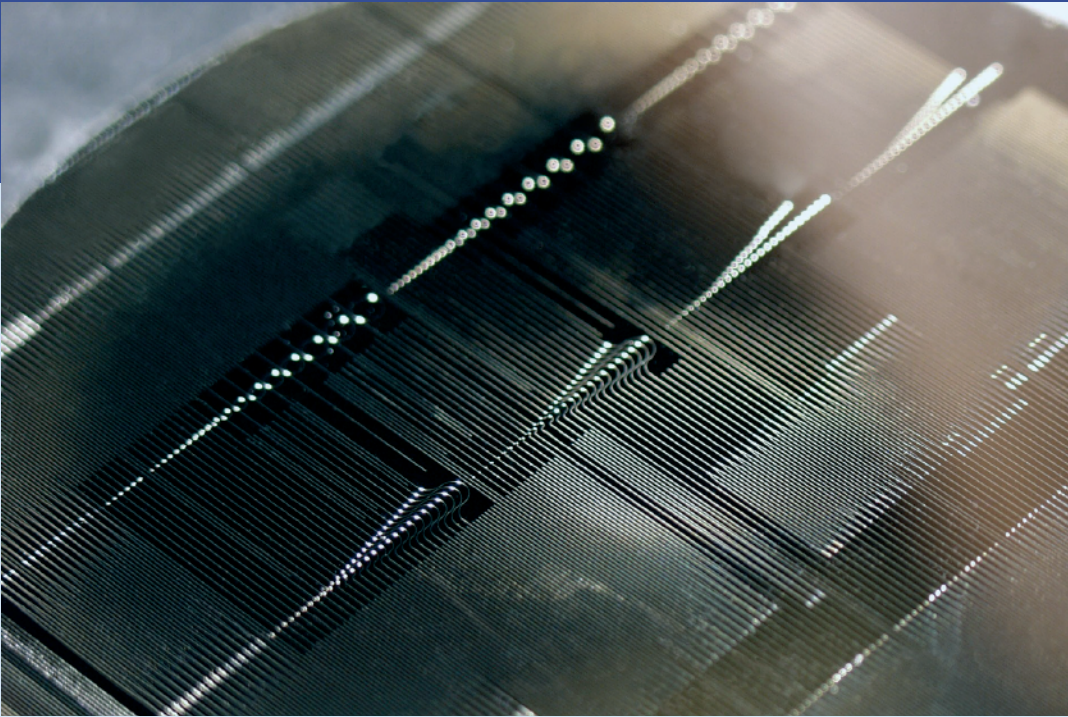
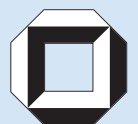


Mathias Bründel



Herstellung photonischer Komponenten
durch Heißprägen und UV-induzierte
Brechzahlmodifikation von PMMA



Mathias Bründel

**Herstellung photonischer Komponenten durch Heißprägen und
UV-induzierte Brechzahlmodifikation von PMMA**

Herstellung photonischer Komponenten durch Heißprägen und UV-induzierte Brechzahlmodifikation von PMMA

von
Mathias Bründel



universitätsverlag karlsruhe

Dissertation, Universität Karlsruhe (TH)
Fakultät für Maschinenbau, 2008

Hauptreferent: Prof. Dr. Volker Saile
Korreferent: Prof. Dr. Uli Lemmer
Tag der mündlichen Prüfung: 24.01.2008

Impressum

Universitätsverlag Karlsruhe
c/o Universitätsbibliothek
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe
www.uvka.de



Dieses Werk ist unter folgender Creative Commons-Lizenz
lizenziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/de/>

Universitätsverlag Karlsruhe 2008
Print on Demand

ISBN: 978-3-86644-221-4

Für meine Eltern.

Kurzreferat

Im Rahmen der Arbeit wurde eine Technologie zur Herstellung von stark führenden photonischen Komponenten aus Poly(methylmethacrylat) (PMMA) erarbeitet. Als Strukturierungsprozess wurde das Heißprägen eingesetzt, die die Erzeugung einer wellenleitenden Kernschicht erfolgte durch UV-induzierte Brechzahlmodifikation. Eine Besonderheit stellte die Verwendung von Shim-Formeinsätzen zur Abformung dar, deren Herstellung auf Basis von Röntgen- und UV-Lithografie ein Schwerpunkt der Arbeit war.

Auf Basis des entwickelten Herstellungsverfahrens wurden gerade Rippenwellenleiter, multimodige Interferenzkoppler sowie Ringresonatoren realisiert und charakterisiert. Es konnte die prinzipielle Eignung des Prozesses für die Erzeugung monomodiger Strukturen für den nahen Infrarotbereich nachgewiesen werden. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen weiterhin der Verbesserung des verwendeten Simulationsmodelles. Es wurde in der Arbeit eine Abhängigkeit der optischen Eigenschaften der Rippenwellenleiter vom Strukturierungsprozess experimentell nachgewiesen.

