformung eine erhöhte Rauheit der Seitenwände aufgrund des Ätz- und Entwicklungsprozess bzw. bei der Herstellung des Formeinsatzes. Dies führt zu zusätzlichen optischen Verlusten.

Neben den bisher dargestellten Technologien können die dielektrischen Eigenschaften einer Polymeroberfläche auch durch ionisierende Strahlung verändert werden [Kota79], [Frank92], [Schö95]. Die Strahlung verursacht hierbei eine lokale Brechzahlerhöhung, so dass Bereiche

entstehen, in denen optische Strahlung geführt wird. Bei Verwendung von UV-Bestrahlung besteht der große Vorteil, dass dabei nur eine dünne Oberflächenschicht von einigen Mikrometern modifiziert wird und somit nur ein homogenes Substrat, das als Substrat und auch als Wellenleiter fungiert, nötig ist. Keine weiteren Prozesse wie zum Beispiel Entwicklung oder Ätzen sind nötig. Deswegen können bei diesem Prozess die gesamte Prozesszeit und die Kosten für die polymere Wellenleiterherstellung deutlich reduziert werden. In Abb. 2-14 wird die Wellenleiterherstellung durch UV-induzierte Brechzahländerung schematisch dargestellt. Die UV-Strahlung über eine Maske führt in den bestrahlten Bereichen zu einer mit der Tiefe abnehmende Brechzahlerhöhung.

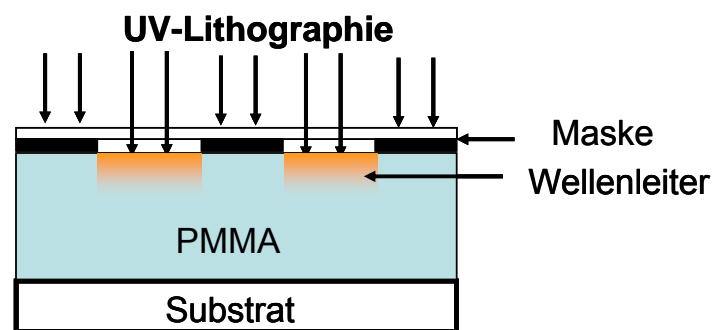


Abb. 2-14 Wellenleiterherstellung durch UV-induzierte Brechzahländerung.

Die Veränderung der dielektrischen Eigenschaften durch ionisierende Strahlung bei Polymethylmethacrylat (PMMA) wurde erstmals in [Toml70] beschrieben. Die Mechanismen, die zu einer chemischen Reaktion führen und somit eine Brechzahlerhöhung hervorrufen, sind abhängig von der Art und Energie der einfallenden Strahlung. In Abb. 2-15 sind die dominierenden Zerfallsreaktionen nach [Choi88] skizziert.

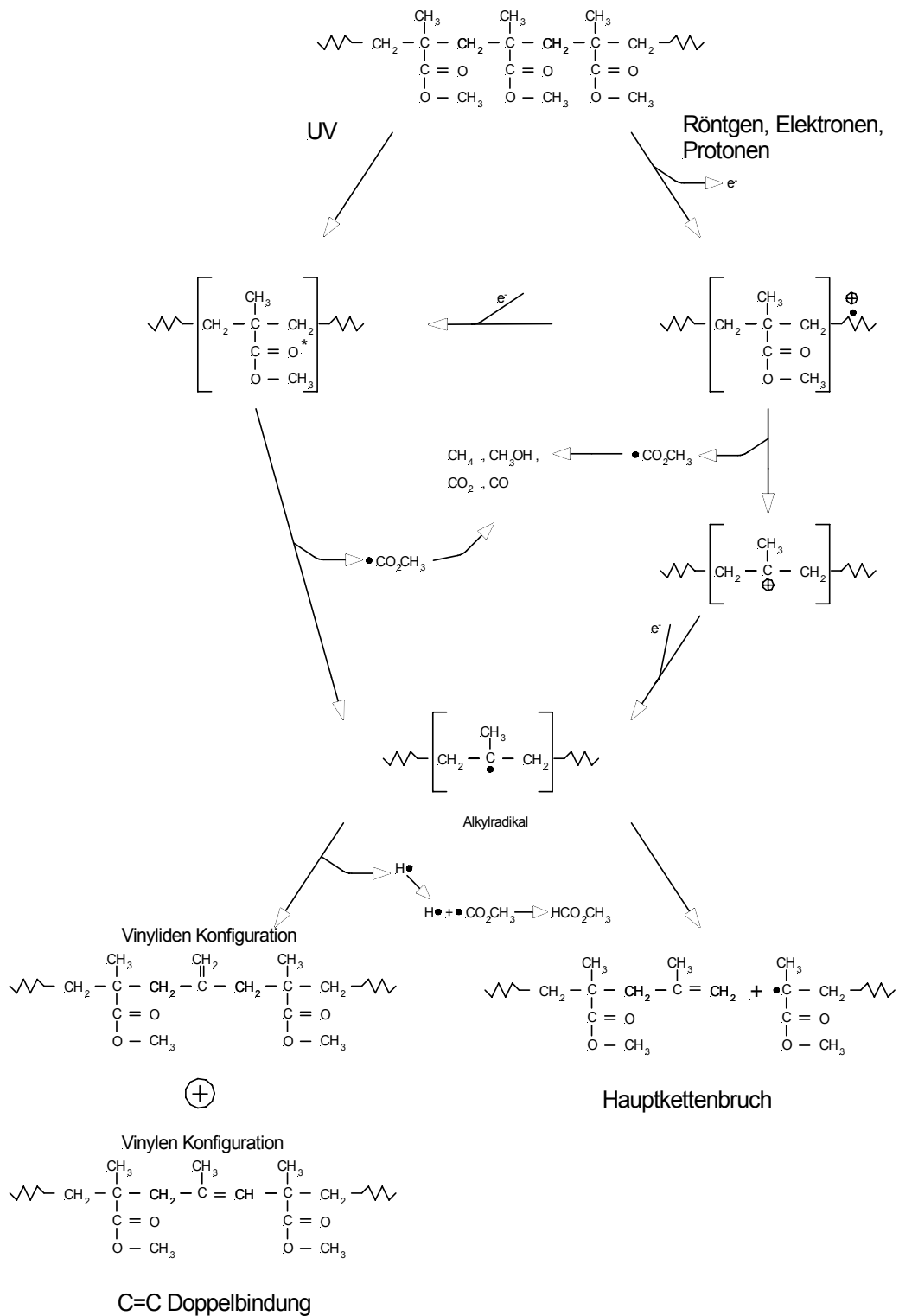


Abb. 2-15 Schematische Darstellung der Zerfallswege von PMMA bei UV-, Röntgen-, Elektronen- und Protonenbestrahlung nach [Choi88].

Der Mechanismus der Fotodegradation wurde mit Hilfe der UV-, IR-Spektroskopie, Elektronenspinresonanz (ESR), Gaschromatographie (GC) und Gaschromatographie-Massenspektroskopie (GC-MS) bestimmt [Todd60], [Gup80]. Hauptgasartige Produkte unter kurzwelliger UV- und Röntgenstrahlung sowie Elektronen- und Protonenbestrahlung waren Methan (CH_4) oder Methylalkohol (CH_3OH), Kohlendioxid (CO_2), Kohlenmonoxid (CO) [Choi88]. Diese entstehen durch die Abspaltung der Esterseitenkette, was zu einer angeregten Hauptkette führt und neue ungesättigte Bindungen entstehen. Bei Hochenergiebestrahlungen wie Röntgen-, Elektronen- und Protonenstrahlung führt dies hauptsächlich zu einem Hauptkettenbruch [Choi88]. Moore *et al.* charakterisierten die Struktur der ungesättigten C=C-Doppelbindungen mit H^1 und C^{13} Kernmagnetische Resonanz (KMR) Spektroskopie [Gup80], [Woch00]. Dabei zeigte sich dass die UV-Bestrahlung zu einer $n \rightarrow \pi^*$ Anregung an der Carbonylgruppe ($>\text{C}=\text{O}$) der Esterseitenkette (-COO-R) führt. Das bei allen Reaktionswegen zurückbleibende Alkyl-Radikal wird entweder durch Wasserstoffabstraktion und Ausbildung einer ungesättigten C=C-Doppelbindung in der Hauptkette oder mittels eines Hauptkettenbruchs abgebaut. Der bei der Bildung der C=C Doppelbindung frei werdende Wasserstoff rekombiniert mit der abgespaltenen Esterseitenkette zu Ameisensäuremethylester (HCO_2CH_3). Das beim Hauptkettenbruch übrig bleibende Radikal kann ebenfalls mit anderen Radikalen zu stabileren Molekülen reagieren. Tab. 2-3 zeigt die Häufigkeit der unterschiedlichen Zerfallsmechanismen von PMMA durch kurzwellige UV-Bestrahlung, Elektronenbestrahlung und Röntgenstrahlen.

	kurzwellige UV	Elektronenstrahlung	Röntgenstrahlen
Spaltung der Methylestergruppe (C=O)*	8,53	2,59	3,68
Hauptkettenbruch (MCS)*	0,22	0,46	1,08
Verhältnis C=O / MCS	38,77	5,63	3,41
Erzeugung der C=C-Doppelbindungen (C=C)*	7,06	2,24	3,72
Verhältnis C=C / MCS	32,1	4,87	3,44

Tab. 2-3: Zerfallsmechanismen von PMMA durch kurzwellige UV-Bestrahlung, Elektronenbestrahlung und Röntgenstrahlen [Choi88] (*Veränderte Bindungen pro 100 Monomereinheiten).

Auch aus der Tabelle ist zu erkennen, dass im Gegensatz zur Röntgenstrahlen und zur Elektronenbestrahlung bei der kurzwelligigen UV-Bestrahlung der Anteil der Spaltung der Methylestergruppe und die Erzeugung der C=C-Doppelbindung deutlich höher ist im Vergleich zum Hauptkettenbruch. Die Bildung der C=C Doppelbindung im PMMA führt zu einer Veränderung der Dichte und der molaren Refraktion [Schö96]. Dies hat eine Brechzahlerhöhung zu Folge und erlaubt damit die Herstellung von Wellenleitern.

Obwohl die polymere Wellenleiterherstellung durch UV-induzierte Brechzahländerung einen großen Vorteil für den Herstellungsprozess besitzt, ist sie (noch) nicht weit verbreitet. Einer der Gründe ist, dass die Materialauswahl sehr begrenzt ist. Aliphatische Polymere wie PMMA und Polyvinylalkohol haben eine größere Brechzahländerung als aromatische Polymere wie Polycarbonat und Polyimid [Kuli88]. Deswegen wurde bisher nur PMMA und Polymethylmethacrylid (PMMI) für die Wellenleiterherstellung durch UV-induzierte Brechzahländerung eingesetzt [Schö95], [Brun96]. Die Struktur dieser Polymere ist in Abb. 2-16 dargestellt.

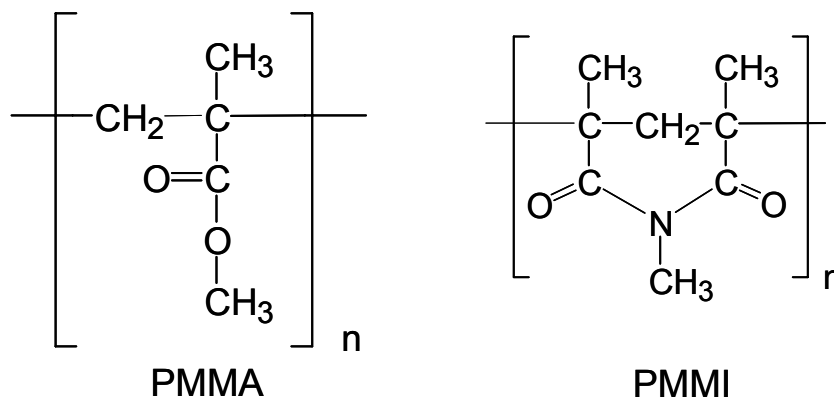


Abb. 2-16 Struktur der für UV-induzierte Brechzahlerhöhung schon eingesetzten Polymere.

PMMI ist aufgrund der Imidgruppe thermisch stabiler als PMMA; es wird deshalb in Anwendungen mit hoher Temperatur eingesetzt.

2.3.2 Materialmodifikation zur Verbesserung der UV-induzierten Brechzahländerung

Das bisher zur Herstellung von Wellenleiter durch UV-Bestrahlung verwendete PMMA hat eine relativ kleine Dämpfung (0,7 dB/cm bei 1550 nm) [Rabus07], aber auch eine relativ hohe Wasserabsorption und die Glasübergangstemperatur ist nicht hoch genug für viele praktische Anwendungen wie z.B. in der Telekommunikation. PMMI hat eine höhere Glasübergangstemperatur (160°C) als PMMA (105°C), aber die Dämpfung ist zu groß (< 2 dB/cm bei 1550 nm). Deswegen sind neue Polymere für diese Wellenleiterherstellungstechnologie erwünscht.

Um sowohl der Forderung nach höherer thermischer Beständigkeit und einer geringen Wasseraufnahme gerecht zu werden als auch eine Änderung der Brechzahl zu ermöglichen,

wurden Polymere ausgesucht, die einerseits eine Struktur aufweisen, die der des PMMA vergleichbar ist und andererseits stabilisierende alizyklische Gruppen enthalten. Abb. 2-17 zeigt die Strukturen von einigen derartigen optischen Polymeren.

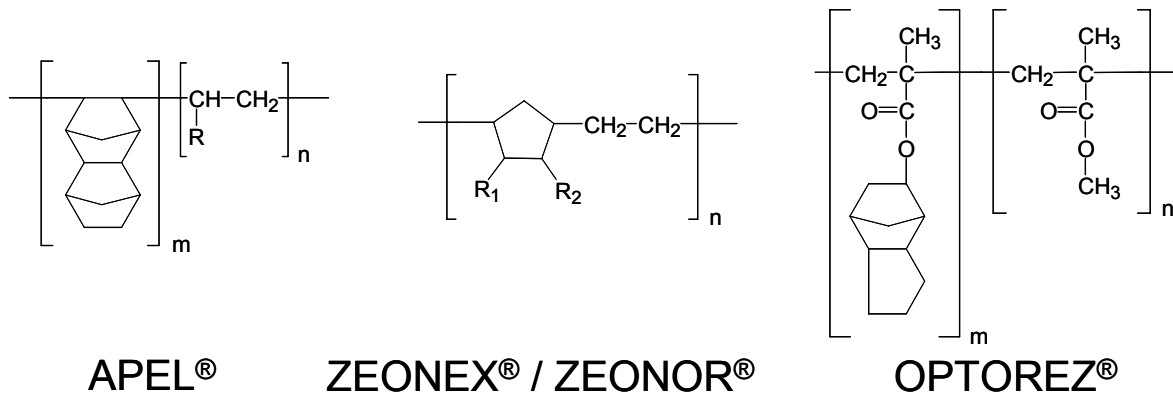


Abb. 2-17 Chemische Strukturen von optischen Polymeren.

Für dieses Polymer mit alizyklischen Ringen werden eine hohe Transparenz im sichtbaren und UV-Bereich und eine niedrige Wasserabsorption erwartet. Außerdem kann die Seitenkette durch kurzwellige UV-Bestrahlung gespalten werden. Damit kann der Brechungsindex verändert werden.

Im Falle von OPTOREZ®, wird erwartete, dass durch die Carbonylgruppe ($>C=O$) bei UV-Bestrahlung die gleich fotochemische Reaktion wie bei PMMA stattfindet. Der modifizierte Teil des Acrylats ist in Abb. 2-18 dargestellt.

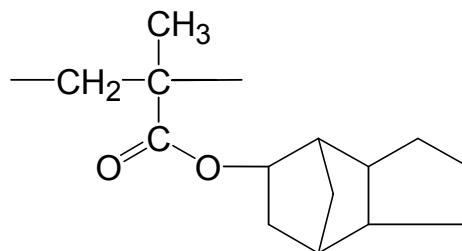


Abb. 2-18 Hauptstruktur des modifizierten Acrylats (OPTOREZ®).

2.4 Optische Verlustmechanismen in polymeren Wellenleitern

Bei der Ausbreitung von Licht in Wellenleitern können Leistungsverluste aufgrund mehrerer Ursachen entstehen. Es können sowohl intrinsische als auch extrinsische Verluste auftreten,

die sich jeweils in Absorption oder Streuung unterteilen lassen. Die Verlustfaktoren in polymerem Wellenleiter wurden in Abb. 2-19 klassifiziert [Take92].

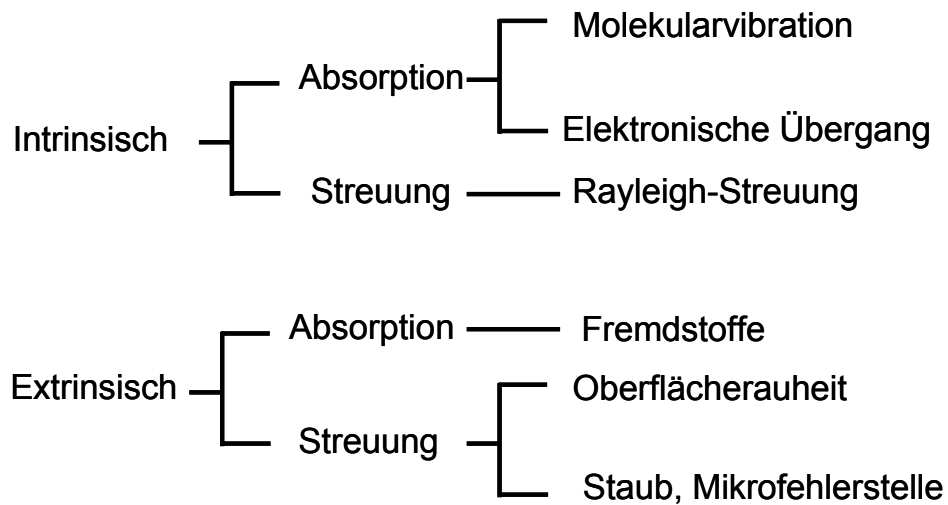


Abb. 2-19 Verlustfaktoren in polymeren Wellenleiter.

2.4.1 Absorption

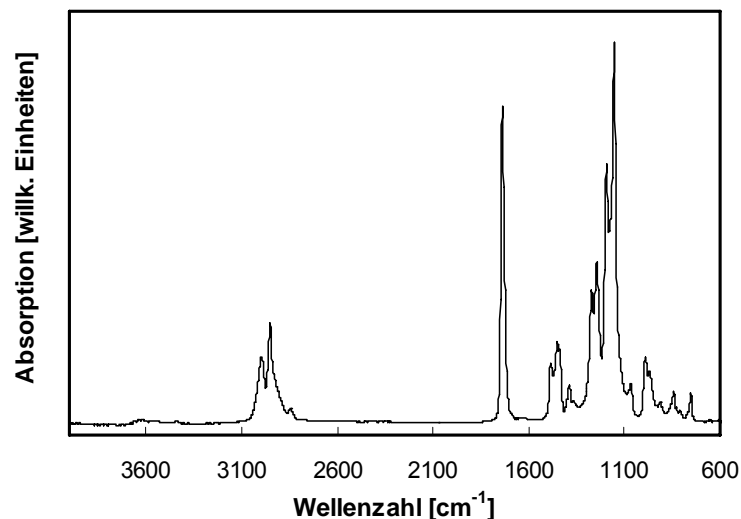
Tritt das elektromagnetische Feld des Lichts mit den Elektronen des Wellenleitermaterials in Wechselwirkungen, so kommt es zur elektronischen Anregung. Zum anderen können atomare bzw. molekulare Schwingungen angeregt werden. Diese Mechanismen sind wellenlängenabhängig und es treten Schwingungsresonanzen auf, bei deren Frequenz eine erhöhte Dämpfung erfolgt. Absorption durch Molekularschwingungen, wie zum Beispiel die Schwingung einer C-H Bindung, spielt die Hauptrolle im nahen Infrarot (NIR). Für Wellenlängen $< 2,8 \mu\text{m}$ treten hauptsächlich Ober- und Kombinationsschwingungen auf. Im UV/VIS-Bereich wird der Einfluss der Molekularvibration deutlich kleiner im Vergleich zum NIR-Bereich [Wer88]. Im UV/VIS-Bereich spielt die Absorption durch elektronische Übergänge die Hauptrolle. Deswegen besitzen hochkonjugierte Polymer mit aromatischem Ringen wie z.B. PC eine große Dämpfung im UV/VIS-Bereich.

In Tab. 2-4 sind typische Absorptionslinien der relevanten Polymere im NIR-Bereich zusammengestellt.

Abb. 2-20 zeigt ein IR-Absorptionsspektrum von ca. $1,8 \mu\text{m}$ dicken PMMA Schichten, die auf einen vergoldeten Siliziumwafer aufgeschleudert wurden (Zuordnung der Absorptionsbanden, siehe Tab. 4-5). Das Absorptionsspektrum wurde aus der Reflexion des Lichts an der vergoldeten Siliziumwaferoberfläche gemessen.

Bindung	Oberschwingung im NIR	Wellenlänge	Intensität
$\nu(\text{CH}_2)$, $\nu(\text{CH}_3)$ aliphatisch	ν_{02} , ν_{03}	1,70 μm , 1,17 μm	stark, stark
$\delta(\text{C-H})$ aliphatisch	$\nu_{02} + \delta$	1,4 μm	stark
$\nu(\text{C-H})$ aromatisch	ν_{02}	1,66 μm	stark
$\nu(\text{C=C-H})$	ν_{02}	1,62 μm	
$\nu(\text{R-OH})$	ν_{03}	1,44 μm	stark
$\delta(\text{OH})$	ν_{04}	1,6 μm	
$\nu(\text{H}_2\text{O})$	ν_{04}	Banden bei 1,45 μm und 1,2 μm ; Ausläufer bei 1,33 μm und 1,55 μm	stark
$\nu(\text{C=O})$	ν_{04} , ν_{05}	1,83 μm , 1,38 μm	mittel, mittel

Tab. 2-4: Absorptionsbanden im NIR nach [Buba93] und [Müll00].


 Abb. 2-20 IR-Absorptionsspektrum von ca. 1,8 μm dicken PMMA Schichten gemessen in Reflexion auf einem vergoldeten Siliziumwafer.

2.4.2 Streuung

Die Streuverluste in Polymeren sind eine Folge der Rayleigh-Streuung an den Molekülen (intrinsisch) oder an Inhomogenitäten (extrinsisch) im Wellenleiter. Der Streuquerschnitt der Rayleigh-Streuung ist proportional zu λ^{-4} , d.h. die Rayleigh-Streuung wird stärker im kurzwelligen UV/VIS-Bereich. Inhomogenitäten können hierbei sehr vielseitige Ursachen haben. Volumeninhomogenitäten können z.B. durch Verunreinigungen mit Partikeln oder durch Einschluss von Gasblasen entstehen. Weiterhin können herstellungsbedingte Brechungsindexinhomogenitäten, durch Schwankungen in der chemischen Zusammensetzung des Materials oder durch innere Spannungen im Material entstehen. Oberflächenstreuung wird durch die Störung der Wellenleitergeometrie verursacht, beispielsweise durch Rauheit der Wellenleiteroberfläche. Diese Streuung an Inhomogenitäten im Wellenleiter oder an dessen Oberfläche tragen durch Abstrahlung zur Dämpfung der geführten Moden bei. Neben den genannten Verlusten treten in gekrümmten Wellenleitern zusätzliche Strahlungsverluste aufgrund der Wellenleiterkrümmung auf.

3 Verfahren zur Herstellung und Charakterisierung der Wellenleiter

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Wellenleiter durch UV-Bestrahlung hergestellt. Wie in Kapitel 2 erläutert erfährt dabei das Polymer eine Änderung seiner chemischen Struktur. Zu deren Charakterisierung wurden spektroskopische Methoden (UV/VIS-, IR-Spektroskopie) herangezogen. Das thermomechanische Verhalten wurde mittels DSC untersucht, um daraus den Einsatzbereich der Wellenleiter feststellen zu können. Die Brechzahländerung bei UV-Bestrahlung wurde mit Hilfe der Modenlinienspektroskopie analysiert. Das Dämpfungsverhalten wurde mit Hilfe der Cut-Back Methode bestimmt und das Abstrahlungsverhalten wurde durch Nahfeldmessung ermittelt.

3.1 Bestrahlung mit kurzwelligem UV-Licht zur Wellenleiterherstellung

Zur Wellenleiterherstellung wird eine Polymerschicht mit UV-Licht bestrahlt, um die Brechzahl zu ändern (siehe Kapitel 2.3). Für die UV-Bestrahlung wurden zwei verschiedene UV-Strahler verwendet. Im ersten Fall handelt es sich um einen kommerziellen UV-Strahler (UVAPRINT CM); er wurde hauptsächlich für die Herstellung der Proben zur Materialuntersuchung eingesetzt. Der zweite ist ein kommerzieller Maskaligner (EVG 620); er wurde hauptsächlich für die Wellenleiterherstellung eingesetzt. Die beiden Bestrahlungsverfahren sind prinzipiell gleich. UVAPRINT hat den Vorteil, dass viele verschiedene Probenvarianten (Größe, Dicke usw.) bestrahlt werden können. EVG 620 hat den Vorteil, dass die Polymerschichten über eine Photomaske mit sehr präziser Ausrichtung bestrahlt werden können. Die Emissionsspektren der Lichtquellen wurden mit einem UV-Spektrometer (USB2000 Miniature Fiber Optic Spectrometer, Ocean Optics) gemessen. Die UV-Intensität wurde mit Hilfe eines UV-Intensitätsmeßgeräts (Model 1000, Karl Suss) bei einer Wellenlänge von 240 nm ermittelt.

3.1.1 Quecksilber-Xenon Hochdrucklampe

Der für die Materialuntersuchung verwendete UV-Strahler UVAPRINT CM (Dr. Hönle GmbH) ist mit einer Quecksilber-Xenon Hochdrucklampe (F-Strahler, Bogenleistung 150 W/cm, Dr. Hönle GmbH) ausgestattet. Abb. 3-1 zeigt die schematische Darstellung der Belichtungsapparatur. Das Licht der Bogenlampe wird mit Hilfe eines parabolischen Reflektors auf einen 45°-Kaltlichtspiegel fokussiert. Dabei wird nur die UV-Strahlung reflektiert, während die IR-Strahlung absorbiert wird und die dabei erzeugte Wärme über ein Kühlsystem abgeführt wird. Die bei 240 nm gemessene Intensität am Ort der Probe (in der Vakuumkammer ohne Suprasilfenster) wurde hierbei zwischen 0 und 2,4 mW/cm² geregelt. Die Homogenität der Intensitätsverteilung über einen 4"-Wafer betrug $\pm 5\%$. Zur Untersuchung des Einfluss der Prozessgasatmosphäre auf die Brechzahländerung wurde die Probe in eine Prozesskammer gebracht, die evakuiert oder mit unterschiedlichen Inertgasen befüllt werden konnte. Als Vakuumfenster diente ein 5 mm dickes Suprasilfenster, (über 92% Lichtdurchlässigkeit bei $\lambda > 200$ nm laut Datentabelle des Herstellers). Der erreichte Enddruck lag bei ca. 10^{-1} mbar. Bei der UV-Bestrahlung mit einer Photomaske fungiert statt dem Surasilfenster die Photomaske als Fenster.

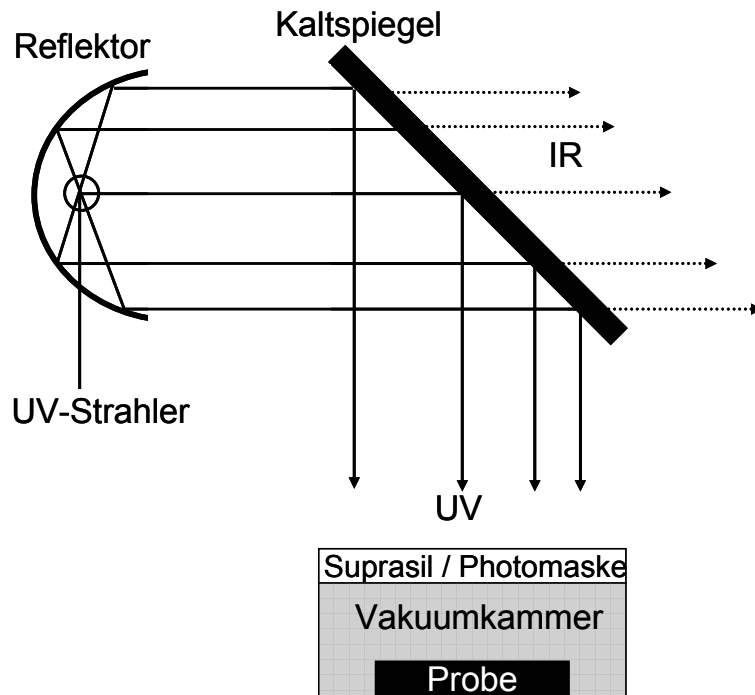


Abb. 3-1 Schematische Darstellung der Belichtungsapparatur mit der Quecksilber-Xenon Hochdrucklampe.