Einen weiteren Schwerpunkt bildete die Herstellung von Bragg-Resonatoren auf PMMA-Substraten zur Herstellung von organischen DFB-Lasern. Sowohl heißgeprägte als auch lithografisch strukturierte Gitter zeigten nach Aufdampfen des aktiven Materials Alq₃:DCM Laserverhalten. Auf heißgeprägten Gittern basierende DFB-Laser konnten zudem in auf demselben Substrat strukturierte polymere Wellenleiter eingekoppelt werden.

Abstract

This work was aimed at developing a technology for manufacturing strongly guiding photonic waveguide components from poly-methylmethacrylate (PMMA). For replicating the waveguides, shim mold inserts produced by X-ray and UV lithography were used for hot emboss molding. The core layer of the waveguide is then generated by modifying the material's refractive index using UV-light.

Using the manufacturing technique developed, straight rib waveguides, multi-mode interference couplers, and ring resonators were fabricated and characterized. The process was found to be principally suitable for the production of single mode structures for the near infrared spectrum (NIR). Based on the findings obtained, the applied simulation model could be improved. It was experimentally demonstrated that the optical properties of rib waveguides depend on the structuring process used.

In addition, Bragg resonators on PMMA substrates were produced for organic DFB lasers. Gratings structured by both hot embossing and lithography exhibited laser characteristics after the vapor deposition of the active material Alq₃:DCM. DFB lasers based on hot-embossed gratings were successfully coupled with polymer waveguides structured on the same substrate.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen	5
2.1	Photonische Bauelemente	5
2.1.1	Wellenleitung	5
2.1.2	Streifen- und Rippenwellenleiter	9
2.1.3	Multimodige Interferenzkoppler	10
2.1.4	Ringresonatoren	11
2.1.5	Organische Distributed Feedback (DFB)–Laser	13
2.2	Herstellungstechnologien	16
2.2.1	Fotolithografie	16
2.2.2	Shim-Galvanik	17
2.2.3	Abformung durch Vakuumheißprägen	18
2.2.4	Grundlagen der Haftung	19
2.2.5	Brechzahlmodifikation von Polymeren	20
3	Herstellung photonischer Strukturen	23
3.1	Simulation der Wellenleitergeometrie	24
3.2	Resisttechnik	26
3.2.1	Resisttechnik für UV–Lithografie	26
3.2.2	Resisttechnik für Röntgenlithografie	30
3.3	Galvanik	31
3.3.1	Metallisierung nach der Resiststrukturierung über alle Strukturen	31
3.3.2	Metallisierung des Substrates vor dem Aufschleudern des Resists	32
3.3.3	Verwendung von hoch n-dotierten Si–Substraten	33
3.4	Abformung	34
3.4.1	Fixierung der Shim-Formeinsätze	34
3.4.2	Abformung der photonischen Strukturen	41
3.5	Brechzahlmodifikation durch DUV–Bestrahlung	44

3.6	Vereinzeln der Strukturen	45
3.7	Herstellung von DFB–Resonatoren für wellenleitergekoppelte Laser . . .	48
3.7.1	Herstellung von Resonatoren durch Heißprägen	48
3.7.2	Herstellung von Resonatoren durch DUV–Lithografie	52
4	Charakterisierung der photonischen Strukturen	55
4.1	Messtechnik zur Wellenleitercharakterisierung	55
4.1.1	Dämpfungsmessung	55
4.1.2	Nahfeldmessung	56
4.1.3	Brechzahlbestimmung	58
4.2	Gerade Rippenwellenleiter	59
4.2.1	Bestimmung der Wellenleiterdämpfung	59
4.2.2	Ermittlung der Modencharakteristik	59
4.3	Kopplerstrukturen	65
4.4	Ringresonatoren	67
4.5	Organische DFB-Laser	69
4.6	Komponenten für die Biophotonik	71
5	Zusammenfassung und Ausblick	73
5.1	Zusammenfassung der Arbeit	73
5.2	Folgerungen	75
5.3	Ausblick	76
	Literaturverzeichnis	86