Abb. 3-2 zeigt das Bestrahlungsspektrum der Quecksilber-Xenon Hochdrucklampe (F-Strahler), das am Ort der Probe gemessen wurde. Die Spektrallinien im kurzwelligen Bereich (< 300 nm) haben eine geringere Intensität als die Linien im höherwelligen Bereich.

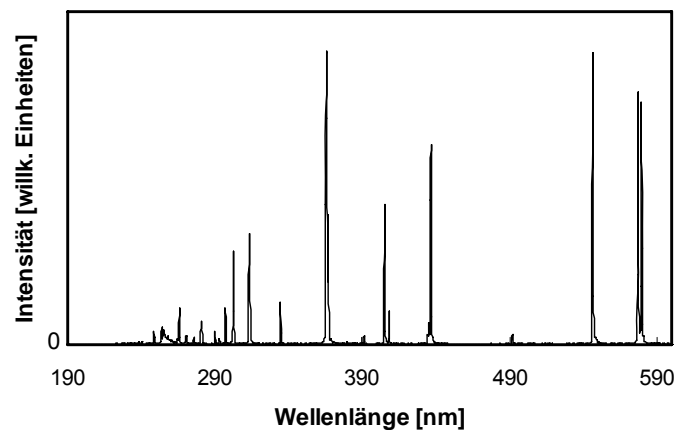


Abb. 3-2 Am Ort der Probe gemessenes Bestrahlungsspektrum der Quecksilber-Xenon Hochdrucklampe (F-Strahler).

3.1.2 Maskaligner

Bei dem für die Wellenleiterherstellung verwendeten Maskaligner handelt es sich um ein kommerzielles Gerät (EVG 620, EV Group) mit Deep UV-Konfiguration. Als Lampe wird eine Quecksilber-Xenon Hochdrucklampe (UXM-501MA, USHIO) im Maskaligner verwendet. Abb. 3-3 zeigt dessen Aufbau [EVG03] und Abb. 3-4 deren Bestrahlungsspektrum, das am Ort der Probe gemessen wurde.

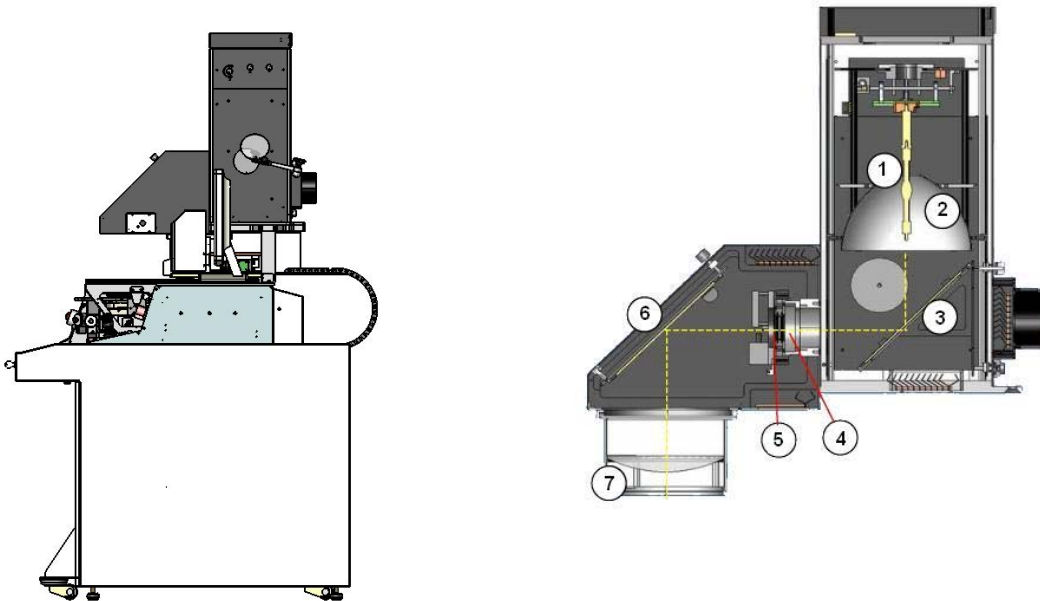


Abb. 3-3 Maskaligner EVG 620 (links: Übersicht, rechts: Lampehaus, 1: Lampe, 2: Elipsoidspiegel, 3: 45°-Dielektrische Filter, 4: Linsenarray, 5: Verschluss, 6: Spiegel, 7: frontale Linse) [EVG03].

Das Licht der Lampe wird mit Hilfe eines Elipsoidspiegels auf einen 45°-dielektrischen Filter fokussiert. Dabei wird nur die UV-Strahlung reflektiert, während die IR-Strahlung absorbiert wird und die dabei erzeugte Wärme über ein Kühlsystem abgeführt wird. Dann wird das Licht durch Linsen auf die Probe geleitet.

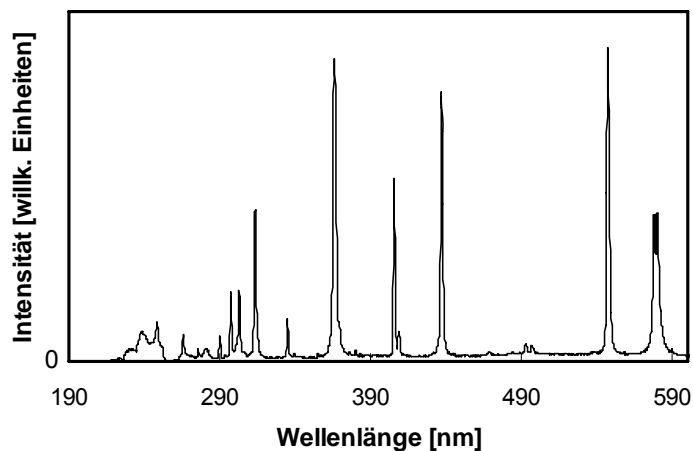


Abb. 3-4 Am Ort der Probe gemessenes Bestrahlungsspektrum der Lampe des Maskaligner EVG 620 (Lampe: UXM-501MA).

Für einen besseren Vergleich der Bestrahlungsspektren der Lampen sind in Abb. 3-5 die Bestrahlungsspektren beider Lampen im kurzwelligen UV-Bereich gegenübergestellt. Es ist zu sehen, dass das Bestrahlungsspektrum der Lampe des Maskaligners EVG 620 insbesondere für Wellenlängen kleiner als 250 nm mehr Intensität als die Quecksilber-Xenon Hochdrucklampe (F-Strahler) des UV-Strahlers UVAPRINT besitzt. Aus diesem Grund wird bei Bestrahlung mit dem Maskaligner EVG 620 eine effizientere Veränderung der chemischen Struktur des Polymeren erwartet.

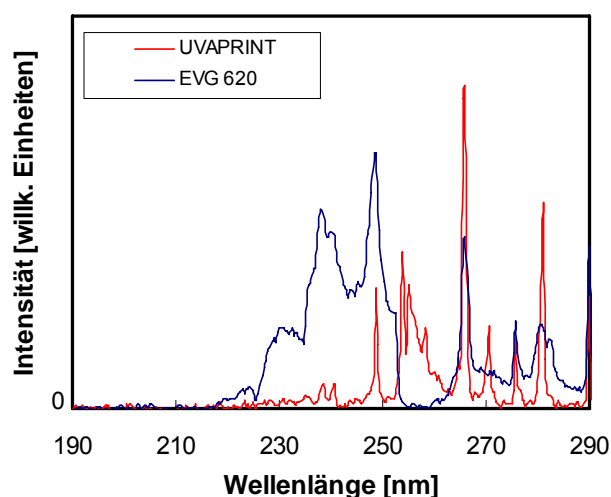


Abb. 3-5 Vergleich der Bestrahlungsspektren gemessen am Ort der Probe im UV-Bereich.

3.2 Methoden zur Bestimmungen des chemischen und thermomechanischen Verhaltens

Dieses Kapitel enthält eine Zusammenfassung der Verfahren, die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt wurden, um die chemische Veränderung der Polymeren als Funktion der Belichtungsbedingungen und deren thermomechanisches Verhalten zu bestimmen.

3.2.1 Optische Spektroskopie

Die Untersuchung der fotolytischen Prozesse in Abhängigkeit äußerer Bedingungen wurde mit Hilfe spektroskopischer Methoden durchgeführt. Die optische Spektroskopie umfasst hierbei den Spektralbereich vom Ultravioletten bis zum Infraroten. Bei der spektroskopischen Charakterisierung werden die charakteristischen Absorptionsbanden der fotochemischen Reaktionsprodukte ermittelt. Dadurch können Stoffgruppen durch direkten Vergleich mit Referenztabellen, die die ungefähre Lage der funktionellen Gruppen enthalten, identifiziert werden. Eine ausführliche Beschreibung spektroskopischer Methoden in der organischen Chemie ist in entsprechender Fachliteratur zu finden [Humm91], [Schm00], [Günz02], [Hesse02]. Abhängig von der Wellenlänge unterscheidet man die IR- und die UV/VIS-Spektroskopie.

IR-Spektroskopie

Die für die Strukturaufklärung von Polymeren besonders nützlichen Absorptionsbanden liegen im mittleren infrarot Bereich von 2,5 μm bis 25 μm . Dies entspricht einer Wellenzahl von: 4000 cm^{-1} bis 400 cm^{-1} , was üblicherweise in der Spektroskopie angegeben wird. Hierbei gilt für die Wellenzahl ν :

$$\nu (\text{cm}^{-1}) = \frac{10^4}{\lambda (\mu\text{m})} \quad (3.1)$$

Für die Spektreninterpretation sind vor allem solche Schwingungen nützlich, die sich in erster Näherung auf Einzelbindungen oder funktionelle Gruppen eines Moleküls beschränken, d.h. es handelt sich um speziell im Molekül lokalisierte Schwingungen. Auswahlregeln und Kennzeichnung der lokalisierten Schwingungen können aus der Literatur entnommen werden (Bsp. [Hesse02]). Unterhalb 1500 cm^{-1} treten Gerüst-, Ober- und Kombinationsschwingungen auf, die aufgrund von Überschneidungen eine Zuordnung erschweren. Ein IR-Spektrum besteht somit aus zwei großen Bereichen: Oberhalb 1500 cm^{-1} können die Absorptionsbanden den einzelnen funktionellen Gruppen zugeordnet werden, während der Bereich unterhalb 1500 cm^{-1} viele Banden enthält und das Molekül als ganzes charakterisiert. Dieser Bereich wird als „fingerprint“-Region bezeichnet. Für die Aufnahme der Spektren wurde ein FTIR-Spektrometer (Bruker IFS 48V) verwendet.

UV/VIS-Spektroskopie

Die UV/VIS-Spektroskopie ist ein Verfahren der optischen Spektroskopie, das auf der spezifischen Absorption von ultravioletter Strahlung durch UV-aktive Moleküle beruht. Die Wechselwirkung zwischen elektromagnetischen Wellen und Molekülen führt bei Absorption

im Bereich des ultravioletten und sichtbaren Lichts zur Anregung von Elektronen, im allgemeinen Valenz-Elektronen. Fällt ein Lichtstrahl der Intensität I_0 auf ein homogenes, isotropes Medium der Schichtdicke d , dann kann er abgesehen von Reflexions- und Streuverlusten durch Absorption geschwächt werden. Das Lambert-Beer-Gesetz beschreibt die Extinktion E (optische Dichte, absorbance) der Strahlung (I : Intensität des austretenden Licht, ϵ : molarer Extinktionskoeffizient, c : Konzentration).

$$E = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon \cdot c \cdot d \quad (3.2)$$

Bestimmt man nach dem Lambert-Beer-Gesetz für alle Wellenlängen λ die Extinktion und daraus die substanzspezifische Größe ϵ , so erhält man die Absorptionskurve und damit das UV-bzw. UV/VIS-Spektrum. Aufgrund der Energiebreite der elektronischen Niveaus der Moleküle ist es ein Banden-Spektrum. Die Lage der Absorptionsbanden hängt von der Natur des Elektronen-Übergangs ab. Die einzelnen Banden werden durch ihre Eigenschaften Lage, Intensität, Gestalt und Feinstruktur charakterisiert. Von besonderer Bedeutung für die UV/VIS-Spektroskopie sind konjugierte Chromophore. Eine Veränderung der Spektren ergibt sich durch die Änderung der konjugierten Systeme in Moleküle. Für die UV/VIS-Spektroskopie wurde ein UV/VIS-Spektrometer der Firma Perkin Elmer (Lambda 2) verwendet. Dieses deckt einen Wellenlängenbereich von 190-1100 nm ab.

3.2.2 Weitere Methoden

DSC (Differential Scanning Calorimetry)

Die DSC (Differential Scanning Calorimetry) ist eine kalorimetrische Analysenmethode zur Bestimmung der Temperaturfunktionen von Polymeren, mit deren Hilfe Rückschlüsse auf Phasenumwandlungen sowie auf die Stabilität/Reaktivität von Verbindungen gezogen werden können. Die DSC arbeitet nach folgendem Prinzip: In einem Ofen befinden sich zwei symmetrisch angeordnete Halterungen, von denen die eine die zu untersuchende Probe, die andere eine Vergleichssubstanz enthält. Letztere zeigt im zu untersuchenden Temperatur-Bereich keine thermische Reaktion. Die Temperatur der Probe oder die der Vergleichssubstanz sowie die Temperaturdifferenz zwischen beiden werden mit Thermoelementen gemessen und ihr zeitlicher Verlauf registriert. Wenn in der Probe eine exotherme oder endotherme Reaktion auftritt, ist dies in einer Temperaturdifferenz zwischen Vergleichssubstanz und Probe zu beobachten. Somit ermöglicht sie in der vorliegenden Arbeit die Veränderung des thermomechanischen Verhaltens, die durch fotoinduzierte chemische Umwandlung entsteht, zu analysieren [Merm04]. Damit ist eine einfache Abschätzung des Einsatzbereiches der UV-induzierten Wellenleiter möglich. Die Messungen wurden mit einem DSC-Gerät der Firma Netsch Gerätebau (DSC-204 Phoenix) durchgeführt.

3.3 Optische Messtechnik

Dieses Kapitel enthält eine Zusammenfassung grundlegender Verfahren zur optischen Charakterisierung der Wellenleiter, die in dieser Arbeit verwendet wurden. Die

Charakterisierung zielt auf die Erfassung der wesentlichen Parameter wie Brechungsindex, Nahfeldverteilung und Dämpfung ab.

3.3.1 Modenlinienspektroskopie

Zur gezielten reproduzierbaren Herstellung der Wellenleiter ist die genaue Kenntnis der Brechzahlverteilung sowie deren Abhängigkeit von Herstellungsparametern von fundamentaler Bedeutung. Es gibt verschiedene Verfahren, Brechzahlprofile zu bestimmen. Die Methoden der Dünnschliff-Interferometrie, der Reflektivitätsabtastung oder die Ableitung des Brechzahlprofils aus Messung der Feldverteilung geführter oder nicht geführter Strahlen (refracted near field) sind jedoch sehr präparationsaufwendig und prinzipbedingt recht ungenau [Unge93].

Eine dagegen technisch einfach zu realisierende Methode für die Bestimmung eindimensionaler Brechzahlprofile, die sowohl die geforderte Tiefenauflösung als auch die Nachweisempfindlichkeit zur Analyse von Bauelemente der integrierten Optik erfüllt, ist die Modenlinienspektroskopie [Ulr73], [Unge93]. Mit der Modenlinienspektroskopie können die Ausbreitungsrichtungen geführter Moden und deren dazugehörige effektive Brechzahl N_{eff} bestimmt werden. Das Verfahren beruht auf dem Auskoppeln von geführten Wellenleitermoden an einem Prisma. Die Anordnung zur Prismenkopplung ist in Abb. 3-6 skizziert. Divergentes Licht eines Laserstrahls wird in den Wellenleiter eingekoppelt so dass im Wellenleiter sämtliche ausbreitungsfähigen Moden angeregt werden. Auf den Filmwellenleiter wird das Prisma gedrückt, wobei der Andruck den Koppelspalt lokal verengen soll, um einen hinreichenden Kopplungswirkungsgrad zu erzielen. Aufgrund der Tatsache, dass der Brechungsindex zwischen Filmwellenleiter und Prisma sehr klein ist, werden die geführten Moden über das auftretende starke evaneszente Feld ausgekoppelt. Sie treffen die Prismenfläche entsprechend ihres Ausbreitungswinkels im Filmwellenleiter. Mit Hilfe eines Beobachtungsfernrohres wird das ausgetretene Licht analysiert. Das beobachtete Streifenmuster gibt die unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen der Moden im Filmwellenleiter wieder.

Da die transversale Feldverteilung außerhalb des Filmwellenleiters exponentiell abklingt, beträgt die Informationstiefe dieser Messmethode für Wellenlängen im NIR nur wenige Mikrometer. Für Filme mit vergrabenen Profile ist die Modenlinienspektroskopie somit normalerweise unbrauchbar, da die evaneszenten Felder an der Oberfläche des Substrates zum Prisma hin so schwach sind, dass an der Seitenfläche des Prismas keine Intensität gemessen werden kann.

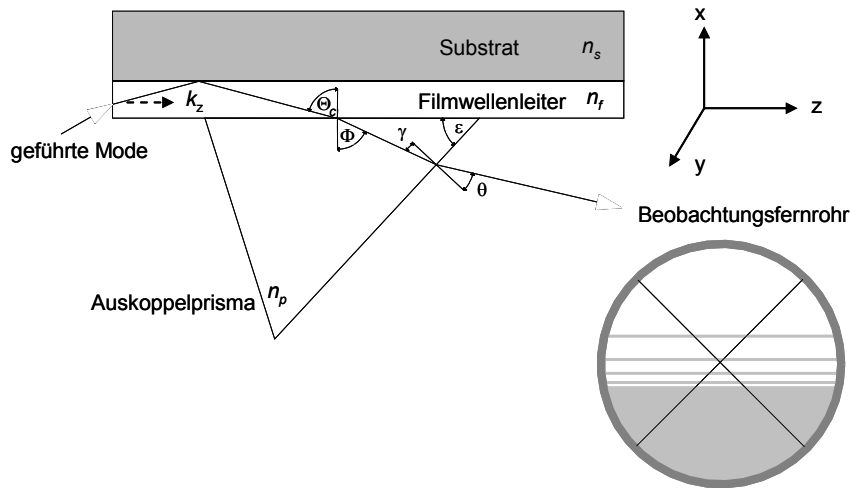


Abb. 3-6 Schematische Darstellung des Strahlengangs bei der Modenauskopplung an einem Prisma und Bild der Modenlinien und Substratübergang (Kontinuum) im Okular des Abbe-Refraktometers.

Im Falle einer Auskopplung der geführten Moden sind die Komponenten $k_p = n_p k_0 \sin \Phi$ der Wellenvektoren parallel zu den Grenzflächen im Prisma (k_{pz}) und im Wellenleiter k_z (Abb. 2.1) gleich. Bei einer Brechzahl n_p des Prismas ergibt sich für eine Lichtwelle mit der Wellenzahl parallel zur Grenzfläche ergibt sich damit zwangsläufig für den Austrittswinkel Φ (siehe Abb. 3-6):

$$k_z = k_{pz} = n_p k_0 \sin \Phi \quad \Rightarrow \quad \Phi = \arcsin \left(\frac{k_z}{n_p k_0} \right) \quad (3.3)$$

Für die effektive Brechzahl und den Austrittswinkel θ (siehe Abb. 3-6) erhält man folgende Beziehung:

$$N_{eff} = n_p \sin \left[\varepsilon + \arcsin \left(\frac{\sin \theta}{n_p} \right) \right] \quad (3.4)$$

Somit können bei Kenntnis des Austrittswinkels θ und des Prismenwinkels ε die effektiven Brechzahlen bestimmt werden [Kers75].

Die Messung des Modenaustrittswinkels erfolgte mit einem kommerziellen Abbe-Refraktometer (Abbe-Refraktometer A, Carl Zeiss). Dabei werden die Austrittswinkel der einzelnen ausgekoppelten Modenlinien über das Beobachtungsfernrohr des Refraktometers bestimmt. Für Messungen im NIR wurde das Refraktometer mit zwei Diodenlasern mit einer Wellenlänge von 1310 nm und 1550 nm und einem Vidicon erweitert. Die Kalibrierung erfolgte für den NIR-Bereich unter Verwendung von optischen Gläsern mit bekannten Dispersionskurven (BK7, FK5, K10 und Quarz). Im VIS-Bereich konnten Eichkurven des Herstellers verwendet werden. Da das Bild im Beobachtungsfernrohr bei kohärenter Laserstrahlung starke Granulation durch Interferenzen (Speckel) zeigt, wurde in den Laserstrahl eine schnell rotierenden Streuscheibe eingebracht. Durch die Rotation dieser unregelmäßigen Struktur verändert sich die optische Weglänge bis zur abbildenden Optik mit

so hoher Frequenz, dass sich dem Auge ein gleichmäßig strukturloses Bild bietet, in dem die feinen Modenlinien klar erkennbar sind. Die durch die Streuscheibe veränderte Laserpolarisation wurde anschließend mit einem Polarisationsfilter wieder hergestellt.

Die Messgenauigkeit dieses Verfahrens ist von zwei Faktoren abhängig: Zum einen ist ein systematischer Messfehler zu berücksichtigen, dessen Ursache darin liegt, dass sich durch die Ankopplung des Prismas an die geführte Mode die Ausbreitungskonstante k und damit der Messwert selbst leicht ändert (z.B. durch eine induzierte Krümmung des Filmwellenleiters). Praktisch wird der Fehler klein gehalten, wenn man das Prisma nur schwach andrückt. Für eine Spaltbreite größer $\lambda/2$ zwischen Prisma und Wellenleiter ist dieser Fehler vernachlässigbar [Tien69], [Unge92]. Abgesehen davon wird der Messfehler durch die genaue Bestimmung des Austrittswinkels θ bestimmt und somit durch die Auflösung des Abbe-Refraktometers und der Breite der beobachteten Modenlinien. In diesem Zusammenhang ist ebenfalls eine schwache Kopplung günstig, da mit abnehmendem Spalt zwischen Prisma und Wellenleiter die Linien immer breiter werden. Weiterhin wird die Modenlinienbreite stark von der Oberflächenqualität der Probe und der verwendeten Wellenlänge (bzw. von der spektralen Breite der anregenden Lichtquelle) bestimmt. Die Genauigkeit der Bestimmung der effektiven Brechzahlen der hergestellten UV-induzierten Wellenleiter wird hierbei mit $\pm 1,5 \cdot 10^{-4}$ für 488 nm und 633 nm und $\pm 2,5 \cdot 10^{-4}$ für 1310 nm und 1550 nm abgeschätzt. Für sehr hohe UV-Bestrahlungsdosis-Werte ($> 20 \text{ J/cm}^2$) wurde jedoch immer eine Verbreiterung der Modenlinien beobachtet. Dies wurde auf eine Aufweichung der Polymeroberfläche bei Raumtemperatur zurückgeführt. Durch diesen Effekt verschlechtert sich die Auflösung der Meßmethode drastisch.

3.3.2 Nahfeldmessplatz

Die Kenntnis der Feldverteilung geführter Moden eines optischen Wellenleiters ist für die Ermittlung der Koppelbedingungen und der Justagetoleranzen für Haltestrukturen der Ein- und Auskoppelfasern wichtig. Hierzu wird das vom Wellenleiter abgestrahlte Feld analysiert (Nahfeldmessung). Mit einer Nahfeldmessung kann auch die Monomodigkeit einfach bestimmt werden. Den in dieser Arbeit verwendeten experimentellen Aufbau zur Nahfeldmessung zeigt Abb. 3-7.

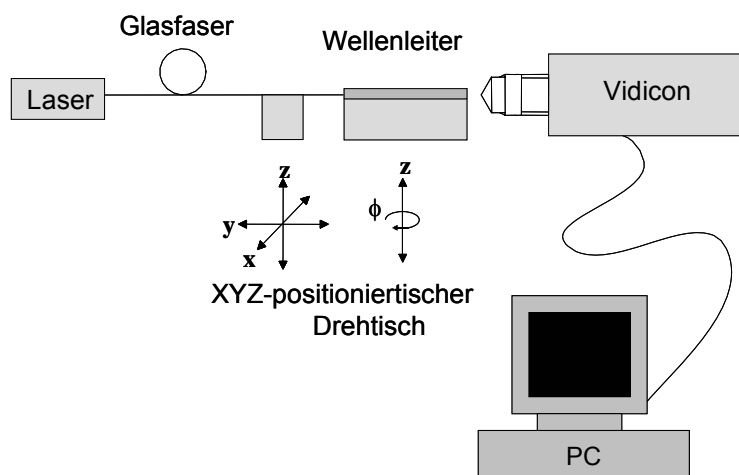


Abb. 3-7 Schematische Darstellung des Messplatzes bei der Nahfeldmessung.

Laserlicht wird über eine monomodige Glasfaser in den zu untersuchenden Wellenleiter eingekoppelt. Gemessen wird die Intensitätsverteilung am Wellenleiterausgang (Nahfeld) mit Hilfe eines Nahfeldmesssystem (Optical Beam Measurement System A4859-01, Hamamatsu Photonics) und einem Laser Beam Profiler (LEPAS-11, Hamamatsu Photonics) mit einer IR-Kamera (Vidicon, Micron Viewer Series 7290, Electrophysics). Durchstimmbare Halbleiterlaser (TSL-210, santec) wurden als Lichtquellen für Messungen bei 1550 nm und Diodenlaser (DL 100 Diode Laser System, TOPTICA Photonics) für Messungen bei 808 nm eingesetzt. Die Vidicon-Röhrenkamera ist speziell auf den infraroten Wellenlängenbereich bis zu einer Wellenlänge von 2,2 μm ausgelegt. Die laterale Auflösung der Röhrenkamera reicht für eine direkte Messung der auftretenden Feldverteilung nicht aus. Deshalb werden zur Vergrößerung Mikroskopobjektive eingesetzt, die eine nahezu aberrationsfreie Abbildung ermöglichen. Für die vollständige und somit auch beugungsfreie Abbildung einer Feldverteilung muss darauf geachtet werden, dass die numerische Apertur des abgestrahlten Feldes wesentlich kleiner ist als die numerische Apertur des verwendeten Objektivs. Die Kalibrierung der Abbildung über ein Mikroskopobjektiv erfolgt anhand der Abbildung eines Kalibriernormals bekannter Linienbreite. Aus den gemessenen Intensitätsverteilungen lassen sich die Modenfeldbreiten und die Anzahl der Moden bestimmen. Abb. 3-8 zeigt beispielhaft zwei gemessene Modenverteilungen bei 407 nm [Holl07].

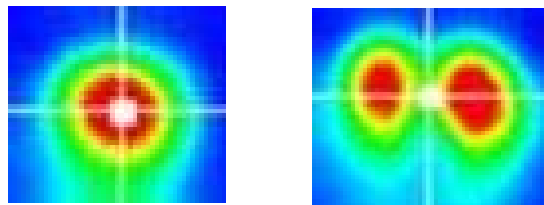


Abb. 3-8 Gemessene Modenverteilungen bei 407 nm (links: Monomode, rechts: Multimode).

3.3.3 Dämpfungsmessplatz

Eine der wichtigsten Kenngrößen integriert optischer Komponenten ist die Einfügedämpfung. Zur Einfügedämpfung zählen sowohl die Ein- und Auskoppeldämpfungen an den Enden des Bauelementes als auch die intrinsische Wellenleiterdämpfung, die sich aus Absorption, Volumen- und Oberflächenstreuung zusammensetzt. Im Hinblick auf die Optimierung der Wellenleiterherstellung und der Geometrie ist insbesondere die intrinsische Wellenleiterdämpfung von Interesse. Die Hauptschwierigkeit bei deren Bestimmung liegt darin, dass die Einkoppelbedingungen reproduzierbar für jede Messung vorgenommen werden müssen. Die exponentielle Abhängigkeit der Einfügedämpfung von der Länge der Wellenleiter ist ein Maß für die Verlässlichkeit dieser Methode. Zur Charakterisierung von Verzweigern sind weiterhin die Bestimmung der Übersprechdämpfung und Uniformität der einzelnen Verzweigerkanäle erforderlich.

Die Einfügedämpfung wird über das Verhältnisse von eingestrahelter zu abgestrahlter optischer Leistung bestimmt. Die intrinsische Dämpfung wird mit Hilfe der sogenannten Cut-

Back Methode ermittelt. Dabei werden unterschiedlich lange Wellenleiter, die mit gleichen Parametern hergestellt wurden, miteinander verglichen.

Abb. 3-9 zeigt den verwendeten Messaufbau. Die gemessenen Dämpfungswerte werden über der Wellenleiterlänge aufgetragen. Aus der Ausgleichgeraden kann die intrinsische Wellenleiterdämpfung ohne Kopplungsverluste bestimmt werden. Extrapoliert man die Ausgleichsgerade bis zum Schnittpunkt mit der Abszisse, so erhält man die Faser-Wellenleiter Koppelverluste.