Abbildungen und Tabellen

Abbildungsverzeichnis

2.1	Lichtführung in einem Filmwellenleiter.	5
2.2	<i>B-V</i> -Diagramm der Moden einer Filmwellenleiterstruktur.	7
2.3	E-Feld Verteilungen für unterschiedliche Propagationskonstanten.	9
2.4	Prinzipskizze eines Streifenwellenleiters.	9
2.5	Rippenwellenleiter und zugehöriger verallgemeinerter Filmwellenleiter.	10
2.6	Skizze der in der Arbeit hergestellten Rippenwellenleiterstruktur.	10
2.7	Schema eines multimodigen Interferenzkopplers.	11
2.8	Typische Intensitätsverteilung in einem multimodigen Wellenleiter.	12
2.9	Modell eines optischen Ringresonators.	12
2.10	Übertragungsfunktion eines Ringresonators.	13
2.11	Verhalten der Übertragungsfunktion.	13
2.12	Strukturformeln des Materialkomplexes $\text{Alq}_3\text{:DCM}$	14
2.13	Laserordnungen eines DFB-Gitters.	15
2.14	Kontrastkurve eines Negativ-Fotoresistes.	17
2.15	Spezialhalterung zur galvanischen Abscheidung von Metall auf Wafern.	18
2.16	Hergestellte Nickel-Shim-Formeinsätze.	19
2.17	Prozessschritte beim Vakuumheißprägen.	19
2.18	Wechselwirkungskräfte in Grenzflächenschichten.	21
2.19	Fotolyse von PMMA durch UV-Strahlung.	22
3.1	Schema des Herstellungsverfahrens geprägter Rippenwellenleiter.	23
3.2	Simulierte Modenausbreitung in einem Rippenwellenleiter.	25
3.3	Simulationsmodell und simulierte Grundmode.	26
3.4	Ermittelte Schleuderkurve des Resists SU-8-10.	27
3.5	Ermittelte Schleuderkurve des Resists AR-N 4400-25.	28
3.6	Teststrukturen aus AR-N 4400.	28
3.7	Schleuderkurve des Resists 950k PMMA A11.	31
3.8	Galvanikstartschicht auf den Resiststrukturen.	32
3.9	Lunkerbildung bei galvanisierten Nickelstrukturen.	32
3.10	Bildung von Galvaniknähten.	33

3.11	Klassische Halterung für Formeinsätze.	34
3.12	Skizze einer für die Zugversuche verwendeten Probe.	36
3.13	Verbundfestigkeit von Proben mit verschiedenen Oberflächen.	37
3.14	Kontaktwinkelbestimmung an einem liegenden Tropfen.	38
3.15	Verbundfestigkeiten vor und nach einer Sauerstoffplasmabehandlung. . .	38
3.16	Veränderung der Benetzbarkeit über die Zeit nach der Plasmabehandlung.	39
3.17	Veränderung der Verbundfestigkeit der Proben über die Zeit.	40
3.18	Shim-Formeinsatz und damit abgeformte photonische Strukturen.	41
3.19	REM-Aufnahmen von abgeformten photonischen Strukturen in PMMA. .	42
3.20	Fehler im Resist und resultierende Fehler bei Galvanik und Abformung. .	43
3.21	Defekte im Formeinsatz bei Strukturbreiten unter 2 μm	43
3.22	Formeinsatzes eines 1x3-MMI-Kopplers.	44
3.23	Abgeformter 1x3-MMI-Koppler.	44
3.24	Spektrum eines EVG-620 Maskaligners mit DUV-Optik.	45
3.25	Zerstörer Wellenleiter vor der Optimierung des Vereinzelnprozesses. .	46
3.26	Endfacette eines Rippenwellenleiters nach der Optimierung.	47
3.27	Mikroskopaufnahmen der Stirnflächen gesägter Wellenleiter.	47
3.28	Herstellungsverfahren geprägter DFB-Laser	49
3.29	Fotografie des Shim-Formeinsatzes mit den Lasergittern.	50
3.30	Probe mit geprägten DFB-Lasergittern nach dem Bedampfen mit Alq_3 :DCM.	50
3.31	REM-Aufnahmen abgeformter Gitterstrukturen.	51
3.32	Herstellungsverfahren lithografisch hergestellter DFB-Laser.	53
3.33	REM-Aufnahme eines belichteten Gitters.	54
3.34	AFM-Aufnahmen eines entwickelten Gitters.	54
4.1	Skizze des Dämpfungsmessplatzes.	57
4.2	Skizze des Nahfeldmessplatzes.	57
4.3	Prinzip der Modenlinienmessung.	58
4.4	Cut-Back-Messung von geprägten Rippenwellenleitern	59
4.5	Nahfeldaufnahme eines geprägten Rippenwellenleiters.	60
4.6	Korrigierte Simulation der Modenausbreitung.	61
4.7	REM-Bild und Nahfeldaufnahme eines lithografisch hergestellten Rippenwellenleiters.	63
4.8	DSC-Analyse von Hesaglas VOS.	64
4.9	Nahfeldaufnahme eines abgeformten 1x2-MMI-Kopplers	66
4.10	Wellenlängenabhängigkeit der Ausgangsleistung eines 1x3-MMI-Kopplers.	67
4.11	REM-Aufnahme eines gekoppelten Ringresonators.	68
4.12	Resonatorverhalten in einem abgeformten Ringresonator.	69
4.13	Schematische Darstellung des Messsystems zur Charakterisierung wellenleitergekoppelter Laser.	70
4.14	REM-Aufnahme und eingekoppeltes Spektrum eines monomodigen geprägten DFB-Lasers mit Wellenleiter.	70

4.15 Laserschwelle und Laserspektrum eines lithografisch hergestellten DFB–Lasers.	71
4.16 Nervenzellen auf einem PMMA–Substrat mit lithografisch strukturierten Wellenleitern.	72
4.17 Fluoreszenz in angeregten Zellen.	72
5.1 Schema eines Lab-on-a-Chip-Systems mit organischen Lichtquellen, Detektoren sowie fluidischen Kanälen.	77

Tabellenverzeichnis

3.1 Parameter für die UV–Lithografie zur Herstellung von Shim-Formeinsätzen.	29
4.1 Simulierte und experimentell ermittelte Modengrenzen in Rippenwellenleitern.	60
4.2 Modengrenzen in lithografisch hergestellten und in geprägten Rippenwellenleitern.	63

Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen

DEUTSCHE FORMELZEICHEN

A_g	geometrische Oberfläche
A_w	wahre Oberfläche
B	Phasenparameter
D	Belichtungsdosis
d	Schichtdicke bei Filmwellenleitern
E	elektrisches Feld
E_i	eingekoppeltes elektrisches Feld
E_t	transmittiertes elektrisches Feld
F_a	äußere Kraft
F_i	innere Kraft
I	Intensität
I_i	eingekoppelte Intensität
I_t	transmittierte Intensität
k	Wellenzahl
L	Wellenleiterlänge
L_R	Resistschichtdicke
M	molare Masse
n	Brechungsindex
n_S	Substratbrechungsindex
n_F	Filmbrechungsindex
n_C	Deckschichtbrechungsindex
n_{eff}	effektiver Brechungsindex
P_i	eingekoppelte Leistung
P_o	ausgekoppelte Leistung
R_m	molare Refraktion
t	Zeit
V	Filmparameter
V_m	molares Volumen

x	karthesische Koordinate
y	karthesische Koordinate
z	karthesische Koordinate / normierte Resistschichtdicke

GRIECHISCHE FORMELZEICHEN

α	Symmetrieparameter bei Wellenleitern / Absorptionskoeffizient
α_e	Elektronenpolarisierbarkeit
β	Ausbreitungskonstante einer elektromagnetischen Welle
γ	Kontrast
Θ	Wellenwinkel / Kontaktwinkel
κ	Koppelfaktor
Λ	Gitterkonstante
λ	Wellenlänge des Lichtes
λ_B	Bragg-Wellenlänge
ρ	Dichte
σ_H	Haftfestigkeit
σ_V	Verbundfestigkeit
σ_L	Oberflächenspannung einer Flüssigkeit
σ_S	freie Oberflächenenergie eines Festkörpers
σ_{LS}	Grenzflächenenergie zwischen Festkörper und Flüssigkeit
ω	Kreisfrequenz

NATURKONSTANTEN

c	Lichtgeschwindigkeit
N_A	Avogadro-Konstante
ε_0	Dielektrizitätskonstante im Vakuum

ABKÜRZUNGEN

IMT	Institut für Mikrostrukturtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe
LTI	Lichttechnisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)
Alq ₃	Aluminium-tris(8-Hydroxychinolin)
AFM	engl. <i>atomic force microscope</i> (Rasterkraftmikroskop)
ASE	engl. <i>amplified spontaneous emission</i> (verstärkte, spontane Emission)
BPM	engl. <i>beam propagation method</i>
DCM	4-(Dicyanomethylen)-2-methyl-6-(p-dimethylaminostyryl)-4H-pyran
DFB	engl. <i>distributed feedback</i> (verteilte Rückkopplung)
DUV	engl. <i>deep ultraviolet</i> (tiefe UV-Strahlung)
LASER	engl. <i>light amplification by stimulated emission of radiation</i>
LIGA	Lithografie, Galvanik, Abformung
LWL	Lichtwellenleiter
NIR	naher Infrarotbereich des Spektrums

PDMS	Polydimethylsiloxan
PMMA	Polymethylmethacrylat
REM	Rasterelektronenmikroskop
Si	Silizium
TE	transversal elektrisch
TM	transversal magnetisch
UV	ultravioletter Teil des Spektrums
VIS	engl. <i>visible</i> (sichtbarer Teil des Spektrums)

1 Einleitung

Es ist nicht das Wissen, sondern das Lernen, nicht das Besitzen,
sondern das Erwerben, nicht das Dasein, sondern das Hinkommen,
was den größten Genuss gewährt.