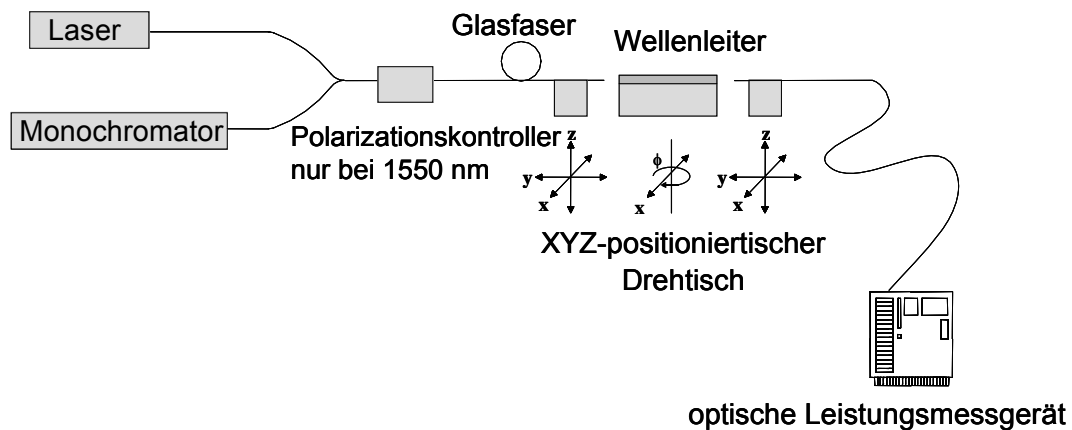


Abb. 3-9 Schematische Darstellung des Dämpfungsmessplatzes.

Licht, das entweder von einem Laser oder einem Monochromator in den zu untersuchenden Wellenleiter mittels einer monomodigen Glasfaser eingekoppelt wird, wird am Wellenleiterausgang in eine zweite monomodige Glasfaser eingekoppelt. Die Intensität in dieser Faser wird mit einem optischen Leistungsmessgerät ermittelt. Als Leistungsmessgerät wurde ein Lightwave Measurement System (Agilent 8164B) und bei der Dämpfungsmessung bei 1550 nm zusätzlich ein Polarisationskontroller (Agilent 11896A) verwendet, um die Dämpfung in Abhängigkeit von der Polarisation bestimmen zu können. Für die Messung bei 808 nm wurde ein Diodenlaser (DL 100 Diode Laser System, TOPTICA Photonics) eingesetzt. Aufgrund der Länge der hier verwendeten Wellenleiter von mehreren Zentimetern ist Streulicht, das den Detektor trifft bzw. in die Ausgangsfaser eingekoppelt wird, zu vernachlässigen.

Bei der praktischen Messung wird zunächst der Referenzwert bei Stosskopplung der beiden Glasfasern aufgenommen. Dieser Wert, der die Faserverluste wiedergibt, wird von den Messwerten, die mit den Wellenleitern ermittelt wurden, subtrahiert. Diese Differenz dieser ergibt dann nur die Einfügedämpfung der integrierten optischen Komponente. Sowohl bei der Referenz als auch bei der Messung mit Wellenleiter wurde Indexmatchingöl verwendet.

4 Materialuntersuchungen

In Kapitel 2 wurden alternative Polymere identifiziert, die auf Grund ihres molekularen Aufbaus ähnliche Eigenschaften hinsichtlich der UV-Bestrahlung wie PMMA erwarten lassen, die aber bessere thermomechanische Eigenschaften und eine geringere Wasseraufnahme als PMMA haben sollten. Da aromatische Polymere im UV/VIS-Bereich eine hohe Dämpfung aufweisen, werden nur aliphatische Polymere in den folgenden Untersuchungen näher betrachtet. Aufgrund ihrer geringen Absorption wird erwartet, dass damit verlustarme Wellenleiter im sowohl im IR- als auch im UV/VIS-Bereich hergestellt werden können. Als Referenz wird PMMA (HESA[®]-GLAS VOS mit 500 µm Dicke, Notz Plastics) oder der PMMA Resist (AR-P 671.09, 950K, mit 9 Gew.% PMMA) der Firma AllResist in den Untersuchungen mit analysiert.

Zur Prüfung der Eignung der ausgewählten Materialien wird untersucht, wie sich die Brechzahl bei UV-Bestrahlung ändert. Zum Verständnis der dabei auftretenden chemischen Veränderungen werden spektroskopische Analysen durchgeführt. Die thermomechanischen Eigenschaften werden mit Hilfe der DSC ermittelt. Im Hinblick auf eine Anwendung der zu realisierenden Wellenleiter als Bestandteil von biophotonischen Sensoren wird zusätzlich untersucht, wie Zellen auf den Wellenleitern immobilisiert werden können.

4.1 Materialeigenschaften

Tab. 4-1 zeigt die Liste der im Hinblick auf die Eignung zur Herstellung von polymeren Wellenleitern untersuchten Polymeren. Tab. 4-2 und Tab. 4-3 zeigen die Materialeigenschaften aus dem Datenblatt des Herstellers. Die chemische Struktur wurde schon in Abb. 2-17 dargestellt.

Produktname	Struktur	Urform	Hersteller
OPTOREZ [®]	Alizyklische Methacrylat Copolymer	Granulat	Hitachi Chemical
APEL [®]	Ethylentetracyclododecen Copolymer	Granulat	Mitsui Chemical
ZEONEX [®]	Cycloolefinpolymer	Granulat	Zeon
ZEONOR [®]	Cycloolefinpolymer	Folie	Zeon
HESA [®] -GLAS	Polymethylmethacrylat	Folie	Notz Plastics

Tab. 4-1: Untersuchten Polymere.

Produktname	OZ-1000	OZ-1100	OZ-1310	OZ-1330
Hersteller	Hitachi Chemical			
T _g [°C]	115	120	130	110
Brechungsindex	1,4996	1,5025	1,5059	1,5096
Wasserabsorption [%]	1,2	1,2	1,2	1,2

Tab. 4-2: Materialeigenschaften der Polymere der OPTOREZ[®] Serien (Alle Werte sind aus dem Datenblatt des Herstellers entnommen).

Produktname	APL5014DP	ZEONEX [®] 480R	ZEONOR [®] ZF14	HESA [®] - GLAS
Hersteller	Mitsui Chemical	Zeon	Zeon	Notz Plastics
T _g [°C]	135	138	136	105*
Brechungsindex	1,54	1,525	1,53	1,492
Wasserabsorption [%]	<0,01	<0,01	<0,01	2,2*

Tab. 4-3: Materialeigenschaften des untersuchten Polymere (*[Bäum05], ansonsten aus dem Datenblatt des Herstellers entnommen).

Die Polymere der OPTOREZ[®] Serie sind ein Produkt der Firma Hitachi Chemical. Es handelt sich dabei um Copolymere aus alizyklischem Methacrylat und Methylmethacrylat. Für die verschiedenen Polymersorten der Serie ist das Copolymerisations-Verhältnis unterschiedlich.

APL5014DP wird von der Firma Mitsui Chemical vertrieben. In diesem Fall handelt es sich um ein Copolymer aus Tetracyclododecen und modifiziertem Ethylen. Aufgrund des Tetracyclododecen ist mit einer höheren mechanischen Stabilität zu rechnen.

ZEONEX® und ZEONOR® sind Produkte der Firma Zeon. In diesem Fall ist eine Cycloolefingruppe direkt in die Ethylenkette eingebaut.

4.2 Brechungsindexmodifizierung durch Bestrahlung mit kurzwelligem UV-Licht

Alle verwendeten Polymere außer ZEONOR® sind als Granulat erhältlich. Deshalb wurden für die Untersuchung der Brechzahländerung durch UV-Bestrahlung zuerst Folien durch Heißprägen (HEX03, Jenoptik) hergestellt. In einem ersten Schritt wurde das Granulat zwischen Edelstahlplatten zu einer Folie verpresst. Je 9 g Granulat wurde für eine Folie (Größe: 10 cm X 10 cm, 500 µm Dicke) benutzt. Um die Rauigkeit der Oberfläche zu vermindern, wurden diesen Folien in einem zweiten Schritt bei gleicher Temperatur zwischen Kaptonfolien nochmals gepresst. Die Umformtemperatur betrug jeweils $T_g + 45^\circ\text{C}$, die Entformtemperatur betrug $T_g - 5^\circ\text{C}$.

Die Brechungsindizes wurden wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben mit Hilfe des Abbe-Refraktometers bestimmt. Die ganzflächige UV-Bestrahlung der Polymerfolien wurde mit der UVAPRINT CM Belichtungsstation (Dr. Hönle GmbH), die mit einer Quecksilber-Xenon Hochdrucklampe (F-Strahler) ausgestattet ist, ausgeführt.

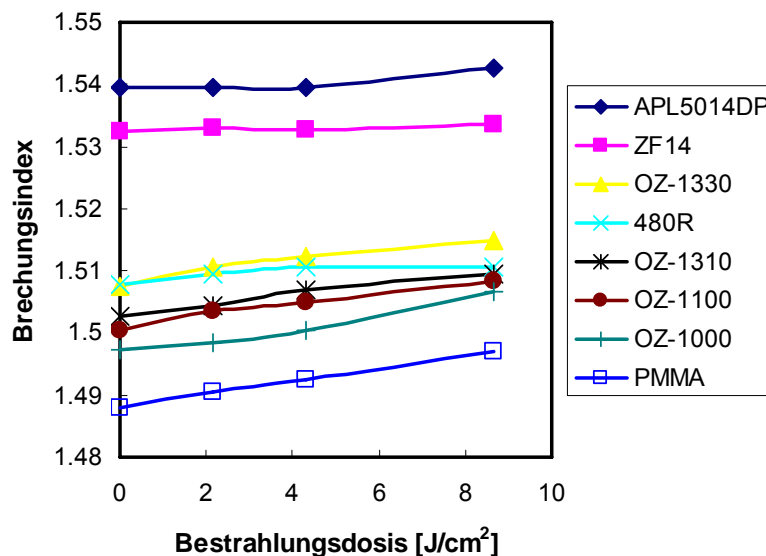


Abb. 4-1 Abhängigkeit von N_{eff} für die untersuchten Polymere von der Bestrahlungsdosis bei einer Wellenlänge von 633 nm.

Die Ergebnisse der Messungen für die verschiedenen Polymere sind in Abb. 4-1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass nur der Brechungsindex der Folien der OPTOREZ® Serie ähnlich wie PMMA ansteigt und sich bei einer Bestrahlungsdosis von ca. 8 J/cm^2 um etwa 0,008 ändert. Die anderen Polymere zeigen eine deutlich geringere bzw. gar keine Änderung des

Brechungsindex, so dass mit diesen Polymeren die Wellenleiterherstellung durch UV-Bestrahlung nicht möglich ist. Weitere Untersuchungen wurden deshalb nur mit den Polymeren der OPTOREZ® Serie gemacht.

4.3 Ergebnisse der spektroskopischen Analyse

Für die UV/VIS-Spektroskopie wurden ca. 0,5 µm dicke Polymerschichten auf Quarzglas aufgeschleudert. Dazu wurde je 1 g des jeweiligen OPTOREZ® Polymer in 10 ml Anisol gelöst und mit einem Belacker (Hamatech) mit einer Drehzahl von 1500 min⁻¹ für 60 Sekunden aufgeschleudert. Als Referenz wurden auch Proben mit dem PMMA E-Beamresist (AllResist AR-P 671.09, 9 Gew.% PMMA 950k) hergestellt. Anschließend wurde das Lösungsmittel durch einen Tempersschritt ausgetrieben (30 min bei 170°C im Umluftofen). Vor dem UV-Bestrahlungsschritt wurde das UV/VIS-Spektrum der Polymerschichten ermittelt. Anschließend wurden die Polymerschichten mit der UVAPRINT CM Belichtungsstation mit unterschiedlichen Dosen unter Vakuum bestrahlt und anschließend das UV/VIS-Spektrum gemessen. Abb. 4-2 und Abb. 4-3 zeigt das UV/VIS-Spektrum der ca. 0,5 µm dicken OPTOREZ® Polymerschichten vor und nach der UV-Bestrahlung [Ichi06a]. Abb. 4-4 zeigt das UV/VIS-Spektrum von ca. 3,2 µm dickem PMMA 950 K nach der UV-Bestrahlung unter Vakuum.

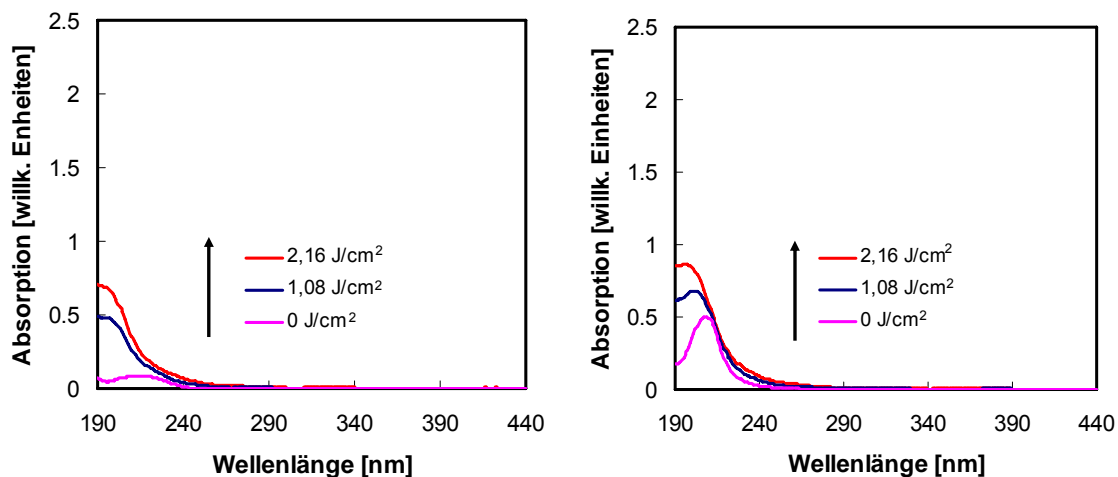


Abb. 4-2 UV/VIS-Spektrum von ca. 0,5 µm dicken OPTOREZ® Polymerschichten nach UV-Bestrahlung unter Vakuum (links: OZ-1000, rechts: OZ-1100).

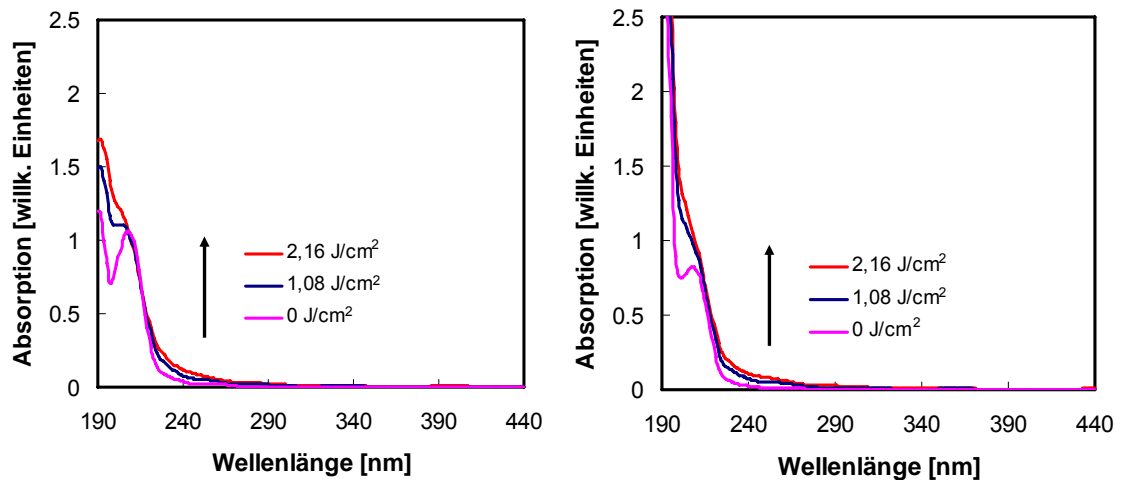


Abb. 4-3 UV/VIS-Spektrum von ca. 0,5 µm dicken OPTOREZ[®] Polymerschichten nach UV-Bestrahlung unter Vakuum (links: OZ-1310, rechts: OZ-1330).

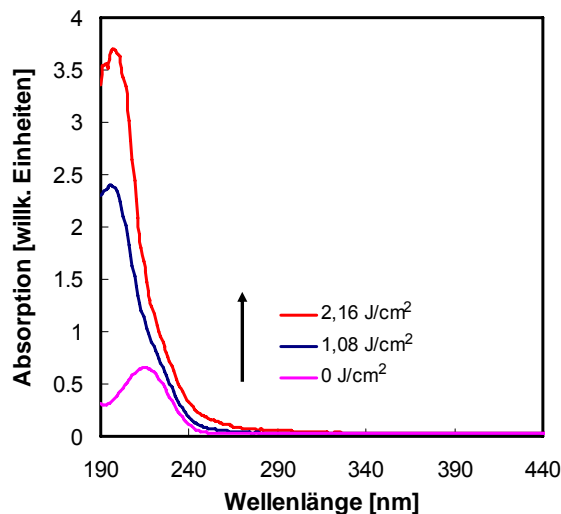


Abb. 4-4 UV/VIS-Spektrum von ca. 3,2 µm dickem PMMA 950K nach UV-Bestrahlung unter Vakuum.

Die ermittelten Absorptionsbanden geben die Anregung eines Elektronenübergangs in dem jeweiligen System an. Eine Klassifizierung der Elektronen-Übergänge lässt sich mit Hilfe der beteiligten Molekül-Orbitale treffen. Aus besetzten bindenden σ - oder π -Orbitalen oder aus den nichtbindenden n -Orbitalen (einsame Elektronenpaare) kann ein Elektron in die leeren, antibindenden π^* - oder σ^* -Orbitale angehoben werden. Entsprechend werden die Elektronen-Übergänge kurz als $\sigma \rightarrow \sigma^*$, $\pi \rightarrow \pi^*$, $n \rightarrow \pi^*$, $n \rightarrow \sigma^*$ usw. bezeichnet (siehe Abb. 4-5).

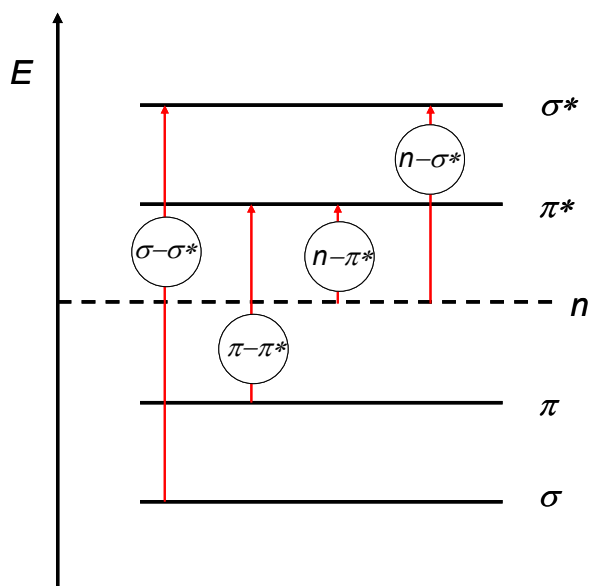


Abb. 4-5 Molekül-Orbitale und Elektronen-Übergänge.

In der Carbonyl-Funktion sind σ -, π -, n -Elektronen mit s -Charakter und n -Elektronen mit p -Charakter enthalten (siehe Abb. 4-6). Die Anregung eines Elektrons kann in die antibindenden π^* -bzw. σ^* -Orbitale erfolgen. Bei gesättigten Aldehyden und Ketonen liegen die erlaubten $n \rightarrow \sigma^*$ - und $\pi \rightarrow \pi^*$ -Anregungen im Vakuum-UV. Der verbotene $n(p) \rightarrow \pi^*$ -Übergang fällt in den Bereich von 275-300 nm. Aber direkt an die CO-Gruppe gebundene Auxochrome wie OH, OR, NH_2 , NHR, NR_2 , Halogen usw. erhöhen als π -Donatoren die Energie des π^* -Orbitals und erniedrigen als σ -Acceptoren das n -Niveau. Daraus resultiert eine kurzweilige Verschiebung der n -, π^* -Übergänge in den Carbonsäuren und ihren Derivaten (siehe Tab. 4-4).

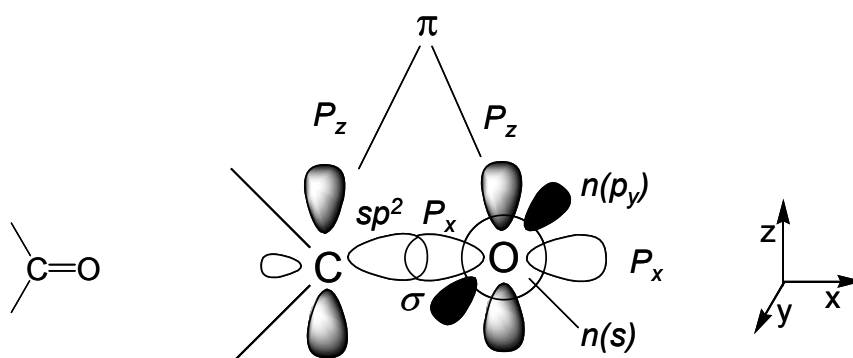


Abb. 4-6 Orbitale in der Carbonylgruppe.

Verbindung	λ_{\max} [nm]	ϵ_{\max}	Lösungsmittel
Aceton	279	15	Hexan
Acetylchlorid	235	53	Hexan
Acetamid	205	160	Methanol
Ethylacetat	207	70	Petrolether
Essigsäure	204	41	Ethanol

Tab. 4-4: n, π^* -Übergänge in gesättigten Carbonyl-Verbindungen [Hesse02].

Das UV/VIS-Spektrum von unbestrahltem PMMA zeigt eine Bande bei etwa 210 nm. Diese lässt sich dem $n \rightarrow \pi^*$ Übergang der Carbonylgruppe ($>C=O$) der Esterseitenkette ($-COO-CH_3$) zuordnen. Durch die UV-Bestrahlung wurde eine neue Bande bei kürzeren Wellenlängen (ca. 195 nm) erzeugt. Diese neue Absorptionsbande ergibt sich aus einem $\pi \rightarrow \pi^*$ Übergang, hervorgerufen durch die Entstehung von ungesättigten $C=C$ -Bindungen. Wegen der wesentlich größeren Intensität dieses $\pi \rightarrow \pi^*$ Übergangs verdeckt er hierbei den $n \rightarrow \pi^*$ Übergang der Carbonylgruppe. Zum Beispiel beträgt im Falle von 3-Hexen ($C_2H_5-CH=CH-C_2H_5$) die Intensität ϵ_{\max} des $\pi \rightarrow \pi^*$ Übergangs 7940 bei 185 nm, wohingegen die Intensität des $n \rightarrow \pi^*$ Übergangs der Carbonylgruppe nur im Bereich von 100 liegt.

Das Spektrum von OPTOREZ[®] OZ-1000 zeigt ohne Bestrahlung eine geringe Intensität in der Bande bei etwa 210 nm, während die Intensität der Bande bei OZ-1100 vergleichbar zu PMMA und für OZ-1310 und OZ-1330 deutlich ausgeprägter ist. Die Intensität in der Bande des $n \rightarrow \pi^*$ Übergangs der Carbonylgruppe ($>C=O$) hängt von dem Atom oder der funktionelle Gruppe neben der Carbonylgruppe ab (Siehe Tab. 4-4). Das heißt, verschiedene Esterseitenketten ($-COO-R$) ergeben verschiedene Absorptionsbanden bei etwa 210 nm. Da OZ-1310 und OZ-1330 die relativ starken Absorptionsbanden bei etwa 210 nm aufweisen, deutet dies darauf hin, dass der Rest R in Esterseitenkette kann ganz anders als bei PMMA ($R=CH_3$) ist. Leider ist die genaue Struktur der verschiedenen OPTOREZ[®] Materialien nicht bekannt. Es ist jedoch bekannt, dass OZ-1310 und OZ-1330 nicht nur alizyklische Ringe enthalten, sondern auch ein weiteres Monomerteil, um die Doppelbrechung zu vermindern [Kawa97]. Es ist davon auszugehen, dass dies die Ursache für die starken Unterschiede der Absorptionsbanden in den verschiedenen OPTOREZ[®] Sorten ist. Dies erklärt auch die starke Zunahme der Bande bei 195 nm mit zunehmender UV-Bestrahlung.

Aus dem Vergleich des UV/VIS-Spektrums zwischen den OPTOREZ[®] Polymeren und PMMA kann gesagt werden, dass die Copolymere der OPTOREZ[®] Serie die gleiche fotochemische Reaktion wie PMMA zeigen. Das heißt, bei der UV-Bestrahlung werden ungesättigten C=C-Bindungen erzeugt.

Um die Fotochemie der Polymere der OPTOREZ[®] Serie ausführlich zu untersuchen, wurde deren Infrarot (IR)-Absorptionsspektrum gemessen. Als Substrat wurden Siliziumwafer, die mit Chrom (10 nm) und Gold (200 nm) beschichtet waren, verwendet. Die Proben wurden genau so hergestellt wie diejenigen für die UV-Spektroskopie. Je 1 g des jeweiligen OPTOREZ[®] Polymer wurde in 10 ml Anisol gelöst und ebenfalls mit einem Belacker (Hamatech) mit einer Drehzahl von 1500 min^{-1} für 60 Sekunden aufgeschleudert. In einem anschließenden Temperschritt wurde das Lösungsmittel ausgetrieben (30 min bei 170°C im Umluftofen). Als Referenz wurden die mit Chrom (10 nm) und Gold (200 nm) beschichteten Siliziumwafer verwendet. Für diese Proben wurde das Infrarot (IR)-Absorptionsspektrum vor der UV-Bestrahlung und nach Bestrahlung mit unterschiedlicher Dosis gemessen. Abb. 4-7 zeigt das IR-Absorptionsspektrum der Polymere der OPTOREZ[®] Serie ohne UV-Bestrahlung.

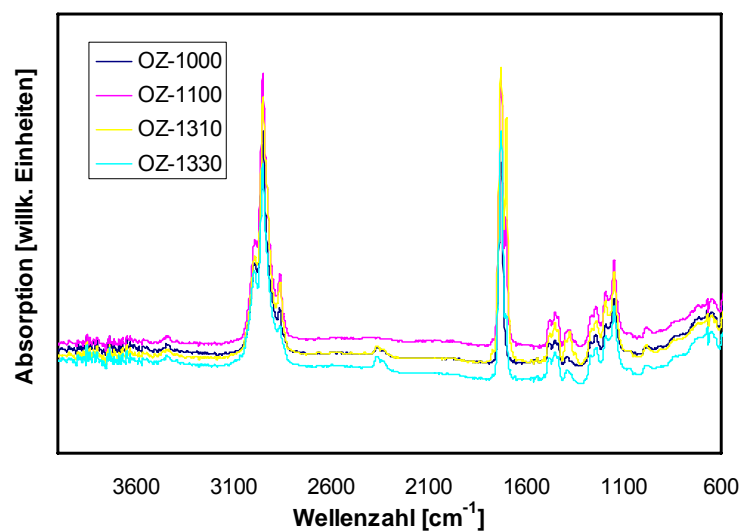


Abb. 4-7 IR-Absorptionsspektrum von ca. $0,5 \mu\text{m}$ dicken Schichten der OPTOREZ[®] Serie gemessen in Reflexion auf einem vergoldeten Siliziumwafer.

Ein IR-Spektrum besteht in der Regel aus zwei großen Bereichen: oberhalb 1500 cm^{-1} befinden sich Absorptionsbanden, die funktionellen Gruppen zugeordnet werden können, während der Bereich unterhalb 1500 cm^{-1} viele Banden enthält und das Molekül als Ganzes charakterisiert. Dieser Bereich wird deshalb als „Fingerprint“-Bereich bezeichnet. Da in diesem Bereich Überschneidungen der einzelnen Banden auftreten, ist die Zuordnung von lokalisierten Schwingungen unterhalb 1500 cm^{-1} erschwert. Gelegentlich haben diese Banden diagnostischen Wert, im Allgemeinen sind sie jedoch von geringem Nutzen [Hesse02]. Deswegen wurden die gemessenen IR-Spektren nur oberhalb 1500 cm^{-1} analysiert.

Im Vergleich zum IR-Absorptionsspektrum von PMMA (Abb. 2-20) weisen die Banden der Polymere der OPTOREZ® Serie eine höhere Intensität zwischen 2960-2850 cm⁻¹ auf. Der Grund hierfür ist der höhere Anteil von C-H-Bindungen dieser Polymere gegenüber PMMA. Tab. 4-5 gibt die Zuordnung der wichtigsten Absorptionsbanden wieder.

Wellenzahl [cm ⁻¹]	Schwingungsform	Gruppe
3000-2800	(C-H)-Valenzschwingung $\nu_{s, as}$	(OCH ₃), (CH ₂), (CH ₃)
1739	(C=O)-Valenzschwingung	(C=O) der Estergruppe
1500-1350	(C-H)-Deformationsschwingung $\delta_{s, as}$	(CH ₃), (CH ₂)
1263, 1243, 1193, 1153	(C-O)-Deformationsschwingung	(OCH ₃) der Estergruppe
1300-600	Fingerprintbereich	

Tab. 4-5: Zuordnung der wichtigsten Absorptionsbanden bei Polymethylmethacrylat nach [Humm91] und [Colo01].