(Carl Friedrich Gauß)

1.1 Motivation

Sowohl die Mikrosystemtechnik als auch die Optik haben sich zu Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts entwickelt. Mikrosysteme werden bereits in vielen technischen Bereichen eingesetzt, sei es in der Sensorik wie für Drucksensoren oder Drehratensensoren bei Kraftfahrzeugen, bei fluidischen Anwendungen wie Tintenstrahldruckköpfen oder in der Datenverarbeitung als Teil der Schreib-/Leseköpfe von Festplatten. Das Wachstum im Bereich Mikrosystemtechnik wird für die nächsten Jahre auf ca. 16% pro Jahr geschätzt [1]. Im Zuge der Miniaturisierung und Integration hat sich auch für die Optik und speziell die Photonik ein neues Feld eröffnet. Der Begriff „Integrierte Optik“, der in Analogie zur Elektronik die Miniaturisierung und Integration verschiedener optischer Komponenten auf einem Substrat beschreibt, wurde dabei 1969 von S.E. Miller geprägt [2]. Vorteile integriert-optischer Systeme sind neben geringeren Herstellungskosten auch eine Platz- und Gewichtsersparnis, geringere Schaltzeiten bei aktiven Komponenten, höhere Verlässlichkeit sowie geringerer Energieverbrauch [3].

Durch Zunahme der Datenrate für Telekommunikationssysteme gewinnt die optische Datenübertragung immer mehr an Bedeutung. Mittlerweile werden auch im Bereich der Hausanschlussleitungen („fibre-to-the-home“) und Hausnetzwerke („fibre-to-the-desktop“) optische Wellenleiter und Komponenten genutzt. Speziell für diesen Bereich besteht ein Bedarf an integriert-optischen Bauteilen [4]. Der Schwerpunkt der Entwicklungsarbeit liegt bei monomodigen Komponenten, da sie größere Datenraten ermöglichen und den Einsatz von Modulatoren und optischen Filtern ermöglichen [5]. Die Schwierigkeit bei der Herstellung monomodiger Strukturen besteht dabei darin, dass diese wesentlich kleinere Abmessungen haben und höhere Anforderungen an die Präzision der Strukturierung stellen.

Aufgrund der geringen Größe lassen sich integriert-optische Systeme und Komponenten nicht mit klassischen mechanischen Herstellungsverfahren fertigen. Meist wird für die Strukturierung deshalb auf Technologien aus der Elektronikindustrie zurückgegriffen. Als Material werden dabei meist Halbleiter wie Silizium, Indiumphosphid und Galliumarsenid bzw. Glas oder Kristalle wie Lithiumniobat benutzt [6]. Polymere bieten sich hier als

Alternative an. Sie sind in weiten Bereichen auf die jeweilige Anwendung anpassbar und zeigen eine geringe Doppelbrechung sowie große thermooptische Koeffizienten. Weiterhin sind sie Materialkosten meist deutlich geringer [4, 7]. Eine Reihe von Polymeren wurden in den letzten Jahren speziell für Telekommunikationsanwendungen entwickelt [7, 8, 9]. Ihre Konkurrenzfähigkeit mit den Entwicklungen im Bereich der Halbleitertechnologie wird aber auch davon abhängen, ob ein leistungsfähiger Strukturierungsprozess zur Herstellung von Wellenleiter und Komponenten zur Verfügung steht [5]. Replikationstechniken haben hier den Vorteil, da sie für die Massenproduktion im Vergleich zu Ätztechniken die wirtschaftlicheren Herstellungsverfahren sind [10].

Ein anderes Anwendungsgebiet für optische Wellenleiter ist die chemische und biochemische Analytik. Auch in der Biophotonik werden optische Wellenleiter für die Sensorik eingesetzt. Meist wird das evaneszente Feld genutzt, um am Wellenleiter haftende Proteine, Antikörper oder ganze Zellen zu untersuchen. Durch ihre geringen Abmaße, hohe Sensitivität sowie gute Integrierbarkeit bieten sie Vorteile gegenüber anderen Sensortypen [11]. Integriert-optische Analysesysteme spielen durch ihre geringe Größe und die Möglichkeit zur Produktion großer Stückzahlen eine entscheidende Rolle [12]. Bereits jetzt werden Polymere in vielen Bereichen der Biotechnologie eingesetzt, in denen eine große Nachfrage nach schnellen Analyseverfahren besteht, wie etwa beim „high-throughput-screening“ in der Wirkstoffforschung oder in der so genannten „point-of-care“-Diagnostik [13]. Es ist deshalb zu erwarten, dass sie auch für die Sensorik und Mikrofluidik zunehmend eine Rolle spielen werden. Dies ist auch dadurch bedingt, dass die verwendeten Systeme meist nicht für den Dauergebrauch, sondern als Einwegprodukte gedacht sind und dadurch den Kosten des einzelnen Systems eine entscheidende Bedeutung zukommt [14].

Wie auch bei den Komponenten für die Telekommunikation ist eine Weiterentwicklung der Strukturierungsverfahren für die Einsetzbarkeit von Polymeren von entscheidender Bedeutung. Replikationstechniken wurden dabei für die Herstellung mikrofluidischer Systeme bereits vielfach demonstriert. Die Palette der verwendeten Verfahren reicht vom Mikrospritzguss [15, 16] über Heißprägen [17, 18, 19] bis hin zur so genannten „Soft Lithography“ von Polydimethylsiloxan (PDMS) [20, 21]. Die Kombination von fluidischen und optischen Strukturen ist damit in nur einem Prozessschritt durchführbar und ermöglicht eine erhöhte Funktionalität auf engstem Raum [22, 23]. Dabei bestimmt die Qualität der Replikation der optischen Komponenten maßgeblich die Funktion des Gesamtsystems.

1.2 Aufgabenstellung

Ziel der Arbeit war die Prozessentwicklung zur Herstellung von Wellenleiterstrukturen in Poly(methylmethacrylat) (PMMA), um eine robuste und einfache Technologie zur Verfügung zu stellen, die sich perspektivisch für die Herstellung von einzelnen photonischen Elementen bis hin zu integrierten photonischen Schaltkreisen eignet. Aufbauend auf anderen am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) durchgeführten Arbeiten [24, 25] lag dabei der

Schwerpunkt auf stark führenden Strukturen, speziell monomodigen Rippenwellenleitern. Weiterhin sollten Ansätze zur Integration von photonischen Strukturen mit Lichtquellen gefunden werden.

Für die Herstellung der stark führenden Rippenwellenleiterstrukturen wurde speziell das Heißprägeverfahren genutzt. Im Gegensatz zu dem beim etablierten Standard-LIGA-Prozess verwendeten Formeinsätzen wurden dabei allerdings Prägewerkzeuge eingesetzt, deren Dicke nur wenige hundert Mikrometer beträgt, so genannte Shims. Diese bieten Vorteile durch ihre Flexibilität und die geringen Herstellungskosten, stellen aber neue Anforderungen, speziell an die Fixierung während der Abformung, für die im Rahmen der Arbeit Lösungen erarbeitet werden sollten. Die Erzeugung einer wellenleitenden Kernschicht erfolgte durch UV-induzierte Brechzahlerhöhung. Dafür musste der Prozess für die Erzeugung monomodiger Rippenwellenleiter optimiert werden.

Die in der Arbeit entwickelten Rippenstrukturen wurden für die Monomodigkeit im nahen Infrarotbereich (NIR) bei einer Wellenlänge von 1550 nm ausgelegt. Dies entspricht dem Standard für die optische Datenübertragung (Telekomband). Der Wellenlängenbereich wurde deshalb ausgewählt, weil die notwendige optische Messtechnik dafür zur Verfügung steht und ein Vergleich mit anderen, etablierten Prozessen und Bauelementen möglich ist. Weiterhin sind Strukturen für infrarotes Licht tendenziell weniger kritisch in den Abmaßen und Toleranzen als solche für sichtbares Licht, was die Realisierung von Bauteilen und die Identifikation von kritischen Prozessschritten erleichtert. Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen sollten sich Aussagen über die Umsetzung des Prozesses für Bauelemente im sichtbaren Wellenlängenbereich, etwa in der Biosensorik, ableiten lassen.

Einen weiteren Schwerpunkt bildete die Integration von Lichtquellen und Wellenleitern auf dem selben Substrat. In Kooperation mit dem Lichttechnischen Institut der Universität Karlsruhe sollte dabei speziell die Herstellung von organischen Lasern auf PMMA-Substraten und deren Ankopplung an optische Wellenleiter untersucht werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zum Verständnis der dargestellten Untersuchungen und Ergebnisse beschreibt Kapitel 2 zunächst die theoretischen Grundlagen der Wellenleitung allgemein sowie die Funktionsweise der zur Demonstration des Prozesses ausgewählten Bauteile (2.1). Anschließend werden die genutzten Fertigungstechnologien erläutert (2.2). Auf dieser Grundlage wird in Kapitel 3 auf die konkreten Experimente und Maßnahmen zur Umsetzung des Herstellungsprozesses eingegangen. Die Abfolge der Erläuterungen entspricht dabei der Abfolge der Prozessschritte zur Strukturherstellung. Die Charakterisierung der hergestellten photonischen Bauelemente ist getrennt davon in Kapitel 4 beschrieben. Dabei werden die Überlegungen und Untersuchungen aus 2 und 3 als Basis für die Auswertung genutzt. Abschließend werden in Kapitel 5 die Untersuchungen zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche Anwendungen gegeben.

2 Grundlagen

Es gibt nichts Praktischeres als eine gute Theorie.

(Immanuel Kant)

2.1 Photonische Bauelemente

2.1.1 Wellenleitung

Als optischen Wellenleiter bezeichnet man ein strukturiertes Medium, das in der Lage ist, elektromagnetische Wellen des optischen Spektrums zu führen. Der Wellenleiter besteht dabei aus einem Kernmaterial, das von einer Mantelschicht mit einer geringeren Brechzahl umgeben ist. Das einfachste Modell ist ein planarer Wellenleiter mit unendlicher Ausdehnung in y- und z-Richtung an. Das lichtführende Medium wird hierbei Film genannt, es befindet sich zwischen der Deckschicht (Cladding), im einfachsten Fall Luft, und dem Substrat.