Abb. 4-8 bis Abb. 4-11 zeigen das IR-Absorptionsspektrum der ca. 0,5 µm dicken OPTOREZ® Polymerschichten nach der UV-Bestrahlung unter Vakuum mit unterschiedlichen Dosen.

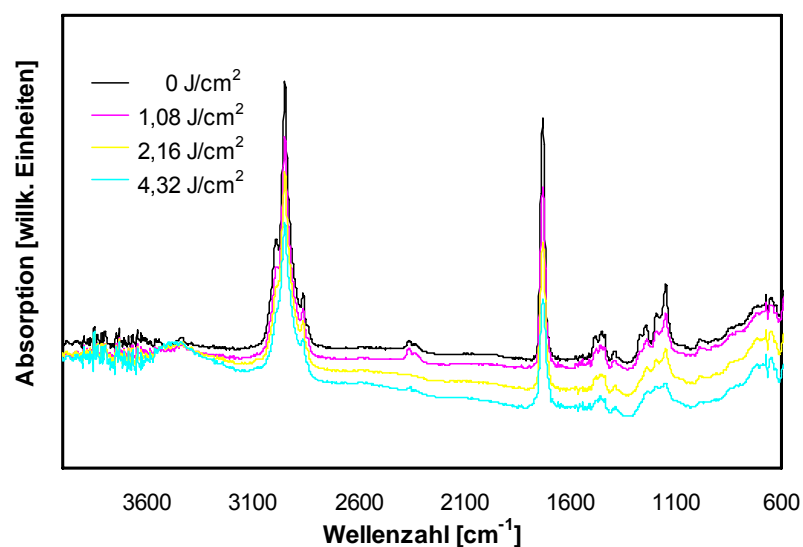


Abb. 4-8 IR-Absorptionsspektrum einer 0,5 µm dicken OZ-1000 Schicht nach UV-Bestrahlung unter Vakuum.

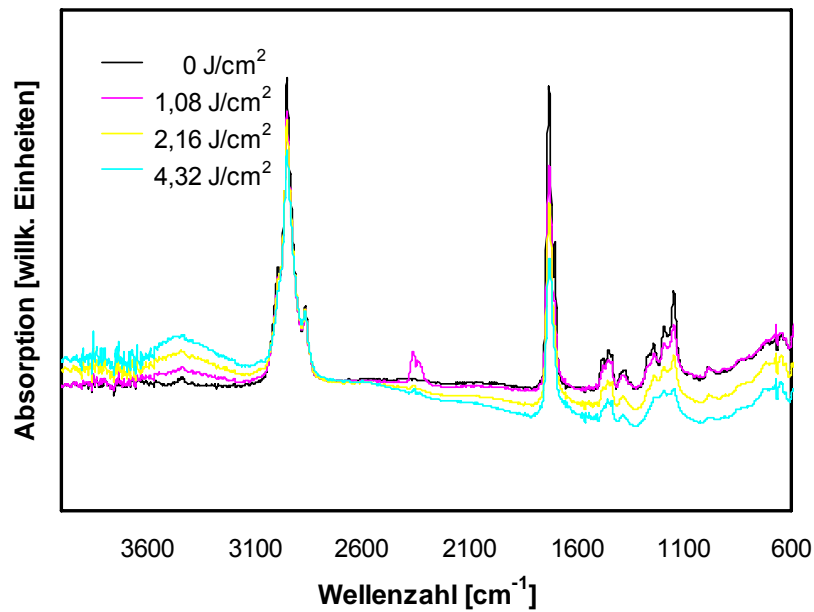


Abb. 4-9 IR-Absorptionsspektrum einer 0,5 µm dicken OZ-1100 Schicht nach UV-Bestrahlung unter Vakuum.

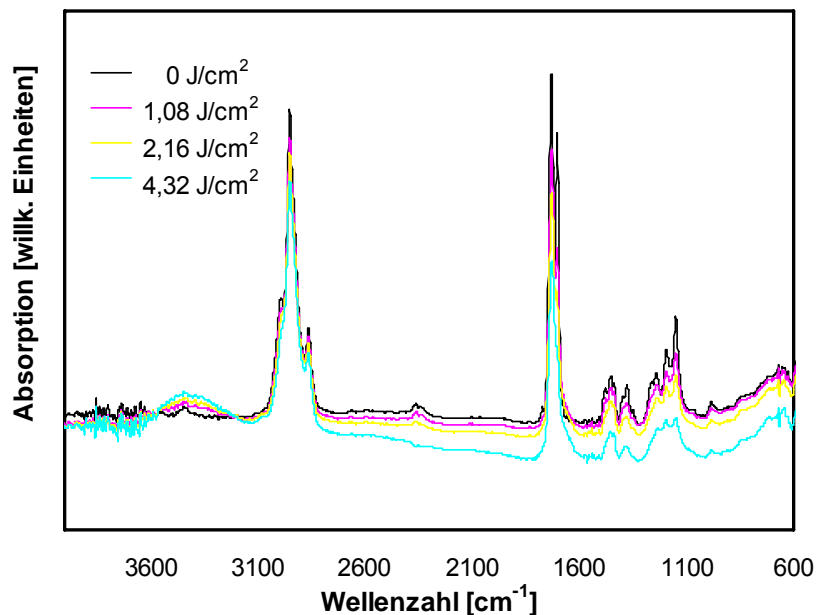


Abb. 4-10 IR-Absorptionsspektrum einer 0,5 µm dicken OZ-1310 Schicht nach UV-Bestrahlung unter Vakuum.

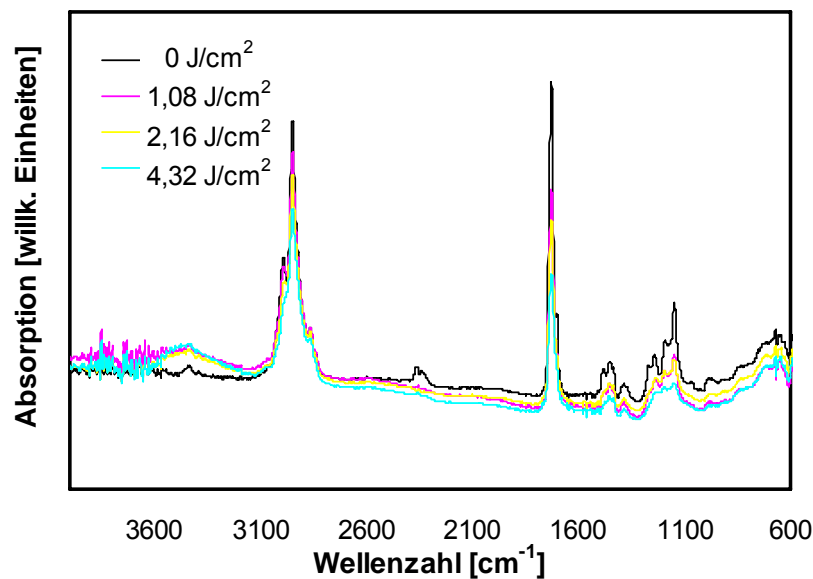


Abb. 4-11 IR-Absorptionsspektrum einer 0,5 µm dicken OZ-1330 Schicht nach UV-Bestrahlung unter Vakuum.

Wie aus den Spektren zu erkennen, ist nach der Bestrahlung die Intensität des Spektrums der Polymere der OPTOREZ[®] Serie für Wellenzahlen kleiner 3400 cm⁻¹ mit zunehmender UV-Bestrahlungsdosis geringer, wobei bei 1750 cm⁻¹ eine deutlich stärkere Abnahme der Intensität zu beobachten ist. Die Ursache hierfür ist ein Bruch der Carbonylgruppe (>C=O) nach der UV-Bestrahlung und der Abspaltung der Esterseitenkette (-COO-R, R steht hier für CH₃ oder einen alizyklischen Ring) und eine weitere Aufspaltung in kleinere, leicht flüchtigere Fragmente wie z.B. CH₄, CH₃OH, CO₂, CO, HCOOCH₃ [Choi88], [Moor91], [Woch00]. Die Intensität des Spektrums bei einer Wellenzahl von ca. 3450 cm⁻¹ nimmt dagegen mit zunehmender UV-Bestrahlungsdosis deutlich zu. Dies ist eine Folge der Erzeugung der Hydroxylgruppe (-OH), die aus der Carbonylgruppe stammt. Diese Analyse zeigt, dass die Hauptreaktion bei UV-Bestrahlung bei den Polymeren der OPTOREZ[®] Serie auch der Bruch der Seitenkette ist. Somit ist die Fotochemie der Polymere der OPTOREZ[®] Serie die gleiche wie die von PMMA. Insofern ist verständlich, dass die Polymere der OPTOREZ[®] Serie durch UV-Bestrahlung eine Brechzahländerung erfahren und damit ebenfalls Wellenleiter hergestellt werden können.

4.4 DSC (Differential Scanning Calorimetry)

Für die Messung der Glasübergangstemperatur (T_g) wurden ca. 20 µm dicke Polymerschichten benutzt. Zu deren Herstellung wurde je 4 g Polymer in 9 g Chlorbenzen gelöst und mit einem Belacker (Hamatech) mit einer Drehzahl von 1500 min⁻¹ für 60 Sekunden auf eine Kaptonfolie aufgeschleudert. Anschließend wurde das Lösungsmittel durch einen Tempersschritt ausgetrieben (30 min bei 170°C im Umluftofen). Die Proben

wurden erneut mit der UVAPRINT Bestrahlungseinrichtung belichtet. Die Polymerschichten wurden von der Kaptonfolie abgezogen und mit DSC vermessen. Tab. 4-6 zeigt die ermittelte Glasübergangstemperatur der Polymere der OPTOREZ® Serie vor und nach der UV-Bestrahlung unter Vakuum. Die Bestrahlungsdosis betrug $4,32 \text{ J/cm}^2$.

Produktname	T_g vor UV-Bestrahlung [°C]	T_g nach UV-Bestrahlung [°C]
OZ-1000	125	110
OZ-1100	131	124
OZ-1310	130	131
OZ-1330	120	107

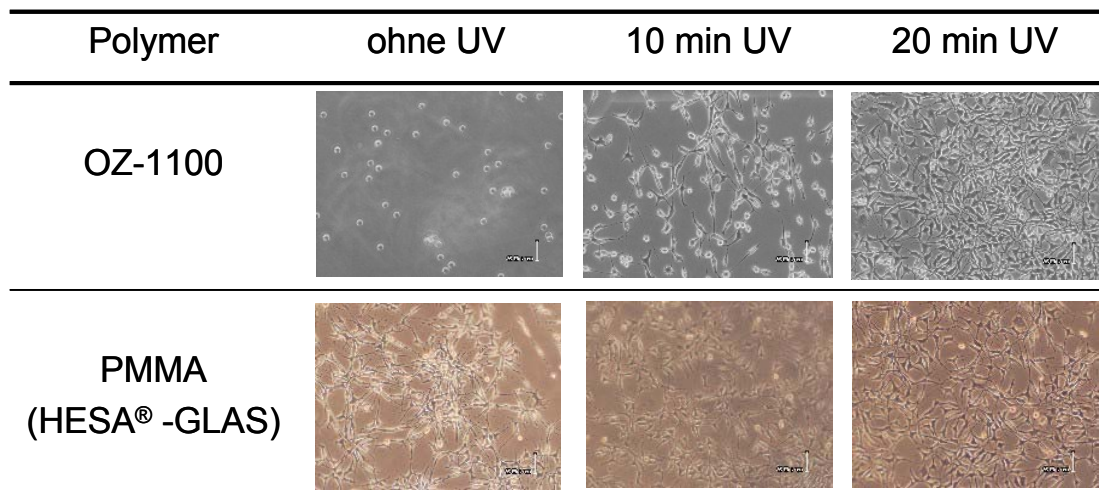
Tab. 4-6: Glasübergangstemperatur der OPTOREZ® Serie vor und nach UV-Bestrahlung unter Vakuum.

Für alle Polymere der Serie ergibt sich maximal eine Verminderung der Glasübergangstemperatur von ca. 10%, sie liegt jedoch noch deutlich über 100°C . Im Falle von OZ-1310 bleibt die T_g sogar im Rahmen der Messtoleranz konstant. Bei PMMA dagegen verringert sich die Glasübergangstemperatur von 105°C vor der UV-Bestrahlung auf nur noch ca. 80°C nach der UV-Bestrahlung, bei Verwendung einer Dosis von $2,5 \text{ J/cm}^2$ [Henz04]. Durch eine weitere UV-Bestrahlung (ca. 30 J/cm^2) wird das T_g sogar bis auf 40°C abgesenkt. Durch die deutlich geringere Absenkung der Glasübergangstemperatur bei den Polymeren der OPTOREZ® Serie sind diese thermisch stabiler als PMMA. Dies ist ein großer Vorteil und eröffnet somit einen deutlich erweiterten Anwendungsbereich gegenüber PMMA.

4.5 Zelladhäsion

Die UV-Bestrahlung führt nicht nur zu einer Veränderung des Brechungsindex der Polymere, sondern ändert auch die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Polymeroberfläche, wie z.B. die Benetzbarkeit (Kontaktwinkel). Für den Einsatz der Wellenleiter in biophotonischen Anwendungen spielt die Haftung von Biomolekülen eine entscheidende Rolle. Um z.B. Protein oder Zellen nicht kovalent sondern rein adsorptiv an die Oberfläche zu binden, muss diese hydrophobisiert bzw. hydrophiliert werden. Es stellt sich nun die Frage, wie effizient dies durch die UV-Bestrahlung gelingt und ob dadurch eine zellfreundliche Polymeroberfläche geschaffen werden kann.

Zur Untersuchung dieses Effektes wurden Zellen (L929 Fibroblast) auf Polymeroberflächen immobilisiert. Die Abmessung der Polymerschicht betrug 3 cm x 3 cm, sie wurde vor dem Experiment mit 70% Propanol zur Sterilisation gereinigt. Mit einer Niederdruck Quecksilberlampe (Heraeus Noblelight GmbH, NHQ Lampe, $\lambda = 185 \text{ nm}$ und 253 nm , 15 W) wurden die Polymerschichten an Luft bestrahlt. Die Proben wurden mit jeweils einer Million Zellen in Pluronic F-68 (1 vol% vom Medium) beaufschlagt. Tab. 4-7 zeigt die Bilder von Zellkulturen auf OZ-1100 und PMMA Proben, die mit verschiedenen Bestrahlungsdosen bestrahlt wurden.



Tab. 4-7: Bilder von Zellkulturen auf OZ-1100 und PMMA bei verschiedenen Bestrahlungsdosen.

Im Falle von OZ-1100 ohne UV-Bestrahlung, sind nur schwebende Zellen im Medium zu erkennen. Das heißt, keine Zellen haften auf der Polymeroberfläche von OZ-1100. Im Falle von PMMA dagegen haften die Zellen bereits ohne UV-Bestrahlung auf der Polymeroberfläche. Bei beiden mit UV-Licht bestrahlten Proben haften die Zellen auf der Polymeroberfläche. Dabei nimmt der Grad der Immobilisierung der Zellen (L929 Fibroblast) mit zunehmender UV-Bestrahlungsdosis zu. Das heißt, OZ-1100 und PMMA zeigt eine zellfreundliche Oberfläche durch kurzweilige UV-Bestrahlung [Ichi06b], allerdings ist im Falle von OZ-1100 der Kontrast vor und nach der UV-Bestrahlung wesentlich größer als für PMMA.

4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse der Materialbestimmungen

Von den Polymeren, die hinsichtlich einer Brechzahländerung durch UV-Bestrahlung untersucht wurden, zeigten nur die Copolymere aus Methylmetacrylat und alizyklischem Methacrylat (OPTOREZ®) eine ausreichende Brechzahländerung, so dass damit prinzipiell Wellenleiterstrukturen hergestellt werden können. Im Vergleich zu konventionellem Polymethylmethacrylat (PMMA) besitzt dieses neue Material einen höheren Ausgangsbrechungsindex, eine höhere Glasübergangstemperatur und eine geringere Wasserabsorption. Dies führt zu einer höheren thermomechanischen Stabilität, was den

Einsatzbereich der Wellenleiter erweitert. Mit Hilfe der spektroskopischen Analyse wurde nachgewiesen, dass in diesem Copolymer die gleiche fotochemische Reaktion wie bei PMMA stattfindet. Erste Untersuchungen zur Immobilisierung lebender Zellen auf den Oberflächen des modifizierten Acrylats wurden erfolgreich durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass auf den fotochemisch modifizierten Bereichen Zellen angelagert werden können. Der Grad der Anlagerung mit zunehmender Dosis ist dabei deutlich größer als bei PMMA. Insofern eignen sich die Polymere der OPTOREZ® Serie sehr gut für die Wellenleiterherstellung sowie für die daraus resultierende Herstellung von biophotonischen Sensoren.

Von den vier verschiedenen Copolymeren der OPTOREZ® Serie sind OZ-1310 und OZ-1100 thermisch stabiler als die anderen beiden Materialien und stellen somit prinzipiell ein ideales Material für die Wellenleiterherstellung dar. Für die Wellenleiterherstellung ist eine reproduzierbare Herstellung der Polymerschicht mit geringer Oberflächenrauheit nötig. Beim Heißprägen von OZ-1310 hatte die gepresste Folie oft Risse auf der Oberfläche. Aus diesem Grund wurde für die Wellenleiterherstellung im Rahmen dieser Arbeit nur OZ-1100 benutzt.

5 Optische Charakterisierung der polymeren Wellenleiter aus alizyklischem Methacrylat Copolymer

Zur Charakterisierung der Wellenleiter im Hinblick auf eine Optimierung des Herstellungsprozesses wurden Nahfeld- und Einfügedämpfungsmessungen an den Wellenleitern durchgeführt. Eine qualitative Beurteilung der Oberflächengüte der Wellenleiterstrukturen erfolgte mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Atomkraftmikroskopie (AFM). Als Teststruktur wurden hierzu gerade Streifenwellenleiter mit 7,5 μm Breite verwendet. Die Charakterisierung erfolgte bei 1550 nm und im Hinblick auf eine biophotonische Anwendung der Wellenleiter zusätzlich bei 808 nm. Als Beispiel einer funktionellen Komponente wurde ein Y-Verzweiger mit einem Öffnungswinkel von 1° näher betrachtet. Sein Verhalten wurde im Bereich von 1460-1550 nm mitteilt.

Die Methode der Wellenleiterherstellung aus OPTOREZ® wurde grundsätzlich im Kapitel 3 schon geschrieben. Zu Erzeugung von Polymerfolien mit besserer Oberflächenqualität wurde die im ersten Prägeschritt verwendeten Edelstahlplatten mit Schleifpapier (1200, 2500 und 4000) und Diamantsuspension (9 μm , 3 μm und 1 μm) mit einer Schleif- und Poliermaschine poliert. Im zweiten Prägeschritt wurden an Stelle der Kaptonfolien Glasplatten verwendet. Bei der Umformung des OZ-1100 Granulates zu einer Folie betrug die Umformungstemperatur 180°C und die Entformtemperatur 80°C. Der maximale Druck war 20 kN für 1200 Sekunden.

Die für die UV-Bestrahlung verwendete Chrom/Quarz Photomaske wurde vor der Belichtung für eine Nacht in Schwefelsäure eingetaucht, mit Maskenreiniger (HD0207, Hamatech) gereinigt und mit Hexamethyldisilazan (HMDS, ABCR GmbH&Co. KG) in einem Ofen (Star 2000, IMTEC) beschichtet. HMDS fungiert als Antihafschicht. Damit kann die Adhäsion zwischen der Photomaske und dem Substrat vermieden werden. Die UV-Bestrahlung erfolgt wie in Kapitel 3 beschrieben unter Vakuum. Nach der Bestrahlung wird die Probe im Umluftofen für 4 Stunden bei 70°C getempert. Vor dem Sägen der Wellenleiter wird die Probe mit einer Displayschutzfolie aus Silikon bedeckt, um die Oberfläche der Probe zu schützen.

5.1 Einfluss des UV-Lampenspektrums

Wie in Kapitel 3 dargestellt, wurde die UV-Bestrahlung sowohl mit dem UV-Strahler UVAPRINT als auch mit dem Maskaligner EVG 620 durchgeführt. Die Lichtquelle des Maskaligners hat eine relativ hohe Lichtintensität im Wellenlängenbereich von 220-260 nm im Vergleich zur Lichtquelle des UV-Strahlers UVAPRINT (Abb. 3-5). Das heißt, dass durch den Maskaligner eine effektivere fotochemische Reaktion stattfindet, welche zu der Veränderung des Brechungsindex des Polymers führt.

Abb. 5-1 zeigt die Abhängigkeit des effektiven Brechungsindex N_{eff} von OZ-1100 der beiden Lichtquellen für unterschiedliche Bestrahlungsdosen [Ichi06c].

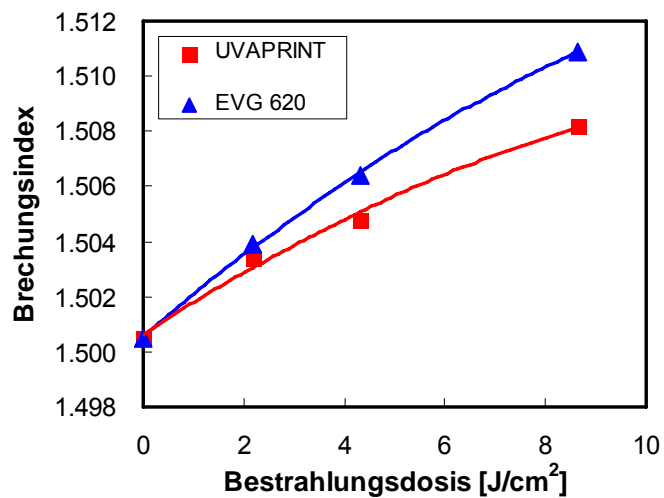


Abb. 5-1 Abhängigkeit von N_{eff} von OZ-1100 von der Bestrahlungsdosis bei verschiedenen Lichtquellen.

Durch den Maskaligner EVG 620 wird mit einer geringeren Bestrahlungsdosis die gleiche Änderung des Brechungsindex von OZ-1100 erzielt wie bei der Bestrahlung mit der UV-Lampe UVAPRINT. Beispielsweise ergibt sich bei einer Bestrahlungsdosis von $8,64 \text{ J/cm}^2$ mit der UV-Lampe UVAPRINT ein Brechungsindex von 1,5082 während bei Bestrahlung mit dem Maskaligner EVG 620 bei einer Bestrahlungsdosis von $4,32 \text{ J/cm}^2$ ein Brechungsindex von 1,5074 ermittelt wird. Um mit dem Maskaligner einen vergleichbaren Brechungsindex wie mit der UV-Lampe ($0,0077$) zu erreichen, wurde die Probe mit 5 J/cm^2 bestrahlt.

Um eine Aussage über die Qualität der Wellenleiter zu erhalten, muss für diese Bestrahlungswerte das Abstrahlverhalten der Wellenleiter miteinander verglichen werden. Hierzu wurde das Nahfeld von $7,5 \mu\text{m}$ breiten geraden Wellenleitern bei einer Wellenlänge von 1550 nm analysiert. In Abb. 5-2 links ist das Nahfeld eines Wellenleiters, welcher mit dem Maskaligner EVG 620 bestrahlt wurde, dargestellt; rechts ist das Nahfeld eines Wellenleiters, welcher mit der UV-Lampe UVAPRINT bestrahlt wurde, gezeigt.

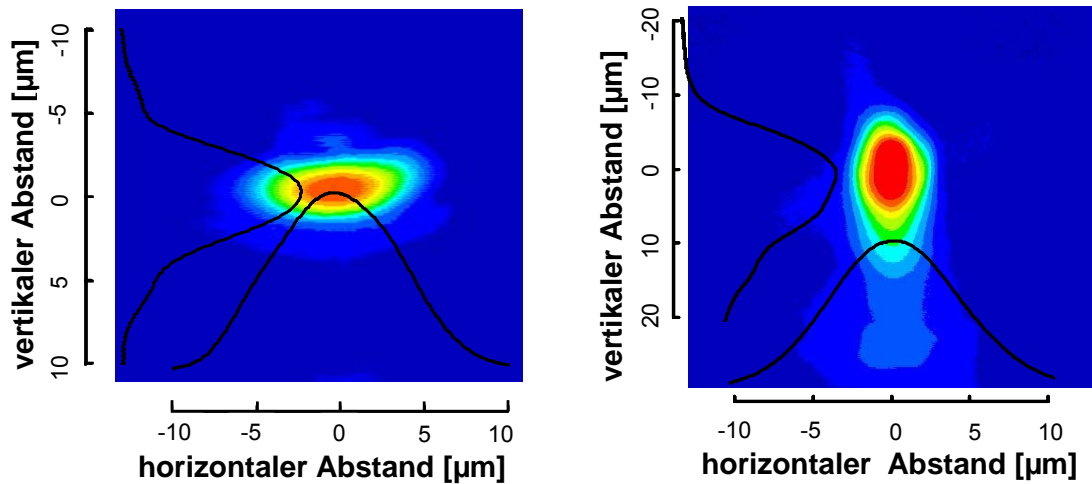


Abb. 5-2 Nahfeldmessung eines $7,5 \mu\text{m}$ breiten geraden Wellenleiters bei 1550 nm (links: bestrahlt mit EVG 620 bei 5 J/cm^2 , rechts: bestrahlt mit der UV-Lampe UVAPRINT bei $8,64 \text{ J/cm}^2$).

Die Intensitätsprofile zeigen einen deutlichen Unterschied. Die mit der UV-Lampe bestrahlten Wellenleiter weisen eine starke Asymmetrie in vertikaler Richtung auf, wodurch sich eine 2. Mode in vertikaler Richtung andeutet. Die Ursache dafür liegt darin, dass die Tiefe der mit der UV-Lampe hergestellten Wellenleiter zu groß ist. Die Nahfeldverteilung der mit dem Maskaligner hergestellten Wellenleiter dagegen ist gestaucht in vertikaler Richtung, was auf eine geringere Tiefe des Wellenleiters hindeutet. Das geführte Licht ist monomodig.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem Maskaligner monomodige Wellenleiter mit höherem Brechzahlhub als mit der UV-Lampe hergestellt werden können. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Anteil der Strahlung im Absorptionsbereich des Polymers höher ist (siehe Abb. 5-3) und somit die Transmission stärker abnimmt. Das heißt, dass nach einer UV-Bestrahlung mit zunehmender Bestrahlungsdosis das UV-Licht in einer immer dünneren Schicht in der Polymeroberfläche absorbiert wird. UV-Licht dringt nicht mehr in tiefere Bereiche des Polymers vor. Dadurch ist die chemische Veränderung in den tieferen Schichten geringer als bei Bestrahlung mit der UV-Lampe.

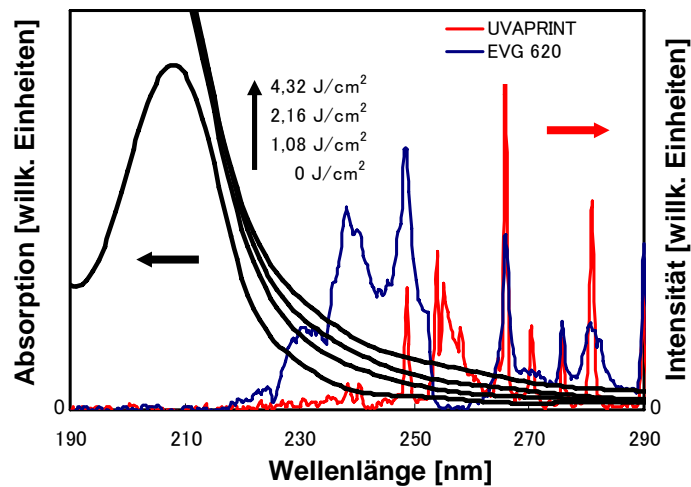


Abb. 5-3 Emissionsspektren der Lichtquellen EVG 620, UVAPRINT und UV-Absorptionsspektrum von OZ-1100 mit verschiedener Bestrahlungsdosis.

Abb. 5-4 zeigt im Vergleich das Ergebnis der Verlustmessungen der geraden Wellenleiter, die mit dem Maskaligner EVG 620 bzw. der UV-Lampe UVAPRINT bestrahlt wurden, bei einer Wellenlänge von 1550 nm. Sie wurden mit der Cut-Back Methode ermittelt.

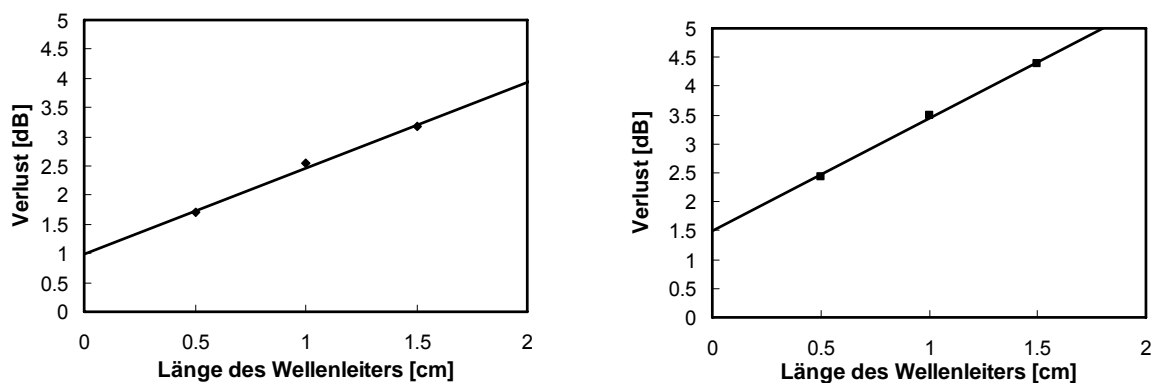


Abb. 5-4 Einfügedämpfung in Abhängigkeit von Wellenleiterlänge bei 1550 nm (links: mit EVG 620 bei 5 J/cm² bestrahlt, rechts: mit UVAPRINT bei 8,64 J/cm² bestrahlt).

Aus dem Ergebnis der Cut-Back Methode wurden die Wellenleiterverluste bei unterschiedlicher Polarisierung berechnet. Die mit 5 J/cm² durch den Maskaligner EVG 620 bestrahlten 7,5 µm breite Wellenleiter zeigen eine intrinsische Dämpfung von 1,5 dB/cm bei 1550 nm. Der polarisationsabhängige Verlust ist kleiner als 0,15 dB. Die Faser-Chip Kopplungsverluste betragen ca. 0,5 dB/Seite. Die intrinsische Dämpfung der 7,5 µm breiten geraden Wellenleitern, die mit 8,64 J/cm² durch die UV-Lampe UVAPRINT bestrahlt wurden, betrug 2 dB/cm bei 1550 nm. Faser-Chip Kopplungsverluste betragen ca. 0,75 dB/Seite. Die

geringeren Faser-Chip Kopplungsverluste der mit dem Maskaligner EVG 620 bestrahlten Wellenleiter lässt sich damit erklären, dass dieser monomodig ist und somit besser auf die monomodige Faser bei 1550 nm angepasst ist.

5.2 Optische Charakterisierung bei 1550 nm

Wie im vorigen Kapitel dargestellt konnten mit dem Maskaligner monomodige Wellenleiter aus OZ-1100 hergestellt werden. Allerdings ist das Modenprofil sehr asymmetrisch (Abb. 5.2), außerdem ist die intrinsische Dämpfung im Vergleich zu PMMA Wellenleitern, die durch UV-induzierte Brechzahländerung hergestellt wurden (0,7 dB/cm bei 1550 nm) [Rabus07] deutlich höher. Aus diesem Grunde müssen geeigneter Belichtungsparameter zur Herstellung der Wellenleiter ausgewählt werden. Mit der bisher verwendeten Belichtungs-dosis von 5 J/cm^2 ergibt sich ein Brechzahlhub zwischen Kern und Mantel des Wellenleiters in Höhe von ca. 0,5% ($\Delta n = 0,008$). Generell wird der Brechungshub meistens bei ca. 0,3% eingestellt, um optimierte Wellenleiter zu erhalten [Matsu93], [Yurt05]. Deshalb wurde die Belichtungs-dosis auf 3 J/cm^2 abgesenkt. Der Brechzahlhub zwischen Kern und Mantel beträgt so nur noch ca. 0,33% ($\Delta n = 0,005$) [Ichi07].

5.2.1 Nahfeldmessung

Abb. 5-5 zeigt die Nahfeldmessung bei 1550 nm eines $7,5 \mu\text{m}$ breiten geraden Wellenleiters, der mit dem Maskaligner bei einer Bestrahlungsdosis von 3 J/cm^2 hergestellt wurde.

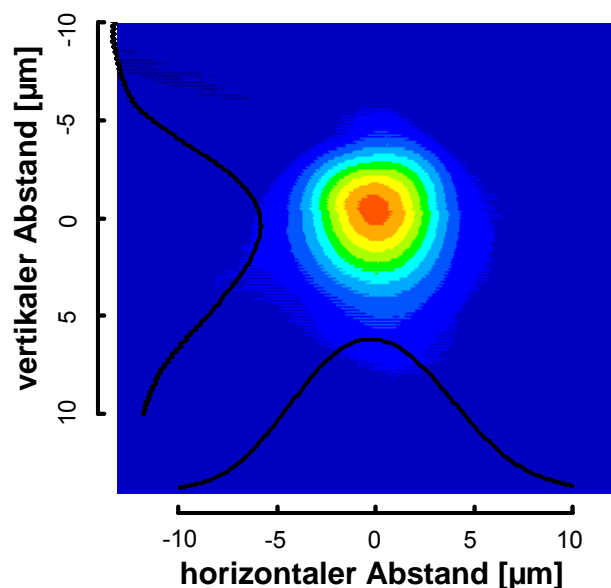


Abb. 5-5 Nahfeldmessung eines $7,5 \mu\text{m}$ breiten geraden Wellenleiters bei 1550 nm (bestrahlt mit EVG 620 mit 3 J/cm^2).

Das Intensitätsprofil zeigt eine wesentlich symmetrische Verteilung im Vergleich zu dem mit 5 J/cm^2 bestrahlte Wellenleiter. Der Wellenleiter ist monomodig.

5.2.2 Dämpfungsmessung

Abb. 5-6 zeigt das Ergebnis der mit der Cut-Back Methode ermittelten Einfügedämpfung der mit 3 J/cm^2 bestrahlten, $7,5 \mu\text{m}$ breiten Wellenleitern bei einer Wellenlänge von 1550 nm .

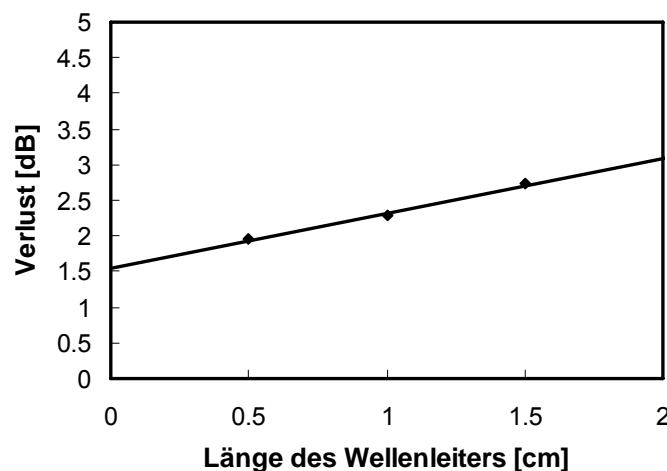


Abb. 5-6 Einfügedämpfung in Abhängigkeit von der Wellenleiterlänge bei 1550 nm (bestrahlt mit EVG 620 mit 3 J/cm^2).

Die daraus ermittelte intrinsische Dämpfung beträgt $0,8 \text{ dB/cm}$. Der Grund dafür ist die symmetrischere Verteilung der Intensität im Wellenleiter im Vergleich zu höheren Bestrahlungsdosen, so dass weniger Abstrahlverluste auftreten. Der polarisationsabhängige Verlust ist kleiner als $0,15 \text{ dB}$. Faser-Chip Kopplungsverluste betragen ca. $0,75 \text{ dB/Seite}$. Die bisher beste Dämpfung von PMMA Wellenleitern bei 1550 nm wurde zu $0,7 \text{ dB/cm}$ ermittelt. Somit konnte gezeigt werden, dass OZ-1100 nur geringfügig höhere Dämpfungswerte besitzt als PMMA. Der Grund für die leicht höhere Dämpfung von OZ-1100 gegenüber PMMA ist die größere Anzahl von C-H Bindungen (alizyklischer Ring). C-H Bindungen bringen höhere intrinsische Materialverluste, aufgrund von harmonischen Oberschwingungen [Groh88].

Um die geometrische Form der Wellenleiter zu ermitteln, wurden REM Aufnahmen von den Proben gemacht und AFM Messungen durchgeführt. Abb. 5-7 zeigt die REM Aufnahmen eines $7,5 \mu\text{m}$ breiten geraden Wellenleiters mit einer Belichtungsdosis von 3 J/cm^2 und 5 J/cm^2 .

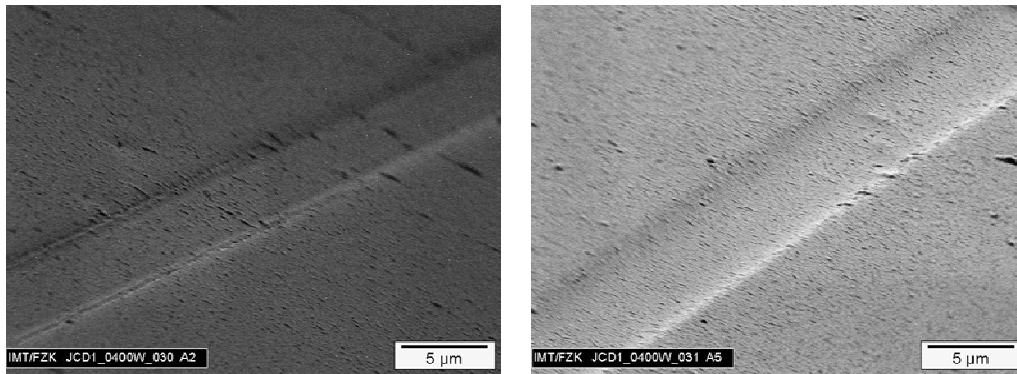


Abb. 5-7 REM Aufnahmen eines 7,5 µm breiten geraden Wellenleiters mit Bestrahlungsdosis 3 J/cm² (links) und 5 J/cm² (rechts).

Der REM Aufnahme nach sinkt der mit 5 J/cm² bestrahlte Wellenleiter tiefer ein als der mit 3 J/cm² bestrahlte. Mit Hilfe von AFM Messungen (Abb. 5-8) wurde die Einsinktiefen des mit 3 J/cm² bestrahlten Wellenleiters zu ca. 310 nm bestimmt, die des mit 5 J/cm² bestrahlten Wellenleiters zu ca. 530 nm. Die Kante des Wellenleiterprofils zeigt sich bei mit 5 J/cm² bestrahlten Wellenleitern als stetig abgerundete Fläche, während die mit 3 J/cm² bestrahlten Wellenleiter bei geringerer Einsinktiefen eine breitere Fläche zeigen und im Profil keinem glatten Kurvenverlauf folgen. Die durchschnittliche Rauheit der Wellenleiteroberfläche ist 12 nm bei 3 J/cm² bestrahlten Wellenleiter und 42 nm bei 5 J/cm² bestrahlten Wellenleiter.

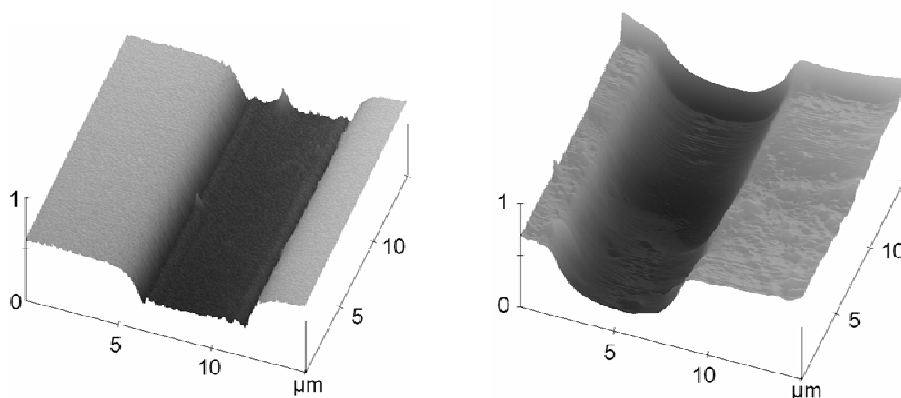


Abb. 5-8 AFM Aufnahmen eines 7,5 µm breiten geraden Wellenleiters mit Bestrahlungsdosis 3 J/cm² (links) und 5 J/cm² (rechts).

Nach der UV-Bestrahlung befinden sich noch viele aktive Radikale im bestrahlten Bereich der Polymer, die während des Temperns weiter reagieren. Insofern kommt es zu einer Kompaktierung des bestrahlten PMMA Bereiches. Die Kompaktierung wird allerdings durch die Verbindung mit dem unbestrahlten PMMA behindert, was zu Zugspannungen führt. Mit zunehmender Bestrahlungsdosis nehmen die Zugspannungen zum unbestrahlten Bereich zu, so dass das Profil immer stärker verrundet. In weniger stark bestrahlten Proben wirkt die

Zugspannung nur in den Randbereichen, was das teilweise rechteckige Profil bestätigt. Dass in den Wellenleitern starke Spannungen auftreten zeigen die Untersuchungen in [Golo07], die eine starke Doppelbrechung in den Wellenleitern ermittelt haben, die nicht nur mit dem Rechteckprofil des Wellenleiters erklärt werden können.

5.3 Optische Charakterisierung bei 808 nm

Im Hinblick auf die Anwendung der Wellenleiter in biophotonischen Sensoren, sollte die Wellenlänge bei denen die Wellenleiter eingesetzt werden unterhalb von 1000 nm liegen. Aus diesem Grund wurden die Wellenleiter auch bei 808 nm charakterisiert. Zur Messung der optischen Eigenschaft wurde die monomodige Faser 630 HP (GWJ Elektronik, Kern: 4 μm) zur Lichteinkoppelung benutzt. Abb. 5-9 zeigt die Nahfeldmessung eines 7,5 μm breiten geraden Wellenleiters bei einer Belichtungsdosis von 3 J/cm^2 .

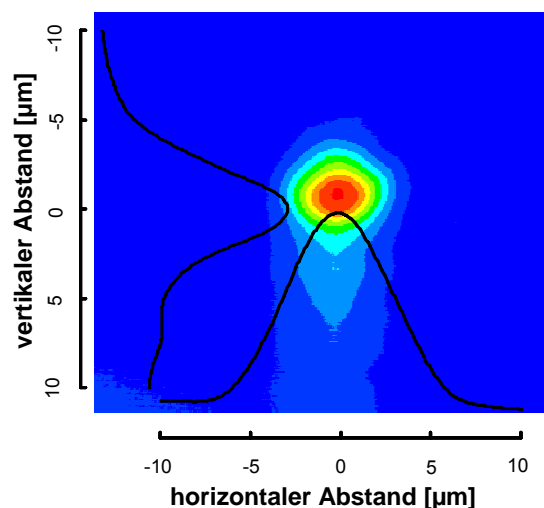


Abb. 5-9 Nahfeldmessung eines 7,5 μm breiten geraden Wellenleiters bei 808 nm (bestrahlt mit EVG 620 mit 3 J/cm^2).

Das Intensitätsprofil zeigt eine leichte Asymmetrie in vertikaler Richtung, was darauf hin deutet, dass die Wellenleitertiefe bereits etwas zu hoch ist, so dass in diesem Fall bereits der Übergang zur Zweimodigkeit erfolgt. Für vollständig monomodige Wellenleiter wäre eine etwas geringere Bestrahlungsdosis verbunden mit einem geringeren Brechzahlhub notwendig.

Für die Wellenleiter wurde ebenfalls die intrinsische Dämpfung gemessen (Abb. 5-10). Sie beträgt 0,6 dB/cm. Der Kopplungsverlust beim Übergang von Chip zur Faser betrug 0,55 dB/Seite.

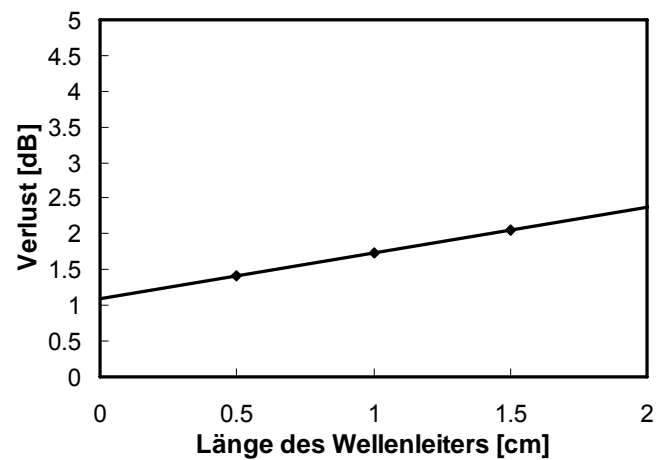


Abb. 5-10 Einfügedämpfung in Abhängigkeit von der Wellenleiterlänge bei 808 nm (durch EVG 620 mit 3 J/cm^2 bestrahlt).

5.4 Y-Verzweiger

Als erstes Beispiel für eine optische Komponente aus OZ-1100 wurde ein Y-Verzweiger mit einem Öffnungswinkel von 1° hergestellt. Die Länge des Y-Verzweigers ist 1,5 cm. Abb. 5-11 zeigt die Struktur im Auflicht des Mikroskops.

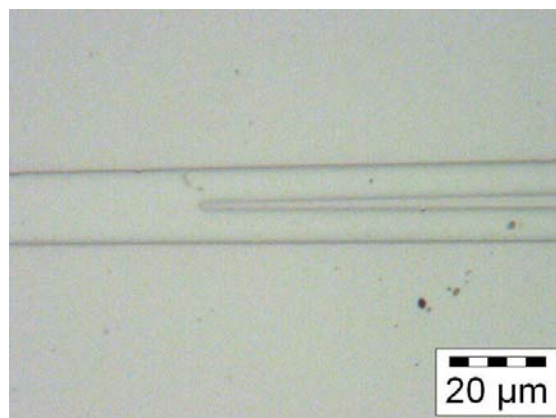


Abb. 5-11 Mikroskopische Auflichtaufnahme eines Y-Verzweigers mit einem Öffnungswinkel von 1° .

Die spektrale Einfügedämpfung des Y-Verzweigers ist in Abb. 5-12 dargestellt. Die Aufteilung in die beiden Verzweigerarme über dem gesamten Spektralbereich ist sehr gleichmäßig. In jedem Verzweigerarm hat man einen Verlust gegenüber dem geraden Wellenleiter von ca. 4 dB. Das heißt, der zusätzliche Verlust des Y-Verzweigers beträgt 1 dB.

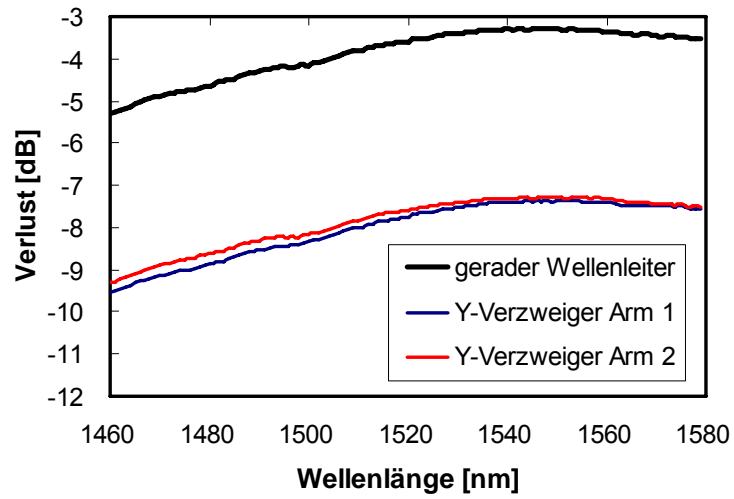


Abb. 5-12 Einfügedämpfung in beiden Armen eines Y-Verzweigers mit einem Öffnungswinkel von 1° .

6 Integration von polymerem Wellenleiter und Siliziumphotodiode

Für die Realisierung von integrierten biophotonischen Sensoren ist es notwendig, optische Wellenleiterstrukturen mit Detektoren und gegebenenfalls mit Lichtquellen zu integrieren. Im Sensor muss die durch einen Transducer modifizierte Lichtintensität detektiert werden. Ein Ansatz zur Realisierung der Integration von Detektoren und Wellenleitern ist die Strukturierung von Wellenleitern über Siliziumphotodioden. Ein möglicher Aufbau eines fluidischen Sensors mit integriertem PMMA Wellenleiter über Siliziumphotodioden wird in Abb. 6-1 schematisch dargestellt.

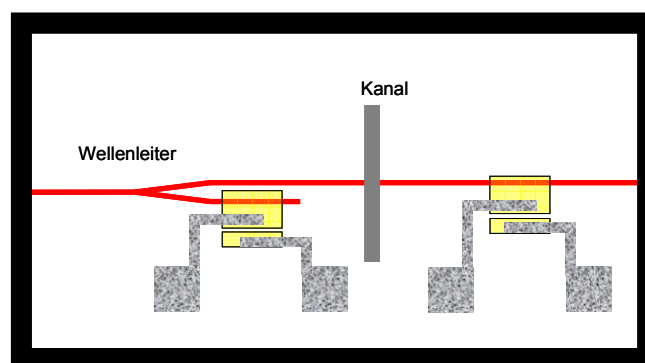


Abb. 6-1 Schematische Darstellung der Integration von Wellenleiter und Siliziumphotodioden für Sensor (rot: Wellenleiter, gelb: Photodiodenfelder, steingrau: elektrische Kontakte der Photodiode, grau: Kanal).

6.1 Konzept der Integration

Die erfolgreiche Integration von Siliziumphotodioden und anorganischen Wellenleitern aus SiON [Wund92] und InP beziehungsweise GaInAsP [Erman88] wurde mehrfach nachgewiesen.

In der Literatur wird von der Integration von Siliziumphotodioden und polymeren Wellenleiter auf der Basis von SU-8 berichtet [Nath03], [Ruan06]. Die geringste Dämpfung der SU-8 Wellenleiter bei diesen Versuchen wird mit ca. 1-1,2 dB/cm und einem Kopplungsverlust von 7 dB/Seite als relativ hoch angegeben [Fuen05].

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Machbarkeitsstudie zur Integration von Siliziumphotodioden und Wellenleitern aus PMMA erstellt. Dafür wurden Wellenleiter aus PMMA über Siliziumphotodioden strukturiert (schematische Darstellung siehe Abb. 6-2 links) und anschließend optisch charakterisiert. Durch den Brechzahlunterschied von Silizium ($n_{\text{Silizium}} = 3,85$) und PMMA ($n_{\text{PMMA, UV-bestrahlt}} = 1,49$) koppelt die im Wellenleiter geführte Leistung in das Substrat über. Diese Kopplung ist nur im Bereich der Photodiode gewünscht. Daher ist der polymere Wellenleiter vom Siliziumsubstrat in den Flächen, die nicht als Photodiode strukturiert sind, durch eine doppelte SiO₂ Schicht ($n_{\text{SiO}_2} = 1,45$) getrennt. Diese

Schicht besteht aus thermisch oxidiertem Silizium (1,1 μm) und mit CVD abgeschiedenem SiO_2 (ca. 2 μm).

Die Dicke der SiO_2 Schichten fällt um den Detektionsbereich der Photodiode allmählich ab. Abb. 6-2 links zeigt den schematischen Verlauf des Wellenleiters (rot) über der SiO_2 -Doppelschicht und zentral den Detektionsbereich der Photodiode (gelb), eingebettet im Siliziumsubstrat (weiß). Abb. 6-2 rechts zeigt mittels einer AFM Aufnahme die Topologie der Substratoberfläche am Rand der Siliziumphotodiode. Das obere Plateau stellt die Oberfläche der SiO_2 -Doppelschicht dar, das untere Plateau die Oberfläche des Siliziumsubstrats.

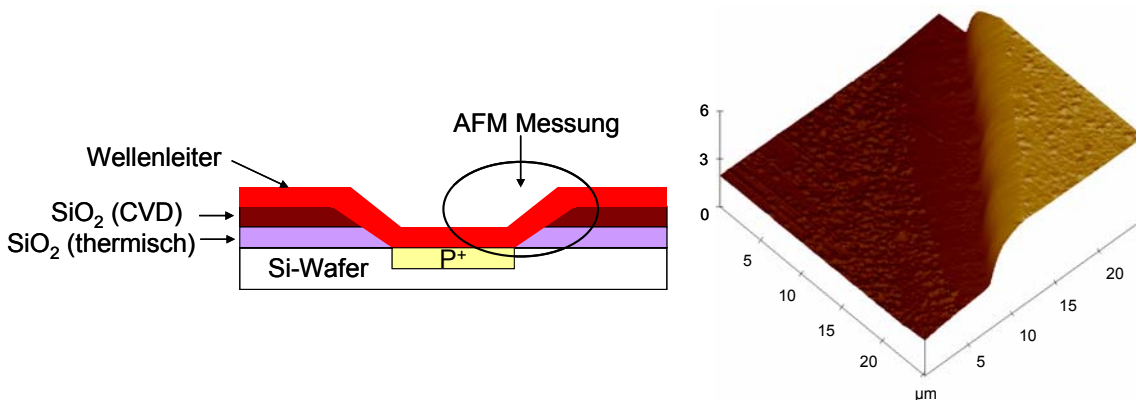


Abb. 6-2 Schematische Darstellung der Siliziumphotodiode (links) und AFM Aufnahme des Photodiodenbereichs vor Aufbringen des Wellenleiters (rechts).

Aus der AFM Aufnahme erkennt man, dass der Photodiodenbereich ca. 3 μm tiefer als seine Umgebung liegt und über eine Länge von ca. 5 μm kontinuierlich abfällt. Auf dem photoelektrisch aktiven Bereich der Photodiode wird die optische Energie aus dem über dieses Feld geführten Wellenleiter in die Photodiode durch Leaky-Wave Coupling übertragen [Cris99], [Cris01]. Abb. 6-3 zeigt eine schematische Darstellung des Leaky-Wave Coupling.

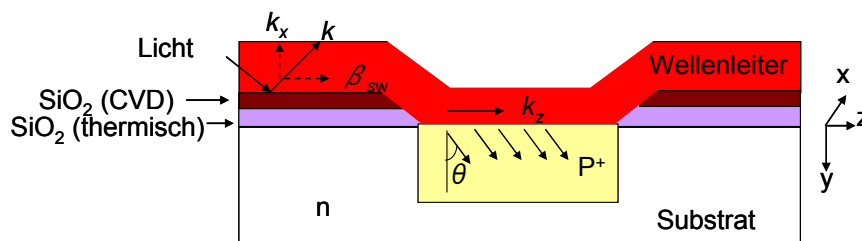


Abb. 6-3 Schematische Darstellung des Leaky-Wave Coupling.

Hier ist β_{sw} die Ausbreitungskonstante der Oberflächenschicht (Wellenleiter), k der Wellenzahlvektor und θ der Ausbreitungswinkel gegen die Oberflächennormale. Vor dem Kopplungsbereich gilt $k_z = \beta_{sw}$.

6.1.1 Simulation

Simulationsrechnungen zum Kopplungsverhalten der Leistung der Lichtwelle der Wellenleiter in die Photodioden wurden in Zusammenarbeit mit dem IMT-Bucharest durchgeführt. Vor dem Kopplungsbereich wird die Welle mit der Ausbreitungskonstanten β_{sw} geführt (siehe Abb. 6-3). Im Kopplungsbereich wird das Leaky-Wave Coupling mit der Ausbreitungskonstanten $k_z = \beta - j\alpha$ dargestellt, wobei k_z die komplexe Ausbreitung der Welle in z-Richtung, β der Ausbreitungskonstante und α das Amplitudenabklingen darstellen. β ist eine Funktion der Ausbreitung des Lichts. Wenn β sehr nahe β_{sw} ist und die Leakage damit als schwach angenommen werden kann (d.h. $\alpha \ll \beta$), kann die sich nach $\exp(-j\beta_{sw}z)$ verändernde Welle stetig als Leaky-Wave nach $\exp(-jk_z z)$ über $z = 0$ (unmittelbar vor dem Photodiodebereich) übertragen werden. Durch den Übertrag von Leistung im Kopplungsbereich $z > 0$, wird Leistung aus dem Wellenleiterbereich als Welle mit dem Ausbreitungswinkel θ in den Photodiodebereich gestrahlt [Tami82]. Der Leckparameter α_g wird als der Leistungsverlust pro Längeneinheit durch die Leistung in den Wellenleiter übertragen wird, definiert. Dieser Verlust wird in die Photodiode übertragen, weil der Brechungsindex des Siliziums größer ist als der des Wellenleiters. In dem Kopplungsbereich wird die übertragene Leistung in den Wellenleiter in Gleichung (6.1) definiert [Cris98].

$$P_g(z) = P_0 \cdot \exp(-\alpha_g \cdot z) \quad (6.1)$$

Und die übertragene Leistungsdichte in den Wellenleiter wird in (6-2) definiert.

$$\partial P / \partial z = P_0 \cdot \alpha_g \cdot \exp(-\alpha_g \cdot z) \quad (6.2)$$

Leckparameter werden für jede Mode einzeln bestimmt und gehen als Parametersatz in die Berechnung der multimodigen Wellenleiter ein. Mit dem Softwareprogramm OptiFDTD (Optiwave) wurden im IMT-Bucharest diese Parameter berechnet, um den Einfluss der Wellenleiterparameter wie Dicke und Brechungsindex im Rahmen der technologischen Grenzen optimieren zu können. Ein Beispiel für die vom Wellenleiter in Photodiode übergekoppelte Leistung über der Kopplungslänge bei einer Wellenlänge von 635 nm ist in Abb. 6-4 als Funktion der Wellenleiterdicke t dargestellt.