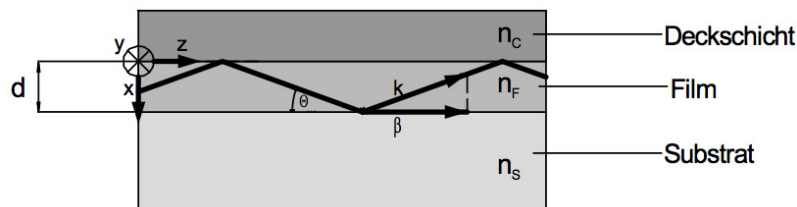


Abbildung 2.1: Lichtführung in einem Filmwellenleiter [24]. Mit Ausbreitungskonstante β , Wellenvektor k , Filmdicke d und Winkel θ der geführten Mode.

Damit es zu einer Wellenleitung im Lichtwellenleiter kommt, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

- Totalreflexion
- transversale Phasenbedingung

Licht kann auf Grund der Totalreflexion im Film geführt werden, wenn die Brechungsindizes von Film n_f , Substrat n_s und Deckschicht n_c die Bedingung

$$n_f > n_s, n_c, \quad (2.1)$$

erfüllen. Der Wellenvektor der geführten Welle ist als

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \quad (2.2)$$

definiert, mit ω als Kreisfrequenz.

Betrachtet man mehrere Strahlen, die durch den Wellenleiter geführt werden, muss die Phasenverschiebung, die eine Welle bei den zwei Reflexionen an Ober- und Unterkante erfährt, ein Vielfaches von 2π betragen, damit die Wellen miteinander konstruktiv interferieren können. Die Phasenbedingung lautet damit [26]:

$$2k \cdot d \cdot n_f \cdot \cos\theta \cdot m - 2\phi_c - 2\phi_s = m \cdot 2\pi \quad (2.3)$$

ϕ_s und ϕ_c sind dabei die Phasensprünge zwischen Film und Substrat respektive Deckschicht, θ der Winkel der geführten Mode, m eine nicht negative ganze Zahl. Erfüllt der Wellenleiter auch diese Bedingung, so überlagern sich hin- und rückreflektierte Wellen phasenrichtig zu in x-Richtung stehenden und in z-Richtung propagierenden Wellen. Da die Phasenbedingung nur für diskrete Winkel erfüllt ist, ergeben sich nur diskrete ausbreitungsfähige Wellen, die Moden des Wellenleiters. Der, für jede Mode feste, Ausbreitungskoeffizient β sowie der effektive Brechungsindex n_{eff} einer Mode ergeben sich zu

$$\beta = k \cdot n_f \cdot \sin(\theta) \quad (2.4)$$

$$n_{eff} = n_f \cdot \sin(\theta) = \frac{\beta}{k} \quad (2.5)$$

In der Literatur findet man meist eine normierte Darstellung für den Zusammenhang zwischen n_{eff} und einem Geometrieparameter, das so genannte B - V -Diagramm. Der Phasenparameter B und der Filmparameter V sind dabei wie folgt definiert:

$$B = \frac{n_{eff}^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (2.6)$$

$$V = k \cdot d \cdot \sqrt{n_f^2 - n_s^2} \quad (2.7)$$

Mit B wird der Brechungsindex auf einen Maximalwert von eins normiert. V entspricht einer normierten Frequenz oder Filmdicke. Mit diesen beiden Parametern erhält (2.3) folgende Form:

$$V \sqrt{1-B} = m\pi + \arctan \sqrt{\frac{B}{1-B}} + \arctan \sqrt{\frac{B + \alpha_{TE/TM}}{1-B}} \quad (2.8)$$

Im Symmetrieparameter $\alpha_{TE/TM}$ wird der Brechzahlunterschied von Substrat und Deckschicht berücksichtigt:

$$\alpha_{TE} = \frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (2.9)$$

$$\alpha_{TM} = \frac{n_f^4}{n_c^4} \cdot \frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (2.10)$$

Abbildung 2.2 zeigt den typischen Verlauf eines aus (2.8) abgeleiteten B - V -Diagrammes. Jede Kurvenschar repräsentiert dabei eine Mode. Abhängig von der Symmetrie der Wellenleitergeometrie kann jede Modenkurve in Richtung der Abszisse verschoben sein. Für symmetrische Wellenleiter ist $\alpha = 0$, während bei starker Asymmetrie α gegen unendlich geht. Die Kurvenscharen streben dem maximalen B von eins entgegen, was dem Brechungsindex der Filmschicht entspricht. Die so genannte Cut-Off-Höhe entspricht der Dicke der Filmschicht, bei der sich eine weitere Mode ausbreiten kann. Während beim symmetrischen Wellenleiter die Grundmode ($m=0$) in jedem Fall ausbreitungsfähig ist, ist dies bei unsymmetrischen Wellenleitern nicht der Fall. Es existiert eine Mindestdicke, unterhalb der keine Lichtführung für eine bestimmte Wellenlänge möglich ist.