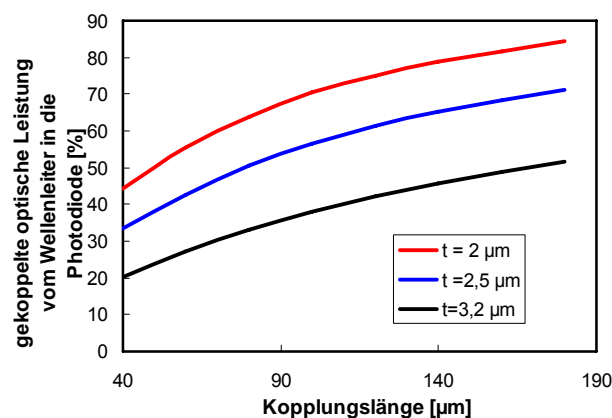


Abb. 6-4 Gekoppelte Leistung in die Photodiode gegen Kopplungslänge bei 635 nm (t : Wellenleiterdicke [μm]).

Diese Rechnungen ergeben, dass die Kopplungseffizienz bei abnehmender Dicke t des Wellenleiters steigt.

6.2 Herstellungsprozess der polymeren Wellenleiter auf SiO_2 -beschichtetem Siliziumwafer

Als Substrate für die Versuche dienten n-dotierte Siliziumwafer ($3\text{-}5 \ \Omega \text{ cm}$), die mit Hilfe eines p-Well CMOS-Prozesses [Cris00] hergestellt wurden. Hierauf wurden Photodioden vom IMT-Bucharest strukturiert. Die Abmessungen der Photodiodenstrukturen betragen $60 \ \mu\text{m}$ Breite und $200 \ \mu\text{m}$ Länge. Abb. 6-5 zeigt die lichtmikroskopische Aufnahme der Siliziumphotodiode. In die Mitte ist der rechteckige p^+ -Bereich der Photodiode zu erkennen. Das darunter befindliche schmale Viereck ist der n^+ -Bereich der Photodiode ($30 \ \mu\text{m}$ Breite und $700 \ \mu\text{m}$ Länge). Die hellen Flächen sind die elektrischen Kontaktbereiche aus Aluminium (Al).

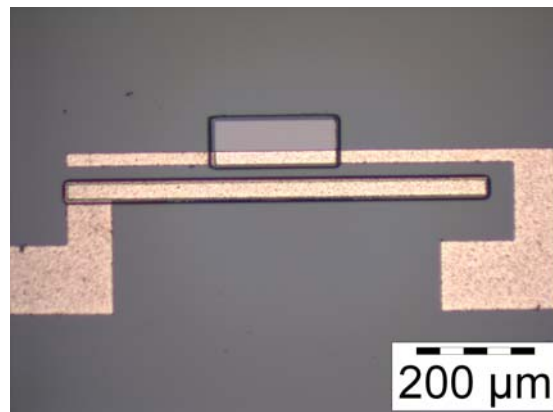


Abb. 6-5 Lichtmikroskopische Aufnahme einer Siliziumphotodiode auf SiO_2 -beschichtetem Siliziumwafer.

6.2.1 Belackungsprozess der Polymerschichten

Ausgangsmaterial für die Wellenleiter war PMMA Resist MicroChem 950k PMMA A11 (11 Gew.-% PMMA gelöst in Anisol), mit dem Schichten von wenigen Mikrometern auf Substraten aufgeschleudert werden können. Da die chemische Zusammensetzung des in vorhergehenden Arbeiten [Henz04] verwendeten Plattenmaterials HESA[®]-GLAS dem dieses Resists entspricht, wurde das optische Verhalten der in diesem Resist erzeugten Wellenleiter als vergleichbar zu dem des Plattenmaterials erwartet.

Im Hinblick auf die spätere Verwendung und zur optischen Charakterisierung der Wellenleiter ist eine Vereinzelung der Strukturen notwendig. Analog zur Vereinzelung von Strukturen aus Plattenmaterial [Henz04] wurden die ersten PMMA Strukturen auf dem Siliziumsubstrat mit der Wafersäge vereinzelt. Jedoch konnten auf Grund des unterschiedlichen Materialverhaltens von Substrat und Polymer keine Sägeparameter gefunden werden, die die reproduzierbare Herstellung einer Sägekante von optischer

Qualität erlaubten. In der Mitte der REM Aufnahme (Abb. 6-6) ist der in die PMMA Schicht strukturierte, leicht eingesunkene Wellenleiter zu erkennen. Im unteren Drittel des Bildes ist das Siliziumsubstrat zu sehen. An der Sägekante wurde die PMMA Schicht teilweise abgezogen (vorne rechts). Auf der Oberfläche der PMMA Schicht sind Sägestaubkörner zu erkennen. Die beim Sägen entstehende große Rauheit der Wellenleiterkante ist Ursache für hohen Kopplungsverlust [Naka94], [Phe197]. Daher ist eine Prozessoptimierung zur Generierung einer Wellenleiterkante von reproduzierbarer Qualität erforderlich.

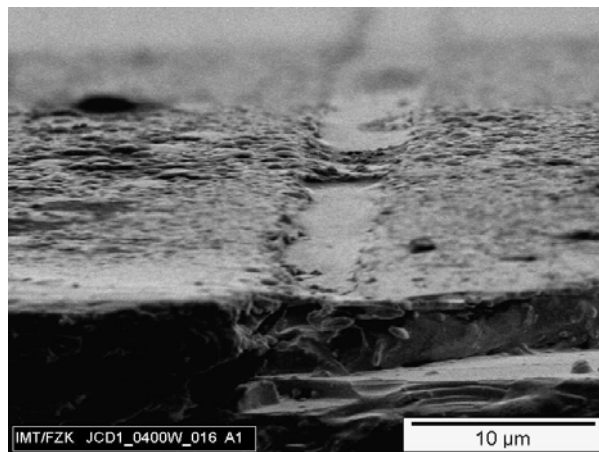


Abb. 6-6 REM Aufnahme von der gesägten Kante einer PMMA Schicht von 5 µm Höhe mit 5 µm breitem Wellenleiter auf einem SiO₂-beschichteten Siliziumwafer.

Um die Messungen an den PMMA Wellenleitern statistisch zu untermauern, wurde eine neue Methode für das Vereinzeln der Wellenleiter untersucht. Dabei sollte eine lithographische Kante mit den Sägekanten kombiniert werden, so dass nicht mehr direkt der Wellenleiter zu sägen ist.

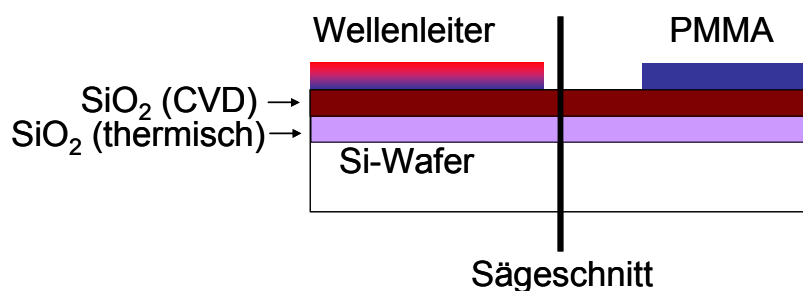


Abb. 6-7 Schematische Darstellung der lithographischen Kante und des Sägeschnitts.

Nach Abb. 6-7 wurde ein Prozess zur Herstellung einer reproduzierbar scharfen lithographischen Kante der Wellenleiter eingeführt. Analog zur Herstellung von Fluidkanälen mit rechteckigem Querschnitt in PMMA Filmen aus MicroChem 950k PMMA A11 [Mand06] wurde in einem ersten Schritt die PMMA Schicht mit UV-Lithographie strukturiert, um in den Bereichen das PMMA zu entfernen, in denen später die Bauteile durch Sägen vereinzelt

werden sollen. Die Kante des hierfür entwickelten PMMA dient gleichzeitig als definiertes Ende des Wellenleiters und damit als lithographische Wellenleiterkante. Zur Haftverbesserung zwischen der PMMA Schicht und dem SiO₂-beschichteten Siliziumwafer wurde eine Haftvermittlerschicht aus Polyimid [Mapp06] eingeführt. Die gewählte Haftvermittlerschicht muss lithographisch strukturiert werden, um die elektrischen Kontakte der Siliziumphotodiode frei zu legen. Da das Polyimid einen höheren Brechungsindex ($n_{\text{Polyimid}} = 1,69$) als PMMA ($n_{\text{PMMA}} = 1,49$) aufweist, muss auch der Bereich unter den Wellenleitern polyimidfrei sein, um Verluste des im Wellenleiter geführten Lichts in die Haftvermittlerschicht zu vermeiden. Der Schichtaufbau der Proben im Wellenleiterbereich wird in Abb. 6-8 dargestellt. Die linke Abbildung zeigt das Ende der Wellenleiter (senkrecht zum Wellenleiter) die rechte Abbildung zeigt den Photodiodenbereich (entlang des Wellenleiters).

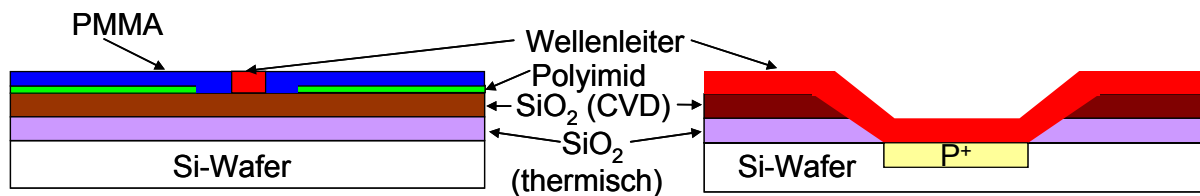


Abb. 6-8 Schematische Darstellung des Schichtaufbaus der Proben im Bereich der Photodiode (links: senkrecht zum Wellenleiter, rechts: entlang des Wellenleiters).

Die Herstellung dieser Strukturen erfolgte mit einem dreiteiligen Photomaskensatz für die Strukturierung jeweils der Polyimidschicht, der lithographischen Kante und der Wellenleiter. Die Wellenleiterbreite betrug 5, 7,5 und 10 μm . Abb. 6-9 zeigt den gesamten Prozessablauf.

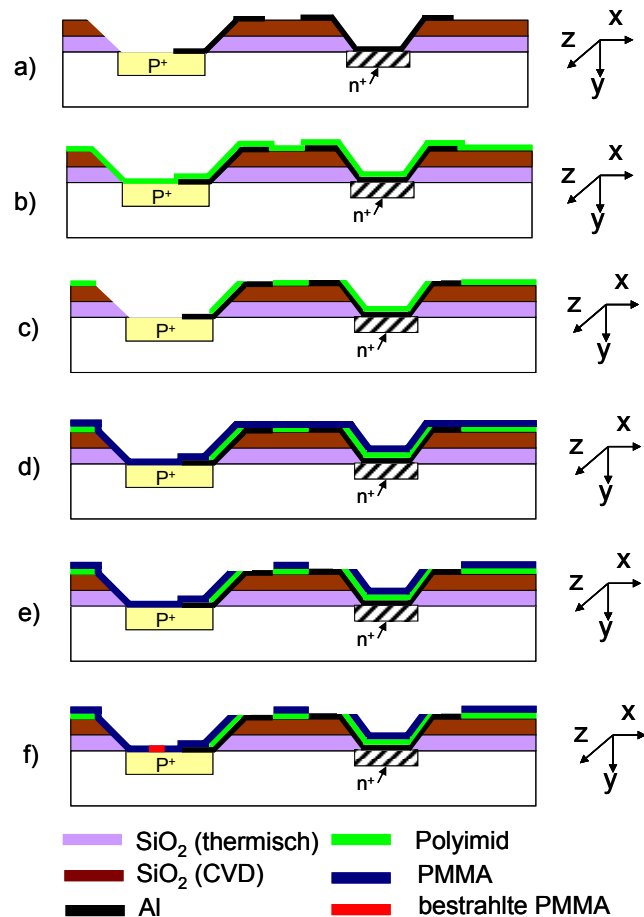


Abb. 6-9 Schematische Darstellung der gesamten Prozessschritte der Integration von polymerem Wellenleiter und Siliziumphotodiode.

Abb. 6-9 a) zeigt die Siliziumphotodiode mit Al Elektroden auf SiO₂-beschichtetem Siliziumwafer. In Abb. 6-9 b) ist das Belacken von Polyimid als Haftvermittlerschicht zwischen PMMA und Substrat gezeigt. Als Polyimidresist für diese Versuche wurde Durimide® 7505 (31 Gew.-% Polyimid gelöst in NMP, Fujifilm Electronic Materials) eingesetzt. Bei Durimide® handelt es sich um einen photosensitiven Polyimidresist. Der bestrahlte Bereich des Polyimidresists wird vernetzt und ist im Entwickler unlöslich; der unbestrahlte Bereich des Polyimids wird bei der Entwicklung entfernt. Nach der Entwicklung wird der strukturierte Resist ausgebacken (Hardbake). Für die in dieser Arbeit erstellten Proben wurde das Polyimid für eine Schichtdicke von 1,7 µm mit dem Schleuderbelacker (Hamatech) mit einer Drehzahl von 4000 min⁻¹ für 60 Sekunden aufgeschleudert. Anschließend wurde das Lösungsmittel durch einen Backschritt ausgetrieben (110°C für 3 min auf der Heizplatte).

Abb. 6-9 c) zeigt den Prozessschritt zur Strukturierung von Polyimid, um den Photodiodenbereich und den Kontaktbereich für die Al Elektrode zu öffnen. Die Strukturierung des Polyimid wurde am Maskaligner (EVG 620, EV Group) mit einer Bestrahlungsdosis von 200 mJ/cm² und unter Verwendung der Photomaske (1046_00_A0) ausgeführt, um den erforderlichen polyimidfreien Bereich zu erhalten. Anschließend wurde

der belackte und belichtete Wafer mit dem Spin Processor US-4000 (LAURELL Technologies) durch 35 Sekunden für Entwickler QZ3501 und 30 Sekunden Rinse QZ3512 (beide Fujifilm Electronic Materials) entwickelt.

Die physikalischen Eigenschaften von Polyimid sind eine Funktion der Bedingung des Hardbake. Während des Hardbakes erfolgt die Ringschlussreaktion im Polyimidresist zu Polyimid durch eine thermische Reaktion, deren Ablauf durch die Reaktionstemperatur bestimmt wird.

Der thermische Ausdehnungskoeffizient (CTE, Coefficient of Thermal Expansion) des Siliziumwafers beträgt $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Wenn der Unterschied der CTE zwischen den in monolithischen Prozessen verwendeten Materialien zu groß ist, können die mechanischen Spannungen an den Grenzflächen der Schichten des Substrats in dem späten Prozess zu Problemen wie z.B. Rissen und Waferkrümmungen führen.

Die Glasübergangstemperatur T_g und der thermische Ausdehnungskoeffizient sind eine Funktion der Hardbaketemperatur. Tab. 6-1 zeigt den Einfluss des Temperns auf Eigenschaften von Durimide® 7500 Serien (aus dem Datenblatt der Hersteller).

Parameter des Temperns	T_g [°C]	thermischer Ausdehnungskoeffizient [$10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$]
350°C für 1 h	284	55
350°C für 2 h	288	44
400°C für 1 h	305	40

Tab. 6-1: Einfluss der Tempern auf Eigenschaften der Durimide® 7500 Serie (Datenblatt des Herstellers).

Um die Relevanz der physikalischen Eigenschaften des Polyimid für die vorliegende Anwendung zu untersuchen, wurden in einem ersten Schritt Proben nach den Parametersätzen in Tab. 6-1 prozessiert. Der Hardbake wurde unter Vakuum im Ofen (VT 6060P-500, Kendo Laboratory Products) durchgeführt.

Abb. 6-10 zeigt die REM Aufnahmen der gesägten Wellenleiter mit lithographischer Kante und Parametervariation des Hardbakes der Polyimid Haftvermittlerschicht.

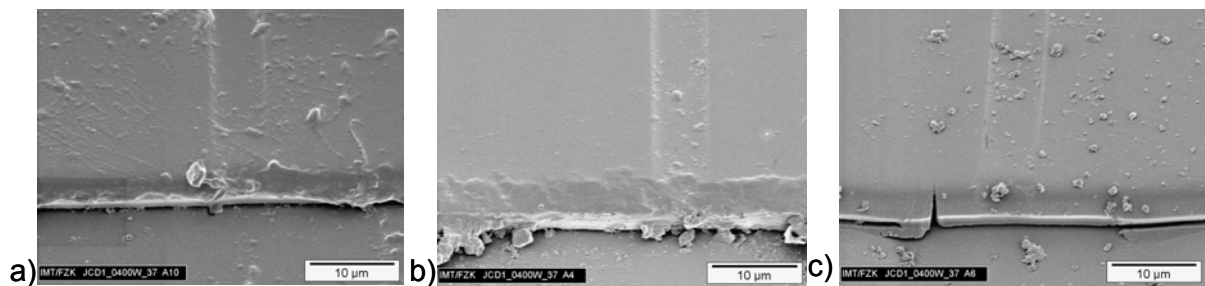


Abb. 6-10 REM Aufnahmen der gesägten Wellenleiter mit lithographischer Kante mit Polyimid Haftvermittlerschicht, a): Hardbake bei 400°C für 1h, b): Hardbake bei 350°C für 2h, c): Hardbake bei 350°C für 1h.

Unabhängig von der Bedingung des Hardbakes traten lange Risse entlang der Grenze zwischen der PMMA Schicht und Polyimidschicht und dem Siliziumwafer auf. Es konnte kein Einfluss der Hardbakebedingung auf die Haftung der PMMA Schicht festgestellt werden. Dies wird auf die technischen Randbedingungen des Backschrittes zurückgeführt. Der für diese Versuche verwendete Vakuum-/Inertgasofen VT 6060P-500 (Kendo Laboratory Products) heizt innerhalb von 2 Stunden mit einer Temperaturrampe von Raumtemperatur (RT) auf Endtemperatur. Nach dem Halten der Temperatur für die gegebene Zeit wurde über 8 Stunden auf RT abgekühlt. Die lange Prozesszeit ist darauf zurückzuführen, dass dieser Ofen über kein stärkeres Kühlsystem, wie z.B. ein Wasserkühlsystem verfügt. Es wurde angenommen, dass die Backbedingung bei 350°C für 1h für diese Anwendung bereits zu einem zu unelastischen Polyimid führen. Deswegen wurden für diese Anwendung die Backparameter auf 300°C für 4 Stunden unter Stickstoffsatmosphäre reduziert. Dabei wurde die Ringschlussreaktion mit moderater thermischer Reaktion durchgeführt. Damit wurde ein höherer CTE erwartet und so eine bessere Haftung der PMMA Schicht auf dem Polyimid. Abb. 6-11 zeigt die REM Aufnahme der gesägten Wellenleiter mit lithographischer Kante und Polyimid Haftvermittlerschicht mit der reduzierten Hardbaketemperatur.

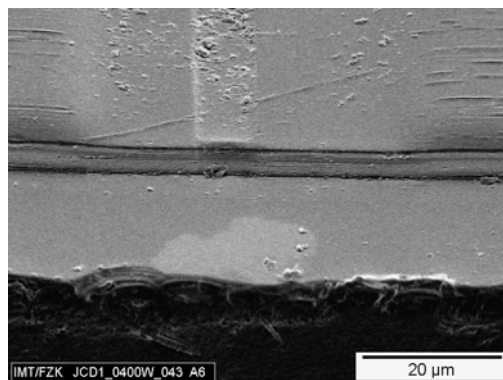


Abb. 6-11 REM Aufnahme der gesägten Wellenleiter mit lithographischer Kante und Polyimid Haftvermittlerschicht mit neuer Hardbakebedingung (300°C für 4 h unter Stickstoffsatmosphäre).

Mit der den unter reduzierter Hardbaketemperatur prozessierten Proben konnte eine bessere Haftung der Polymerschichten auf dem Wafer erzielt werden.

Der nächste Prozessschritt nach Abb. 6-9 d) ist das Belacken des Substrats mit PMMA. Als Resist wurde MicroChem 950k PMMA A11 (11 Gew.-% PMMA gelöst in Anisol) verwendet. PMMA einer Schichtdicke von 4,9 μm wurde mit dem Schleuderbelacker (Hamatech) mit einer Drehzahl von 700 min^{-1} für 200 Sekunden aufgeschleudert. Anschließend wurde das Lösungsmittel durch einen Backschritt ausgetrieben (180°C für 3 min auf der Heizplatte).

Der nächste Prozessschritt nach Abb. 6-9 e) ist das Strukturieren von PMMA, um die lithographischen Wellenleiterkanten zu erzeugen. Die Strukturierung der oben beschriebenen lithographischen Kante wurde mittels UV-Bestrahlung am Maskaligner (EVG 620, EV Group) mit einer Bestrahlungsdosis von 8 J/cm^2 und unter Verwendung der Photomaske (03408 1046_00_B0) ausgeführt. Die Entwicklung wurde mit dem automatischen Entwickler (Convac) mit der Entwicklerlösung (MIBK:IPA = 1:1, für 2 min) und der Spülung (IPA, für 30 Sekunden) und anschließendem Trockenschleudern mit einer Drehzahl von 1500 min^{-1} für 30 Sekunden durchgeführt.

Die Strukturierung der Wellenleiter nach Abb. 6-9 f) wurde mittels UV-Bestrahlung am Maskaligner (EVG 620, EV Group) mit einer Bestrahlungsdosis von 3 J/cm^2 und unter Verwendung der Photomaske (03409 1046_00_C0) ausgeführt. Nach der Bestrahlung wurde die Probe im Umluftofen für 4 Stunden bei 70°C getempert.

Die geometrischen Abmessungen der Photodiodenstrukturen und entsprechenden Wellenleiterstrukturen werden in Tab. 6-2 geschrieben.

Photodiodenlänge	Wellenleiterlänge	Wellenleiterbreite
200 μm	1, 2 und 4 cm	5, 7,5 und 10 μm
400 μm	1, 2 und 4 cm	5, 7,5 und 10 μm
700 μm	1, 2 und 4 cm	5, 7,5 und 10 μm

Tab. 6-2: Wellenleiterstrukturen und Photodiodenstrukturen (Photodiodenbreite: 60 μm).

Abb. 6-12 zeigt die lichtmikroskopische Aufnahme der PMMA Wellenleiter auf dem SiO_2 -beschichteten Siliziumwafer ohne Photodiode. Der Photodiodenbereich ist polyimidfrei und die Bereiche für die elektrischen Kontakte sind polymerfrei.

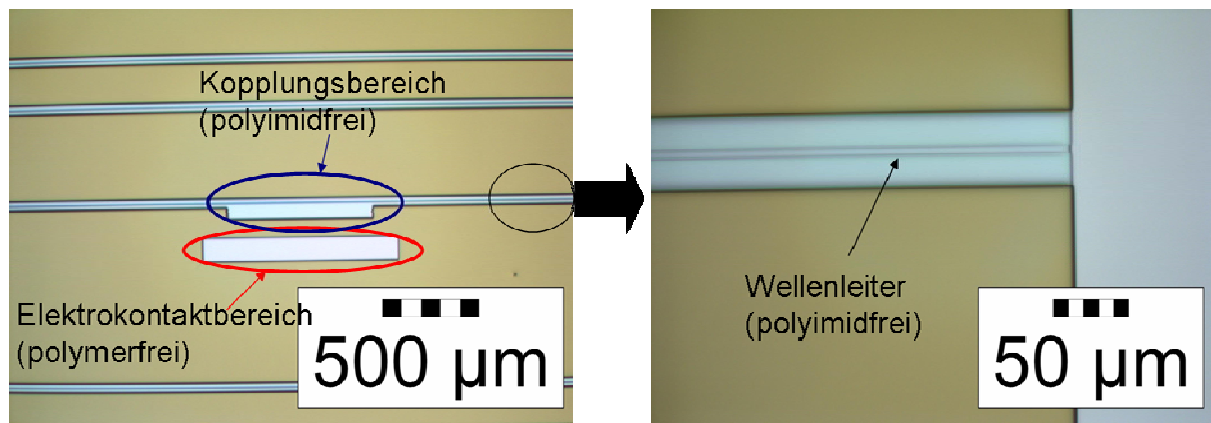
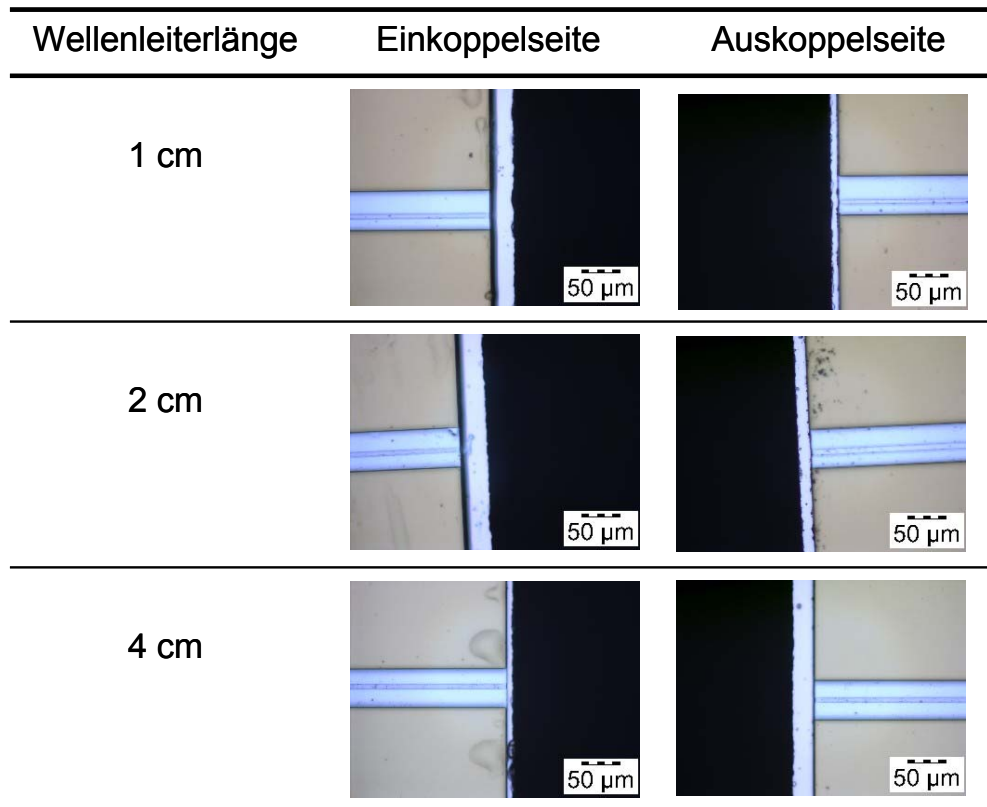


Abb. 6-12 Lichtmikroskopische Aufnahmen der PMMA Wellenleiter auf SiO₂-beschichtetem Siliziumwafer ohne Photodiode (links: Übersicht, rechts: Vergrößerung der Wellenleiter).

6.2.2 Sägeprozess

Die Proben wurden mit einem angepassten Sägeprozess vereinzelt. Dazu wurde das Substrat und der darauf befindlichen Wellenleiter mit Displayschutzfolie aus Silikon (Online-Shop für PDA, Handy- und Digitalkamera-Schutzfolien) bedeckt, um die Oberfläche der Probe vor Sägestaub zu schützen. Die Proben wurden mit der Wafersäge (Microace Series 3, Loadpoint) mit einer Drehzahl von 30000 min⁻¹ und einem Vorschub von 0,4 mm/s gesägt. Die Probe wurde im Bereich der entwickelten Gräben und in Abständen von ca. 15 µm von der Kante des Wellenleiterbereichs gesägt. Durch die Displayschutzfolie kann die lithografische Kante während des Sägeprozesses nicht scharf erkannt werden. Deswegen konnte der Abstand nicht exakt eingestellt werden.

Nach der Vereinzelung wurden die Proben mit destilliertem Wasser gereinigt, um verbleibenden Sägestaub zu entfernen. Dabei wurde mit angefeuchteten Wattestäbchen vorsichtig entlang der Sägekante gestrichen und die Partikel mit der Watte aufgenommen. Tab. 6-3 zeigt exemplarisch an Chips von 1 cm, 2 cm und 4 cm Länge die Variation des Abstands der Sägekante zur lithographischen Kante der Wellenleiter.



Tab. 6-3: Lichtmikroskopische Aufnahmen der gesägten PMMA Wellenleiter auf dem SiO₂-beschichteten Wafer (links: Einkoppelseite, rechts: Auskoppelseite. Zur besseren Veranschaulichung, wurden die beiden Wellenleiterenden gegenüberliegend dargestellt).

Der Abstand zwischen der gesägten Kante und der lithographischen Kante war bei den Proben nicht identisch, was auf die oben erwähnte undeutliche Erkennung der entwickelten Gräben zurückzuführen war. Die Einkoppelseite des 2 cm langen Chips zeigt den größten Abstand, die des 4 cm langen Chips den kleinsten Abstand.

Die Distanz der Sägekante zur lithographischen Kante musste in den Versuchen zur optischen Charakterisierung freistrahloptisch überbrückt werden. Die unterschiedliche Länge hat damit einen direkten Einfluss auf die Genauigkeit der anschließenden optischen Messungen.

6.3 Optische Charakterisierung der polymeren Wellenleiter auf SiO₂-beschichtetem Siliziumwafer

Nach oben beschriebenem Prozess wurden Wellenleiterstrukturen auf SiO₂-beschichtetem Wafer hergestellt. Im nächsten Schritte wurden die optischen Eigenschaften gemessen.

6.3.1 Polymere Wellenleiter auf SiO₂-beschichtetem Siliziumwafer

Vor der Integration von polymeren Wellenleitern und Siliziumphotodioden wurden die optischen Eigenschaften der Wellenleiter auf SiO₂-beschichteten Wafern ohne Siliziumphotodiode bestimmt.

Die Profile der polymeren Wellenleiter auf SiO₂-beschichteten Wafern wurden bei einer Wellenlänge von 635 nm bestimmt. Gemessen wird die Intensitätsverteilung am Wellenleiterausgang mit Hilfe eines Nahfeldmesssystems (Optical Beam Measurement System A4859-01, Hamamatsu Photonics) bestehend aus einem Laser Beam Profiler (LEPAS-11, Hamamatsu Photonics) und einer CCD-Kamera (C3077-71, Hamamatsu Photonics). Abb. 6-13 zeigt die Nahfeldmessung eines 5 μm , 7,5 μm und 10 μm breiten geraden Wellenleiters. Die Länge der gemessenen Wellenleiter betrug 1 cm.

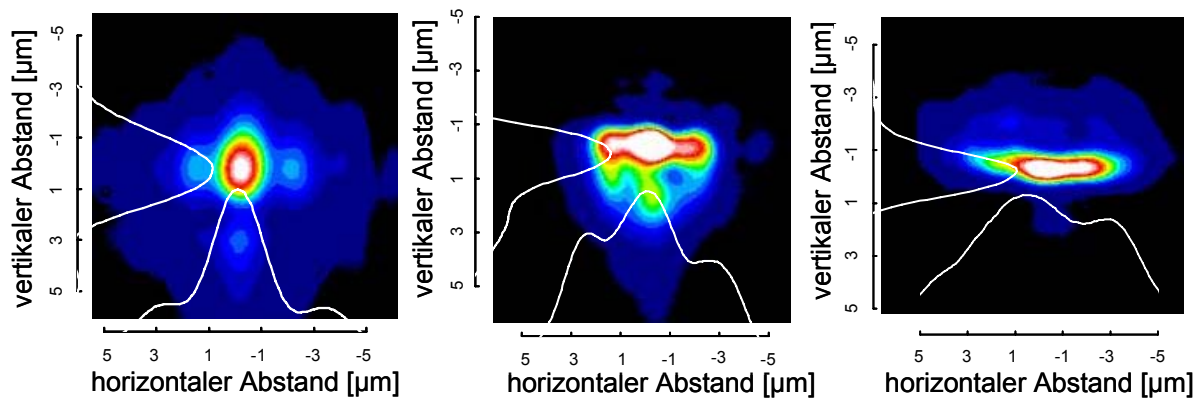


Abb. 6-13 Nahfeldmessung bei 635 nm (der jeweils obere Teil der Aufnahmen stellt den Substratgrund dar (negativer Bereiche der vertikalen Achse), links: 5 μm breiter Wellenleiter, Mitte: 7,5 μm breiter Wellenleiter, rechts: 10 μm breiter Wellenleiter).

Das Nahfeldfoto des 5 μm breiten Wellenleiters zeigt ein fast monomodiges Verhalten bei 635 nm. Die breiteren Wellenleiter zeigten deutlich die Ausbildung mehrerer Moden in horizontaler Richtung. Für die Kopplung von Energie aus dem Wellenleiter in die Siliziumphotodiode ist ein monomodiges Verhalten der Wellenleiter nicht nötig. Die aus der Literatur bekannten SU-8 Wellenleiter für die Kopplung mit Siliziumphotodioden waren mit einer Breite von 20 μm und einer verwendeten Wellenlänge von 639 nm ebenfalls multimodig [Nath03], [Fuen05].

Die Dämpfung wurde mit der Cut-Back Methode (Wellenleiterlänge von 1 cm, 2 cm und 4 cm) bei 650 nm bestimmt. Zur Einkopplung wurde eine monomodige Faser (630HP, 4 μm Kern) verwendet. Um das gesamte Feld der im Wellenleiter geführten Welle am Ausgang aufzunehmen, wurde zur Auskopplung eine Multimodefaser (Phoco, 9 μm Kern) eingesetzt. Der 10 μm breite Wellenleiter lies die besten Ergebnisse für die vollständige Kopplung der

Energie im Wellenleiter erwarten. Abb. 6-14 zeigt das Ergebnis der Cut-Back Messungen für diese Wellenleiterbreite. Für jede Wellenleiterlänge wurden mindestens 6 verschiedene Wellenleitern gemessen.

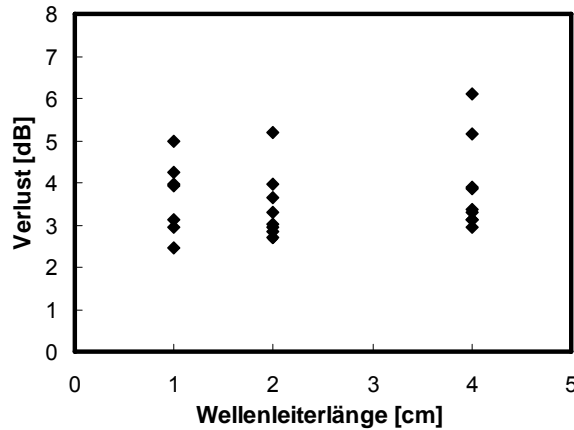


Abb. 6-14 Ergebnisse der Messungen zur Anwendung der Cut-Back Methode für gerade Wellenleiter bei 650 nm, Einkopplung mit monomodiger Faser, Auskopplung mit Multimodefaser.

Die großen Messwertstreuungen um 4 dB sind auf die optische Streuung bei der Kopplung der optischen Faser mit dem polymeren Wellenleiter zurückzuführen. Die gesägte Kante des Siliziumwafers und die Oberfläche des Wafers wirkten hier wie ein Spiegel. Weiterhin musste der zwischen Waferkante und lithografischer Kante bestehende und bei diesen Experimenten stark variierende Abstand (Tab. 6-3) mit Indexmatchingöl überbrückt werden.

6.3.2 Polymere Wellenleiter auf Siliziumphotodioden

Im nächsten Schritt wurden PMMA Wellenleiter auf Siliziumwafern mit integrierten Photodioden hergestellt. Abb. 6-15 zeigt die lichtmikroskopischen Aufnahmen der PMMA Wellenleiter auf einer Siliziumphotodiode.

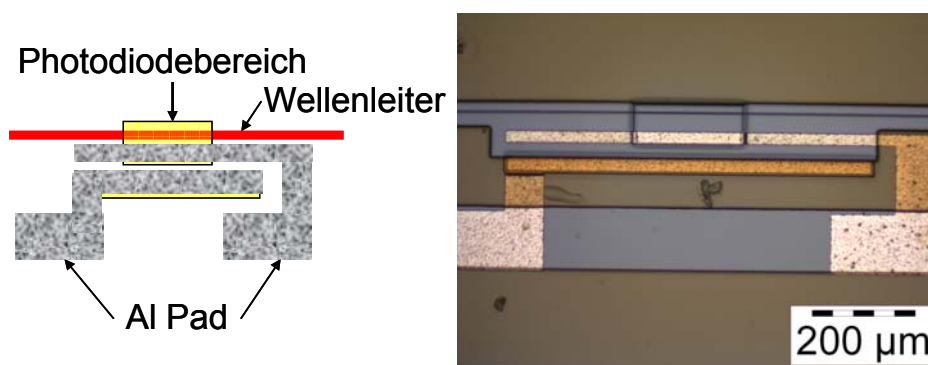


Abb. 6-15 Lichtmikroskopische Aufnahme eines PMMA Wellenleiters auf einer Siliziumphotodiode.

Es ist zu erkennen, dass der Wellenleiter über den photosensitiven Bereich der Siliziumphotodiode verläuft und zusätzlich die elektrischen Kontakte der Photodiode polymerfrei sind.

Um die Photodiodenansprechempfindlichkeit zu ermitteln, wurde eine Photodiode senkrecht von oben beleuchtet. Der eine elektrische Kontakt wurde über die Rückseite der Wafer hergestellt, der andere Kontakt über die in Abb. 6-15 gezeigten Kontakte auf der Vorderseite der Wafer. Hierfür wurde mit einer Metallspitze der elektrische Kontakt hergestellt. Abb. 6-16 zeigt den Messplatzaufbau der Photostrommessungen. Die Probe mit der zu messenden Photodiode ist auf dem Probetisch befestigt, das Licht wird durch eine optische Faser von oben eingekoppelt. Als Lichtquelle wurde ein Diodenlaser bei 650 nm verwendet.

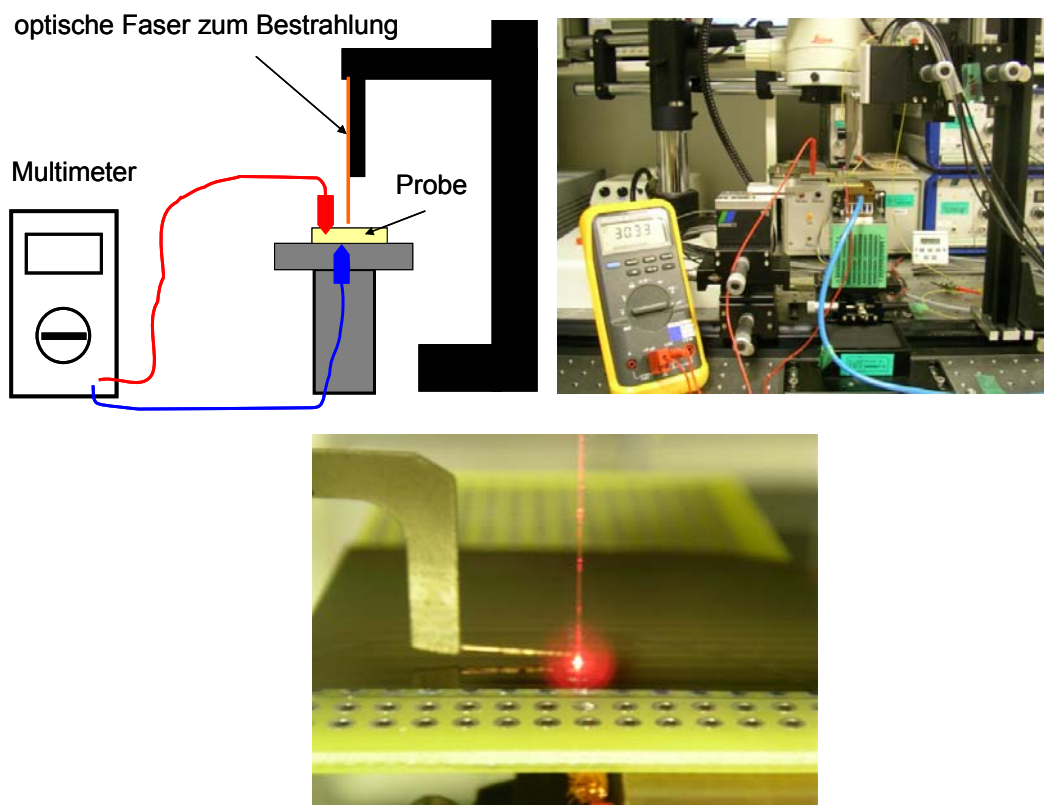


Abb. 6-16 Messplatzaufbau für die Photostrommessungen (oben links: Schematische Darstellung des Messplatzes, oben rechts: Foto des Messplatzes, unten: Oberfläche der Photodiode).

Der Photostrom der Siliziumphotodioden wurde mit dem Multimeter (Model 85, Fluke) gemessen. Der Photostrom wurde über dem Abstand des Faserendes über der Diodenoberfläche bestimmt.

Abb. 6-17 zeigt den Photostrom über dem Abstand zwischen dem Faserende und der Photodiode.

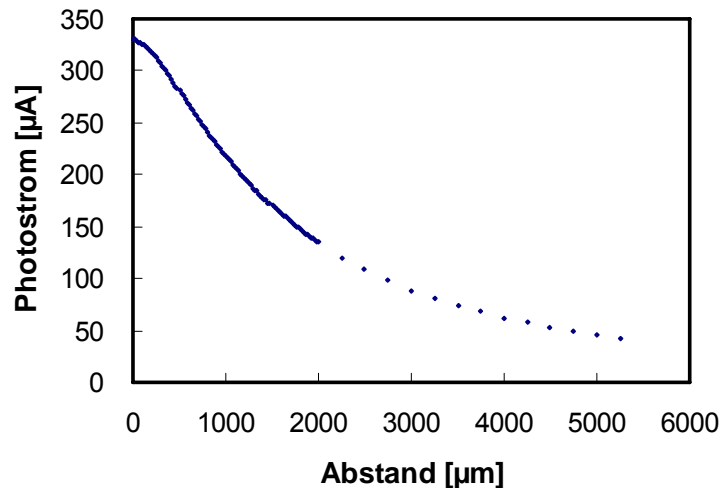


Abb. 6-17 Abhängigkeit des Photostroms vom Abstand zwischen der Faser und der Photodiode.

Es wurde eine Photodiode der Breite von $60\ \mu\text{m}$ und eine optische Faser von $4\ \mu\text{m}$ Kerndurchmesser mit einer numerischen Apertur von $0,13$ verwendet. Dabei wurde zwischen $0\ \mu\text{m}$ und $2000\ \mu\text{m}$ Abstand in Inkrementen von $20\ \mu\text{m}$ und für größere Abstände zur Photodiode in Inkrementen von $250\ \mu\text{m}$ gemessen.

Bei einem Abstand zwischen der Faser und der Photodiode von unter $200\ \mu\text{m}$ wird das gesamte Licht der Faser auf den Photodiodenbereich gestrahlt. Der maximale Photostrom wurde mit $330\ \mu\text{A}$ bei $1,138\ \text{mW}$ gemessen. Die Photodiodenansprechempfindlichkeit wurde damit mit $0,29\ \text{A/W}$ bei $650\ \text{nm}$ bestimmt. Abb. 6-18 zeigt die Bilder der Photodiode mit Kopplung zwischen optischer Faser und PMMA Wellenleiter ($10\ \mu\text{m}$ breit). Der Wellenleiter ist $4\ \text{cm}$ lang, auf halber Strecke des Wellenleiters befindet sich die Photodiode ($200\ \mu\text{m}$ lang und $60\ \mu\text{m}$ breit).

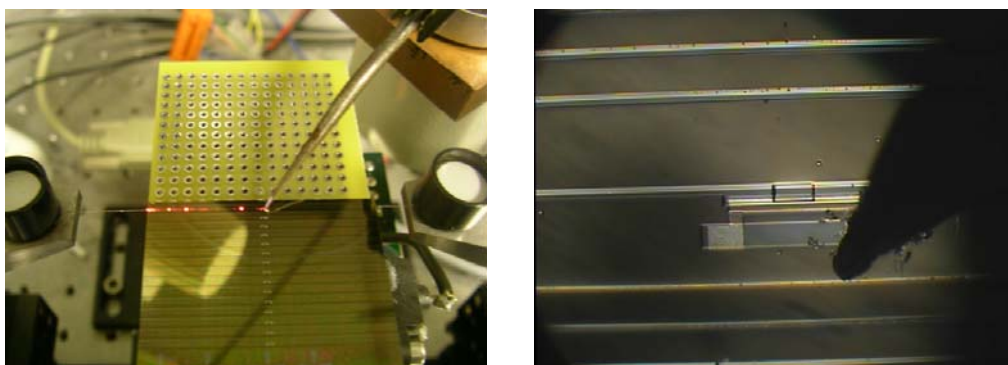


Abb. 6-18 Fotos der Photodiode bei Kopplung zwischen optischer Faser und PMMA Wellenleiter (links: Übersicht, rechts: Photodiodebereich mit elektrischem Kontaktarm).

Um die Effizienz der Kopplung der Wellenleiter an die Photodiode zu ermitteln, wurde von links die optische Glasfaser (4 μm Kern) mit dem PMMA Wellenleiter gekoppelt und von rechts der elektrische Kontakt der Photodiode über einen Kontaktarm erzeugt (siehe Abb. 6-18 rechts).

Abb. 6-19 zeigt den Photostrom gegen die Laserleistung bei Bestrahlung der Oberfläche der Photodiode sowie bei Bestrahlung über den Wellenleiter. Hierbei wurde die Photodiode mit einem Abstand von ca. 200 μm beleuchtet und dabei ein Photostrom von 315,4 μA gemessen. Ca. 22% der in den Wellenleiter eingekoppelten Lichtleistung konnte mit der Photodiode gemessen werden.

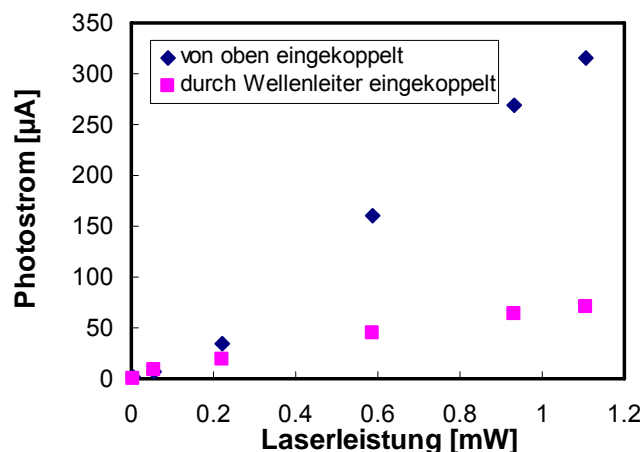


Abb. 6-19 Photostrom in Abhängigkeit von der Laserleistung.

Um die Zuverlässigkeit der Integration von Photodiode und Wellenleiter zu prüfen, wurden 3 Proben getestet. Tab. 6-4 zeigt das Vergleich des Photostroms der Proben. Die Laserleistung lag jeweils bei 1,1078 mW.

Probenummer	a) Max. Photostrom bei Bestrahlung von Oberfläche [μA]	b) Max. Photostrom bei Bestrahlung durch Wellenleiter [μA]	Verhältnis b/a [%]
1	282,7	67,4	23,8
2	302,5	66,6	22,0
3	315,4	70,0	22,2

Tab. 6-4: Vergleich des Photostroms der Proben.

Der maximale Photostrom der Photodiode wurde mit $300 \mu\text{A} \pm 15 \mu\text{A}$ bestimmt. Diese Abweichung kann auf die Photodiodenherstellung und auch die Bestrahlungsbedingung des Versuchsaufbaus zurückgeführt werden. Bei der Bestrahlung der Photodiode über deren Oberfläche mittels einer Faser (siehe Abb. 6-16) ist die Positionierung der Faser versuchstechnisch mit einem größeren Fehler behaftet. Der Photostrom bei der Einkopplung des Lichts über den Wellenleiter dagegen war relativ stabil.

Die Dämpfung der gesamten Wellenleiterstrecke von 4 cm inklusive der Kopplung in die Photodiode lag bei über 20 dB. Das heißt, das Ausgangslicht lag unter 1% des Eingangslichts. Die Verluste in gesamtem System werden in Abb. 6-20 schematisch dargestellt.

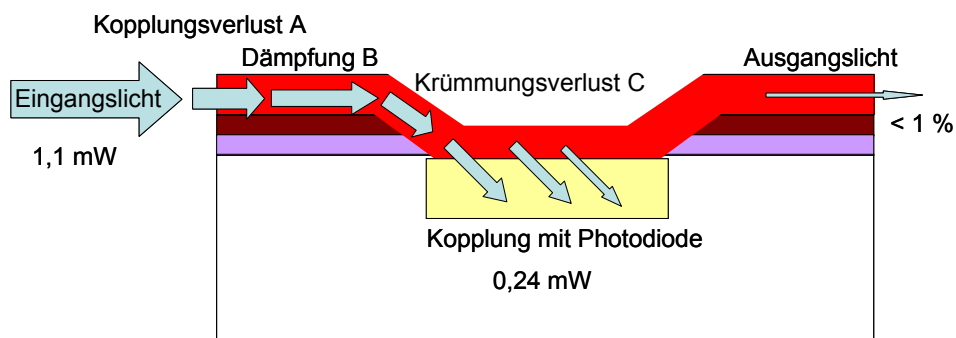


Abb. 6-20 Schematische Darstellung der optischen Verluste des Eingangslichts in über die gesamten Wellenleiterstrecke.

Die Photodiodenansprechempfindlichkeit wurde mit $0,29 \text{ A/W}$ bei 650 nm bestimmt. Bei $1,1 \text{ mW}$ Eingangsleistung wurde ein Photostrom von $70 \mu\text{A}$ gemessen. Damit wurde $0,24 \text{ mW}$ Lichtleistung (entsprechend ca. 22%) durch den Wellenleiter in die Photodiode eingekoppelt. Bei dieser Eingangsleistung kam es nicht zu einer Sättigung des Photostroms.

Die Verluste entlang des Wellenleiters wurden auf Grund der bisher erfolgten Messungen wie folgt klassifiziert:

- Kopplungsverlust A
- intrinsische Dämpfung B für 2 cm Wellenleiter
- Verlust für die Wellenleiterkrümmung vor dem Photodiodenbereich C (das Aufleuchten des Wellenleiters an den topologisch bedingten Krümmungen des Wellenleiters beim Abfall der SiO_2 -Doppelschicht wurde dafür abgeschätzt)

Für jeden Parameter wurden die besten (1), durchschnittlichen (2) und schlechtesten (3) Fälle abgeschätzt. Tab. 6-5 zeigt abgeschätzte Verluste in Wellenleiter mit Photodiode (Kapitel 6.3.1).

Fall	A: Kopplungsverlust [dB]	B: intrinsische Dämpfung [dB]	C: Krümmungsverlust [dB]	Lichtleistung vor Photodiode [mW]	Kopplungs- effizienz [%]
1	1,2	0,32	0,32	0,72	33
2	2,0	0,4	1,5	0,45	53
3	2,7	0,5	2,7	0,28	86

Tab. 6-5: Abgeschätzte Verluste in Wellenleiter mit Photodiode.

Der Kopplungsverlust A liegt im Bereich von 1,2-2,7 dB/Seite je nach der Qualität der gesägten Kante (siehe Abb. 6-14). Die intrinsische Dämpfung wurde nach Abb. 6-14 mit 0,16-0,25 dB/cm abgeschätzt. Diese intrinsische Dämpfung ist vergleichbar mit der von PMMA Wellenleitern aus Plattenmaterial (0,1 dB/cm bei 650 nm) [Rabus07]. Der Krümmungsverlust hängt von der Länge des Taperbereichs und des Profils ab [Mak89], [Baba90]. Die Länge der Taperbereich über 15 µm kann der Krümmungsverlust (0,2 dB) vernachlässigt werden [Mak89]. An den Krümmungsbereichen leuchten die Wellenleiter durch Abstrahlverluste der darin geführten Welle auf. Dieses Aufleuchten scheint in der Intensität vergleichbar zu sein zu dem über die 2 cm Länge des Wellenleiters beobachteten Aufleuchten. Daher wurde der Krümmungsverlust als mindestens so stark wie der intrinsische Verlust der Wellenleiter abgeschätzt und maximal wie der höchste gemessene Kopplungsverlust.

Je nach Leistungsverlust in der gesamten Strecke wurde damit die Kopplungseffizienz mit 30-90% abgeschätzt. Hiermit wurde erstmals der Nachweis der Integration von Siliziumphotodioden und PMMA Wellenleitern erbracht.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Prozessvariante zur Herstellung polymerer Wellenleiter durch UV-induzierte Brechzahländerung auf Siliziumsubstraten erarbeitet. Dieses Verfahren wurde bei der Integration von Wellenleitern mit Siliziumphotodioden eingesetzt.

Das verwendete Herstellungsverfahren basiert auf der lokalen Veränderung des Brechungsindex von Polymeren durch UV-Bestrahlung im kurzwelligen UV-Bereich. Die Strahlung verursacht hierbei eine Brechungsindexerhöhung, die man für die Wellenführung nutzen kann. Für die lokale Strukturierung von Wellenleitern wurden konventionelle UV-Lithographietechniken mit Chrommasken eingesetzt.

Um den Einfluss der Materialwahl auf das fotochemische Verhalten zu untersuchen, wurden verschiedene optische Polymere untersucht. Nur modifiziertes Acrylat (alicyklische Methacrylat Copolymer, OPTOREZ[®]) zeigte eine ausreichend große Brechzahländerung durch UV-Bestrahlung. Dieses neue Material besitzt einen höheren Brechungsindex ($n_{\text{OPTOREZ}} = 1,50-1,51$), eine höhere Glasübergangstemperatur ($T_{g, \text{OPTOREZ}} = 110^{\circ}\text{C}-130^{\circ}\text{C}$) und eine geringere Wasserabsorption als konventionelles Polymethylmethacrylat ($n_{\text{PMMA}} = 1,49$, $T_{g, \text{PMMA}} = 105^{\circ}\text{C}$). Bei der spektroskopischen Analyse wurde die fotochemische Reaktion von modifiziertem Acrylat mit IR-Spektroskopie untersucht. Durch UV-Bestrahlung wird die chemische Bindung in einer Carbonylgruppe gebrochen und eine neue ungesättigten C=C-Doppelbindungen erzeugt. Die Glasübergangstemperatur des Polymers sinkt mit zunehmender Dosis der UV-Bestrahlung. Nach $4,32 \text{ J/cm}^2$ Bestrahlung ist die Glasübergangstemperatur von OPTOREZ[®] immer noch höher als 107°C . Damit ist OPTOREZ[®] thermisch deutlich stabiler als PMMA ($T_{g, \text{PMMA}} = 105^{\circ}\text{C}$, ohne Bestrahlung). Erste Untersuchungen zur Immobilisierung von lebenden Zellen auf den Oberflächen von modifiziertem Acrylat wurden erfolgreich durchgeführt. Es konnte hierbei eine Zelladhäsion von L929 Fibroblasten auf den fotochemisch modifizierten Bereichen beobachtet werden. Das modifizierte Acrylat eignet sich also sowohl für die Herstellung von Wellenleitern als auch für die Immobilisierung von Zellen.

Aus den OPTOREZ[®]-Serien wurde OZ-1100 für die Herstellung von Wellenleitern ausgewählt und charakterisiert. Bestrahlungszeiten und Wellenlänge der Strahlung wurden hinsichtlich der optischen Eigenschaften der Wellenleiter optimiert. Es wurde gezeigt, dass im Spektrum der UV-Bestrahlung der kurzwellige Anteil entscheidend die Monomodigkeit und Dämpfung der Wellenleiter beeinflusst. Der Grund ist die geringere Eindringtiefe der Strahlung bei kürzeren Wellenlängen und die damit kleinere räumliche Ausdehnung der Wellenleiter. Mit einem Maskaligner EVG 620 und einer Bestrahlungsdosis von 3 J/cm^2 konnten monomodige Wellenleiter aus OZ-1100 mit einer geringen Dämpfung von $0,8 \text{ dB/cm}$ bei 1550 nm hergestellt werden. Die Werte für die Dämpfung sind vergleichbar mit denen für PMMA ($0,7 \text{ dB/cm}$ bei 1550 nm). Wellenleiter aus OZ-1100 waren auch bei 808 nm noch monomodig, bei einer Dämpfung von $0,6 \text{ dB/cm}$. Als erstes Beispiel für eine optische Komponente aus OZ-Material wurde ein Y-Verzweiger mit einem Öffnungswinkel von 1° hergestellt und bei 1550 nm charakterisiert. Die Aufteilung der Strahlung in die beiden Verzweigerarme war über den gesamten Spektralbereich gleichmäßig. Für beide Arme

wurde jeweils ein Verlust von ca. 4 dB gemessen. Unter Berücksichtigung der Kopplungsverluste und der intrinsischen Dämpfung im Wellenleiter konnte damit ein zusätzlicher Verlust u.a. durch Krümmung an der verzweigten Stelle von 1 dB bestimmt werden.

Weiterhin konnte die Integration der Polymerwellenleiter mit einer Siliziumphotodiode demonstriert werden. Wellenleiter wurden in PMMA auf einem SiO₂-beschichteten Siliziumwafer hergestellt und charakterisiert. Die Wellenleiter waren 10 µm breit und multimodig bei einer Wellenlänge von 635 nm. Für die Dämpfung wurden 0,16-0,25 dB/cm bei 650 nm gemessen. Der Kopplungsverlust von einer Faser zu dem Chip hängt von der Qualität der Kante ab, an der der Wafer abgesägt wurde. Die Kopplungsverluste betragen 1,2-2,7 dB/Seite. Diese Werte sind deutlich besser als früher berichtete Werte (1-1,2 dB/cm und 7 dB/Seite) für SU-8 Wellenleiter auf einem Siliziumwafer.

PMMA Wellenleiter wurden mit einer Siliziumphotodiode auf einem gemeinsamen Substrat integriert. Der Photostrom wurde gemessen und die Kopplungseffizienz wurde bestimmt. Die Unsicherheiten für die Verluste über die gesamte Länge der Wellenleiter lassen nur eine sehr grobe Abschätzung der Kopplungseffizienz zu, sie liegt zwischen 30% und 90%.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Entwicklung ist ein erster Schritt hin zur Realisierung von integrierten biophotonischen Sensoren, bei denen optische Wellenleiterstrukturen mit Detektoren und ggf. mit Lichtquellen integriert werden.

8 Literatur

- [Agra02] G. P. Agrawal: Fiber-Optic Communication Systems, John Wiley & Sons, Inc., New York (2002)
- [Baba90] T. Baba, Y. Kokubun: High efficiency light coupling from antiresonant reflecting optical waveguide to integrated photodetector using an antireflecting layer, Appl. Opt., Vol. 29, S. 2781-2792 (1990)
- [Bau00] H.-D. Bauer, W. Ehrfeld, M. Harder, T. Paatzsch, M. Popp, I. Smaglinski: Polymer waveguide devices with passive pigtail: an application of LIGA technology, Synth. Met., Vol. 115, S. 13-20 (2000)
- [Bäum05] S. Bäumer: Handbook of Plastic Optics, Wiley-VCH, Weinheim (2005)
- [Boot89] B. L. Booth: Low Loss Channel Waveguides in Polymers, J. Lightwave Techn., Vol. 7, S. 1445-1453 (1989)
- [Brün06] M. Bründel, P. Henzi, D. G. Rabus: Replication of Optical Rib Waveguide Structures using Nickel Shims, Proc. SPIE, Vol. 6185, 618508 (2006)
- [Brun96] S. Brunner, D. M. Rück, K. Tinschert, W. F. X. Frank, B. Knödler: Polymer based waveguiding structures obtained by ion beam irradiation at different energies, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, Vol. 107, S. 333-336 (1996)
- [Bryn02] E. Brynda, M. Houska, A. Brandenburg, A. Wikerstål: Optical biosensors for real-time measurement of analytes in blood plasma, Biosensors and Bioelectronics, Vol. 17, S. 665-675 (2002)
- [Buba93] M. Buback, H. P. Voegele: FT-NIR atlas, VCH -Weinheim (1993)
- [Chan74] E. A. Chandross, C. A. Pryde, W. J. Tomlinson, H. P. Weber: Photolocking - A new technique for fabricating optical waveguide circuits, Appl. Phys. Lett., Vol. 24, S. 72-74 (1974)
- [Choi88] J. O. Choi, J. A. Moore, J. C. Corelli, J. P. Silverman, H. Bakhrū: Degradation of poly(methylmethacrylate) by deep ultraviolet, x-ray, electron beam, and proton beam irradiations, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 6, S. 2286-2289 (1988)
- [Choi00] W.-S. Choi, F. W. Harris: Synthesis and polymerization of trifluorovinylether-terminated imide oligomers. I, Polymer, Vol. 41, S. 6213-6221 (2000)
- [Colo01] X. Colom, T. García, J. J. Suñol, J. Saurina, F. Carrasco: Properties of PMMA artificially aged, J. Non-Cryst. Solids, Vol. 287, S. 308-312 (2001)

- [Cris98] D. Cristea, F. Craciunoiu: Silicon Opto-FET Coupled to Waveguides for Integrated Optical Microsystems, Proc. SPIE, Vol. 3551, S. 63-74 (1998)
- [Cris99] D. Cristea, R. Muller, I. Pavelescu: Micromachined Photonic Integrated Circuits for Sensor Applications – Experimental Results, Proc. SPIE, Vol. 3680, S. 1141-1150 (1999)
- [Cris00] D. Cristea, F. Craciunoiu, M. Caldararu: Silicon Optoelectronic Integrated Circuits for MOEMS, Proc. SPIE, Vol. 4019, S. 516-525 (2000)
- [Cris01] D. Cristea, F. Craciunoiu, M. Modreanu, M. Caldararu, I. Cernica: Photonic Circuits Integrated with CMOS Compatible Photodetectors, Optical Materials, Vol. 17, S. 201-205 (2001)
- [Diem90] M. B. J. Diemeer, F. M. M. Suyten, E. S. Trommel, A. McDonach, J. M. Copeland, L. W. Jenneskens, W. H. G. Horsthuis: Photoinduced channel waveguide formation in nonlinear optical polymers, Electron. Lett., Vol. 26, S. 379-380 (1990)
- [Diem95] M. B. J. Diemeer, T. Boonstra, M. C. J. M. Donckers, A. M. van Haperen, B. H. M. Hams, T. H. Hoekstra, J. W. Hofstraat, J. C. Lamers, W. Y. Mertens, R. Ramsamoedj, M. van Rheede, F. M. M. Suijten, U. E. Wiersum, R. H. Woudenberg, B. Hendriksen, W. H. G. Horsthuis, H. M. M. Klein Koerkamp: Low-loss (non)linear optical polymeric waveguide materials and devices, Proc. SPIE, Vol. 2527, S. 411-415 (1995)
- [Ebel89] K. J. Ebeling: Integrierte Optoelektronik: Wellenleiter, Photonik, Halbleiter, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York (1989)
- [Elda96] L. Eldada, C. Xu, K. M. T. Stengel, L. W. Shacklette, J. T. Yardley: Laser-Fabricated Low-Loss Single-Mode Raised-Rib Waveguiding Devices in Polymers, J. Lightwave Technol., Vol. 14, S. 1704-1713 (1996)
- [Elda00] L. Eldada, L. W. Shacklette: Advances in Polymer Integrated Optics, IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., Vol. 6, S. 54-68 (2000)
- [Erman88] M. Erman, P. Jarry, R. Gamonal, J.-L. Gentner, P. Stephan, C. Guedon: Monolithic Integration of a GaInAs p-i-n Photodiode and an Optical Waveguide: Modeling and Realization Using Chloride Vapor Phase Epitaxy, J. Lightwave Technol., Vol. 6, S. 399-412 (1988)
- [EVG03] EV Group: User Manual EVG[®] 620 (2003)
- [Fisch97] G. Fischbeck, R. Moosburger, C. Kostrzewa, A. Achen, K. Petermann: Singlemode optical waveguides using a high temperature stable polymer with low losses in the 1.55 μm range, Electron. Lett., Vol. 33, S. 518-519 (1997)

- [Fran84] H. Franke: Optical recording of refractive-index patterns in doped poly-(methyl methacrylate) films, *Appl. Opt.*, Vol. 23, S. 2729-2733 (1984)
- [Frank92] W. F. Frank, A. Schösser, S. Brunner, F. Linke, T. K. Stempel, M. Eich: Optical Properties of Waveguiding Structures in Polymers, *Proc. SPIE*, Vol. 1774, S. 268-277 (1992)
- [Fuen05] P. de la Fuente, J. A. Etxeberria, J. Berganzo, J. M. Ruano-López, M. T. Arroyo, E. Castaño, F.J. Gracia: End-fire coupling of a SU-8 waveguide to a silicon mesa photodiode: Integrability in an optical analysis microsystem, *Sens. Actuators A*, Vol. 123-124, S. 313-318 (2005)
- [Gill06] S. E. Gillett, W. H. Lehr, C. A. Osorio: Municipal electric utilities' role in telecommunications services, *Telecommunications Policy*, Vol. 30, S. 464-480 (2006)
- [Golo07] G. Golojuch, U. Hollenbach, T. Mappes, J. Mohr, A. Urbanczyk, W. Urbanczyk: Investigation of birefringence in PMMA channel waveguides inscribed with DUV radiation, *angenommen in Microsystem technologies*
- [Groh88] W. Groh: Overtone absorption in macromolecules for polymer optical fibers, *Makromol. Chem.*, Vol. 189, S. 2861-2874 (1988)
- [Gup80] A. Gupta, R. Liang, F. D. Tsay, J. Moacanin: Characterization of a Dissociative Excited State in the Solid State: Photochemistry of Poly(methyl methacrylate). *Photochemical Processes in Polymeric Systems. 5*, *Macromolecules*, Vol. 13, S. 1696-1700 (1980)
- [Günz02] H. Günzler, H.-U. Gremlich: *IR Spectroscopy An Introduction*, WILEY-VCH, Weinheim (2002)
- [Henz04] P. Henzi: UV-induzierte Herstellung monomodiger Wellenleiter in Polymeren: Dissertation Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH) (2004)
- [Henz06] P. Henzi, K. Bade, D. G. Rabus, J. Mohr: Modification of polymethylmethacrylate by deep ultraviolet radiation and bromination for photonic applications, *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 24, S. 1755–1761 (2006)
- [Hesse02] M. Hesse, H. Meier, B. Zeeh: *Spektroskopische Methoden in der organischen Chemie*, 6 überarb. Auflage. Stuttgart, New York, Thieme (2002)
- [Holl07] U. Hollenbach, H.-J. Boehm, J. Mohr, L. Ross, D. Samiec: UV Light Induced Single Mode Waveguides in Polymer for Visible Range Applications, *ECIO*, April 25-27, 2007, Copenhagen, THD3 (2007)

- [Horn93] L. A. Hornak, T. W. Weidman: Propagation loss of index imaged poly(cyclohexylsilyne) thin film optical waveguides, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 62, S. 913-915 (1993)
- [Humm91] D. O. Hummel: *Atlas der Polymer- und Kunststoffanalyse*; 3. Auflage, Munich, Vienna, Hanser (1991)
- [Ichi06a] Y. Ichihashi, P. Henzi, M. Bruendel, D. G. Rabus, J. Mohr: Material Investigation of Alicyclic Methacrylate Copolymer for Polymer Waveguide Fabrication, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 45, S. 2572-2575 (2006)
- [Ichi06b] Y. Ichihashi, P. Henzi, M. Bruendel, A. Welle, D. G. Rabus, J. Mohr: Novel Polymer Waveguides Consisting of an Alicyclic Methacrylate Copolymer, *Proc. SPIE*, Vol. 6183, 618307 (2006)
- [Ichi06c] Y. Ichihashi, P. Henzi, M. Bruendel, D. G. Rabus, J. Mohr: Influence of Exposure Spectra on Optical Properties of Alicyclic Methacrylate Copolymer Waveguides Fabricated by Deep UV Exposure, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 45, S. 6654-6657 (2006)
- [Ichi07] Y. Ichihashi, P. Henzi, M. Bruendel, J. Mohr, D. G. Rabus: Polymer waveguides from alicyclic methacrylate copolymer fabricated by deep-UV exposure, *Opt. Lett.*, Vol. 32, S. 379-381 (2007)
- [Ide02] F. Ide: *Tokusei betsuni wakaruru koubunshi zairyou* (Japanisch) "Practical polymer materials classified by their properties", *Kougyou Chyousa Kai* (2002)
- [Jäg96] M. Jäger, G. I. Stegeman, W. Brinker, S. Yilmaz, S. Bauer, W. H. G. Horsthuis, G. R. Möhlmann: Comparison of quasi-phase-matching geometries for second-harmonic generation in poled polymer channel waveguides at 1.5 μm , *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 68, S. 1183-1185 (1996)
- [Kai85] T. Kaino: Influence of water absorption on plastic optical fibers, *Appl. Opt.*, Vol. 24, S. 4192-4195 (1985)
- [Kang01] J.-W. Kang, J.-S. Kim, J.-J. Kim: Optimized Oxygen Plasma Etching of Polycarbonate for Low-Loss Optical Waveguide Fabrication, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 40, S. 3215-3219 (2001)
- [Kang02] J.-W. Kang, J.-J. Kim, J. Kim, X. Li, M.-H. Lee: Low-Loss and Thermally Stable TE-Mode Selective Polymer Waveguide Using Photosensitive Fluorinated Polyimide, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 14, S. 1297-1299 (2002)
- [Kawa97] H. Kawai, M. Suzuki, A. Yoshida: Birefringence-free Optical Polymers OPTOREZ[®] OZ-1300 Series, *Hitachi Chemical Technical Report*, No. 28, S. 21-24 (1997)

- [Kers75] R. T. Kersten: The prism-film coupler as a precision instrument Part I. Accuracy and capabilities of prism couplers as instruments, *Optica Acta*, Vol. 22, S. 503-513 (1975)
- [Kim99] J. H. Kim, E. J. Kim, H. C. Choi, C. W. Kim, J. H. Cho, Y. W. Lee, B. G. You, S. Y. Yi, H. J. Lee, K. Han, W. H. Jang, T. H. Rhee, J. W. Lee, S. J. Pearton: Evaluation of fluorinated polyimide etching processes for optical waveguide fabrication, *Thin Solid Films*, Vol. 341, S. 192-195 (1999)
- [Klein94] R. Klein, A. Neyer: Silicon micromachining for micro-replication technologies, *Electron. Lett.*, Vol. 30, S. 1672-1674 (1994)
- [Koba98] J. Kobayashi, T. Matsuura, S. Sasaki, T. Maruno: Single-mode optical waveguides fabricated from fluorinated polyimides, *Appl. Opt.*, Vol. 37, S. 1032-1037 (1998)
- [Kota79] H. Kotani, M. Kawabe, S. Namba: Direct Writing of Gratings by Electron Beam in Poly(methyl methacrylate) Optical Waveguides, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 18, S. 279-283 (1979)
- [Krag98] H. Kragl, R. Hohmann, C. Marheine, W. Pott, G. Pompe, A. Neyer, T. Diepold, E. Obermeier: Integrated optic polymeric components fabricated with microstructured strip-off covers, *Electron. Lett.*, Vol. 33, S. 1396-1397 (1998)
- [Krevel90] D. W. Van Krevelen: Properties of Polymers, their correlation with chemical structure; their numerical estimation and prediction from additive group contributions, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo (1990)
- [Kuli88] J. R. Kulish, H. Franke, A. Singh, R. A. Lessard, E. J. Knystautas: Ion implantation, a method for fabricating light guides in polymers, *J. Appl. Phys.*, Vol. 63, S. 2517-2521 (1988)
- [Kuli90] J. Kulisch, H. Franke: Fabrication of Lightguides in In-Diffused Bulk PMMA, *Appl. Phys. A*, Vol. 50, S. 425-430 (1990)
- [Kunz97] R. E. Kunz: Miniature integrated optical modules for chemical and biochemical sensing, *Sens. Actuators B*, Vol. 38-39, S. 13-28 (1997)
- [Kuro78] T. Kurokawa, N. Takato, S. Oikawa, T. Okada: Fiber optic sheet formation by selective photopolymerization, *Appl. Opt.*, Vol. 17, S. 646-650 (1978)
- [Kuro80] T. Kurokawa, N. Takato, Y. Katayama: Polymer optical circuits for multimode optical fiber systems, *Appl. Opt.*, Vol. 19, S. 3124-3129 (1980)
- [Liu01] H. Y. Liu, G. D. Peng, P. L. Chu, Y. Koike, Y. Watanabe: Photosensitivity in low-loss perfluoropolymer (CYTOP) fibre material, *Electron. Lett.*, Vol. 37, S. 347-348 (2001)

- [Ma02] H. Ma, A. K.-Y. Jen, L. R. Dalton: Polymer-Based Optical Waveguides: Materials, Processing, and Devices, *Adv. Mater.*, Vol. 14, S. 1339-1365 (2002)
- [Mak89] G. Mak, D. M. Bruce, P. E. Jessop: Waveguide-detector couplers for integrated optics and monolithic optoelectronic switching arrays, *Appl. Opt.*, Vol. 28, S. 4629-4636 (1989)
- [Mand06] K. Mandisloh, S. Achenbach, T. Mappes, T. Rogge, R. Truckenmüller: Submicron Polymer Flow Cells, *Proc. of ASME ICNMM2006*, 4th Internat. Conf. on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, Limerick, IRL, June 19-21, 2006, ICNMM2006-96147 (2006)
- [Mapp06] T. Mappes, S. Achenbach, J. Mohr: Hochauflösende Röntgenlithografie zur Herstellung polymerer Submikrometerstrukturen mit großem Aspektverhältnis, FZKA 7215, Forschungszentrum Karlsruhe (2006)
- [Matsu93] T. Matsuura, S. Ando, S. Matsui, S. Sasaki, F. Yamamoto: Heat-resistant singlemode optical waveguides using fluorinated polyimides, *Electron. Lett.*, Vol. 29, S. 2107-2109 (1993)
- [Merm04] J.-M. Mermet, M. Otto, M. Valcárcel, R. Keller, H. M. Widmer: *Analytical Chemistry, A modern Approach to Analytical Science*, Second Edition, WILEY-VCH Verlag, Weinheim (2004)
- [Möhl94] G. R. Möhlmann: Polymeric optochips: splitters, switches and modulators, *Synth. Met.*, Vol. 67, S. 77-80 (1994)
- [Moor91] J. A. Moore, J. O. Choi: Degradation of Poly(methyl methacrylate) by Deep UV, X-ray, Electron-Beam, and Proton-Beam Irradiation, *ACS Symposium Series Nr. 475, Radiation Effects on Polymers*, S. 156-192, American Chemical Society, Washington DC (1991)
- [Müll00] L. Müller: Polymere für in Abformtechnik hergestellte Integriert-Optische Lichtleiter, *Fortschr. Ber. VDI Reihe 5*, Nr. 577 Düsseldorf, VDI Verlag (2000)
- [Naka94] K. Nakagawa, T. Kowalewski, C. W. Phelps, D. L. Rode, R. R. Krchnavek: Optical channel waveguides based on photo-polymerizable di/tri acrylates, *Proc. SPIE*, Vol. 2153, S. 208-217 (1994)
- [Nath03] M. Nathan, O. Levy, I. Goldfarb, A. Ruzin: Monolithic coupling of a SU8 waveguide to a silicon photodiode, *J. Appl. Phys.*, Vol. 94, S. 7932-7934 (2003)
- [Ney93] A. Neyer, T. Knoche, L. Müller: Fabrication of low loss polymer waveguides using injection moulding technology, *Electron. Lett.*, Vol. 29, S. 399-401 (1993)

- [Phel97] C. W. Phelps, T. S. Barry, D. L. Rode, R. R. Krchnavek: Low-Loss, Single-Mode Organic Polymer Waveguides Utilizing Refractive Index Tailoring, *J. Lightwave Technol.*, Vol. 15, S. 1900-1905 (1997)
- [Prue06] M. W. Pruessner, N. Siwak, K. Amarnath, S. Kanakaraju, W.-H. Chuang, R. Ghodssi: End-coupled optical waveguide MEMS devices in the indium phosphide material system, *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 16, S. 832-842 (2006)
- [Rabus05] D. G. Rabus, P. Henzi, J. Mohr: Photonic Integrated Circuits by DUV-Induced Modification of Polymers, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 17, S. 591-593 (2005)
- [Rabus07] D. G. Rabus, M. Bruendel, Y. Ichihashi, A. Welle, R. A. Seger, M. Isaacson: A Bio-Fluidic-Photonic Platform Based on Deep UV Modification of Polymers, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, Vol. 13, S. 214-222 (2007)
- [Reu88] R. Reuter, H. Franke, C. Feger: Evaluating polyimides as lightguide materials, *Appl. Opt.*, Vol. 27, S. 4565-4571 (1988)
- [Roch89] K. B. Rochford, R. Zanoni, Q. Gong, G. I. Stegeman: Fabrication of integrated optical structures in polydiacetylene films by irreversible photoinduced bleaching, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 55, S. 1161-1163 (1989)
- [Ruan06] J. M. Ruano-López, M. Aguirregabiria, M. Tijero, M. T. Arroyo, J. Elizalde, J. Berganzo, I. Aranburu, F. J. Blanco, K. Mayora: A new SU-8 process to integrate buried waveguides and sealed microchannels for a Lab-on-a-Chip, *Sens. Actuators B*, Vol. 114, S. 542-551 (2006)
- [Schm00] W. Schmidt: *Optische Spektroskopie: 2. Auflage – Weinheim, WILEY-VCH* (2000)
- [Schö95] A. Schösser, B. Knödler, T. Tschudi, W. F. X. Frank, A. Stelmaszyk, D. Muschert, D. Rück, S. Brunner, F. Pozzi, S. Morasca, C. de Bernardi: Optical components in polymers, *Proc. SPIE*, Vol. 2540, S. 110-117 (1995)
- [Schö96] A. Schösser, T. Tschudi, W. F. X. Frank, F. Pozzi: Spectroscopic Study of Surface Effects in Polymer Waveguides Generated by Ionizing Radiation Related to Guiding Properties, *Proc. SPIE*, Vol. 2851, S. 73-81 (1996)
- [Stre02] U. Streppel, P. Dannberg, C. Wächter, A. Bräuer, L. Fröhlich, R. Houbertz, M. Popall: New wafer-scale fabrication method for stacked optical waveguide interconnects and 3D micro-optic structures using photoresponsive (inorganic-organic hybrid) polymers, *Optical Materials*, Vol. 21, S. 475-483 (2002)
- [Taka82] N. Takato, T. Kurokawa: Polymer waveguides star coupler, *Appl. Opt.*, Vol. 21, S. 1940-1942 (1982)

- [Take92] Y. Takezawa, N. Taketani, S. Tanno, S. Ohara: Empirical Estimation Method of Intrinsic Loss Spectra in Transparent Amorphous Polymers for Plastic Optical Fibers, *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 46, S. 1835-1841 (1992)
- [Tami82] T. Tamir: *Topics in Applied Physics*, Vol. 7, *Integrated Optics*, 2nd edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (1982)
- [Tien69] P. K. Tien, R. Ulrich, R. J. Martin: Modes of propagating light waves in thin deposited semiconductor films, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 14, S. 291-294 (1969)
- [Todd60] A. Todd: The Mechanisms of Radiation-Induced Changes in Vinyl Polymers, *J. Polym. Sci.*, Vol. 42, S. 223-247 (1960)
- [Tom99] D. Tomić, A. Mickelson: Photobleaching for optical waveguide formation in a guest-host polyimide, *Appl. Opt.*, Vol. 38, S. 3893-3903 (1999)
- [Toml70] W. J. Tomlinson, I. P. Kaminow, E. A. Chandross, R. L. Fork, W. T. Silfvast: Photoinduced Refractive Index Increase in Poly(methylmethacrylate) and Its Applications, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 16, S. 486-489 (1970)
- [Ulri73] R. Ulrich, R. Torge: Measurement of Thin Film Parameters with a Prism Coupler, *Appl. Opt.*, Vol. 12, S. 2901-2908 (1973)
- [Unge92] H.-G. Unger: *Optische Nachrichtentechnik, Teil 1: Optische Wellenleiter*, Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg (1992)
- [Unge93] H.-G. Unger: *Optische Nachrichtentechnik, Teil 2: Komponenten, Systeme, Messtechnik*, Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg (1993)
- [Van91] T. E. Van Eck, A. J. Ticknor, R. S. Lytel, G. F. Lipscomb: Complementary optical tap fabricated in an electro-optic polymer waveguide, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 58, S. 1588-1590 (1991)
- [Vörö00] J. Vörös, R. Graf, G. L. Kenausis, A. Bruinink, J. Mayer, M. Textor, E. Wintermantel, N. D. Spencer: Feasibility study of an online toxicological sensor based on the optical waveguide technique, *Biosens. Bioelectron.*, Vol. 15, S. 423-429 (2000)
- [Wata97] O. Watanabe, M. Tsuchimori, A. Okada, H. Ito: Mode selective polymer channel waveguide defined by the photoinduced change in birefringence, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 71, S. 750-752 (1997)
- [Web72] H. W. Weber, R. Ulrich, E. A. Chandross, W. J. Tomlinson: Light-Guiding Structures of Photoresist Films, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 20, S. 143-145 (1972)
- [Well02] A. Welle, E. Gottwald: UV-Based Patterning of Polymeric Substrates for Cell Culture Applications, *Biomedical Microdevices*, Vol. 4, S. 33-41 (2002)

-
- [Wer88] G. Werner: Overtone absorption in macromolecules for polymer optical fibers, *Makromol. Chem.*, Vol. 189, S. 2861-2784 (1988)
- [Woch00] C. Wochnowski, S. Metev, G. Sepold: UV-laser-assisted modification of the optical properties of polymethylmethacrylate, *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 154-155, S. 706-711 (2000)
- [Wund92] S. Wunderlich, J. P. Schmidt, J. Müller: Integration of SiON waveguides and photodiodes on silicon substrates, *Appl. Opt.*, Vol. 31, S. 4186-4189 (1992)
- [Ymet02] A. Ymeti, J. S. Kanger, R. Wijn, P. V. Lambeck, J. Greve: Development of a multichannel integrated interferometer immunosensor, *Sens. Actuators B*, Vol. 83, S. 1-7 (2002)
- [Yurt05] N. Yurt, K. Mune, R. Naito, T. Fukuoka, A. Mochizuki, K. Mastumoto, G. Meredith, N. Peyghambarian, G. E. Jabbour: Fabrication and Characterization of Low-Loss Optical Waveguides Using a Novel Photosensitive Polyimide, *J. Lightwave Technol.*, Vol. 23, S. 1291-1294 (2005)
- [Zhao00] Y.-G. Zhao, W.-K. Lu, Y. Ma, S.-S. Kim, S. T. Ho, T. J. Marks: Polymer waveguides useful over a very wide wavelength range from the ultraviolet to infrared, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 77, S. 2961-2963 (2000)
- [Zhou02] M. Zhou: Low-loss polymeric materials for passive waveguide components in fiber optical telecommunication, *Opt. Eng.*, Vol. 41, S. 1631-1643 (2002)

9 Publikationsliste

1. Y. Ichihashi, P. Henzi, M. Bruendel, D. G. Rabus and J. Mohr: Fabrication of Novel Polymer Waveguides Consisting of Alicyclic Methacrylate Copolymers by Deep UV Exposure, *Proc. 11th Microoptics Conference, Tokyo*, (2005) 130-131
2. D. G. Rabus, P. Henzi, M. Bruendel, H. Hein, Y. Ichihashi, T. Rogge and A. Welle: Polymer Photonic Integrated Circuits by DUV-induced Modification, *Proc. of SPIE* **6123** (2006) 61230I
3. Y. Ichihashi, P. Henzi, M. Bruendel, D. G. Rabus and J. Mohr: Material Investigation of Alicyclic Methacrylate Copolymer for Polymer Waveguide Fabrication, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) 2572-2575
4. Y. Ichihashi, P. Henzi, M. Bruendel, A. Welle, D. G. Rabus and J. Mohr: Novel Polymer Waveguides Consisting of an Alicyclic Methacrylate Copolymer, *Proc. of SPIE* **6183** (2006) 618307
5. P. Henzi, D. G. Rabus, Y. Ichihashi, M. Bruendel and J. Mohr: Photonic Integrated Polymer Components and Circuits by UV-Induced Refractive Index Modification, *Proc. of SPIE* **6185** (2006) 618502
6. Y. Ichihashi, P. Henzi, M. Bruendel, D. G. Rabus and J. Mohr: Influence of Exposure Spectra on Optical Properties of Alicyclic Methacrylate Copolymer Waveguides Fabricated by Deep UV Exposure, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) 6654-6657
7. D. G. Rabus, A. Welle, R. A. Seger, Y. Ichihashi, M. Bruendel, J. Hieb and M. Isaacson: Determination of living cell characteristics and behavior using biophotonic methods, *Proc. of SPIE* **6329** (2006) 63290H
8. Y. Ichihashi, D. Cristea, M. Kusko, D. G. Rabus, T. Mappes and J. Mohr: Integrated Silicon Photodiodes with Polymer (PMMA) Waveguides for Optical Interconnections and Sensing Applications, *Proc. EOS Topical Meeting on Micro-Optics, Diffractive Optics and Optical MEMS (TOM 4), Paris*, (2006) 39-40
9. M. Bruendel, P. Henzi, D. G. Rabus, Y. Ichihashi and J. Mohr: Herstellung integrierter polymer Wellenleiter durch UV-induzierte Brechzahländerung, *Proc. ORT 2006, 9. Workshop "Optik der Rechentechnik", Siegen*, (2006) 90-97
10. Y. Ichihashi, D. G. Rabus, M. Bruendel and J. Mohr: Fabrication and Characterization of Polymer Waveguides from Alicyclic Methacrylate Copolymer, *Proc. 5th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication, Nara*, (2006) 7PS2-17, 143-144
11. D. G. Rabus, M. Bruendel, Y. Ichihashi, A. Welle, R. A. Seger and M. Isaacson: A Bio-Fluidic-Photonic Platform Based on Deep UV Modification of Polymers, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, **13** (2007) 214-222

12. Y. Ichihashi, P. Henzi, M. Bruendel, J. Mohr and D. G. Rabus: Polymer waveguides from alicyclic methacrylate copolymer fabricated by deep-UV exposure, *Opt. Lett.*, **32** (2007) 379-381
13. D. G. Rabus, L. DeLouise and Y. Ichihashi: Enhancement of the evanescent field using polymer waveguides fabricated by deep UV exposure on mesoporous silicon, *Opt. Lett.*, **32** (2007) 2843-2845
14. M. Bruendel, Y. Ichihashi, J. Mohr, M. Punke, D. G. Rabus, M. Worgull, V. Saile: Photonic Integrated Circuits fabricated by Deep UV and Hot Embossing, *Proc. LEOS Summer Topical Meetings 2007*, Portland, (2007) TuB2.6 105-106
15. R. A. Seger, D. G. Rabus, Y. Ichihashi, M. Bruendel, J. Hieb, M. S. Isaacson: Monitoring Fluorescence in Cultured Neural Networks using Polymer Waveguide Excitation, *Proc. LEOS Summer Topical Meetings 2007*, Portland, (2007) TuB3.4 113-114