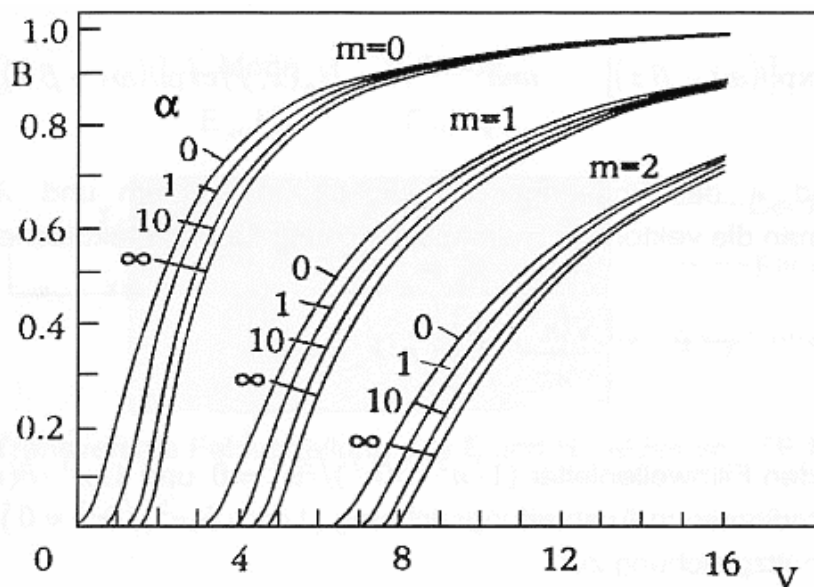


Abbildung 2.2: B - V -Diagramm der Moden einer Filmwellenleiterstruktur [27].

Die strahlungsoptische Betrachtung gibt Auskunft über ausbreitungsfähige Moden und den effektiven Brechungsindex einer Welle. Dadurch lassen sich die optischen Eigenschaften von Wellenleitern beschreiben, das strahlenoptische Modell liefert allerdings keine Aussage über die Energieverteilung im lichtführenden Medium. Dafür ist eine Betrachtung der Maxwell-Gleichungen notwendig.

Die Maxwellgleichung für ein dielektrisches Medium ohne Ladungsträger mit dem Brechungsindex $n(r)$ lautet:

$$\nabla E(r) + k^2 \cdot n^2(r) \cdot E(r) = 0 \quad (2.11)$$

Dabei ist r der Ortsvektor und c die Vakuumlichtgeschwindigkeit. Das E- und das H-Feld müssen an den Grenzen zwischen zwei Brechungsindizes konstant sein. Mit dieser Randbedingung erhält man für die Differentialgleichung 2.11 die Lösung:

$$E(r,t) = E(r)e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.12)$$

β ist hier wieder die Ausbreitungskonstante in z-Richtung. Setzt man nun die Lösung wieder in Gleichung 2.11 ein und vernachlässigt die Ableitung in y-Richtung, da hier die Ausdehnung als unendlich groß angenommen wird, erhält man für die drei definierten Regionen die Gleichung [28]:

$$\frac{\partial^2 E(x,y)}{\partial x^2} + (k^2 n_l^2 - \beta^2)E(x,y) = 0 \text{ mit } l = 1, 2, 3 \text{ und } n_2 > n_3 > n_1 \quad (2.13)$$

Mit dieser Gleichung kann man für eine Mode mit bekannter Propagationskonstante β bei fester Wellenzahl k die Ausbreitung des elektrischen Feldes berechnen. Es gibt dabei vier prinzipielle Lösungen:

1. $\beta > k_0 \cdot n_2 : \frac{1}{E} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}$ wird in allen drei Regionen positiv, d.h. das elektrische Feld wächst an allen Orten exponentiell an. Diese Lösung ist physikalisch nicht möglich.
2. $k_0 \cdot n_3 < \beta < k_0 \cdot n_2 : \frac{1}{E} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}$ ist positiv im Cladding und Substrat und negativ im Film. Also ist das elektrische Feld im Film sinusförmig und in den anderen Bereichen exponentialförmig. Unter dieser Bedingung gibt es ausbreitungsfähige Moden und Wellenleitung im Filmleiter.
3. Für $\beta < k_0 \cdot n_3$ ergibt sich eine sinusförmige Lösung für die dritte Region, d.h. es geht Energie in das Substrat verloren (Substratmoden).
4. Die Lösung $0 < \beta < k_0 \cdot n_1$ führt zur Abstrahlung der Welle in den Raum.

Man kann erkennen, dass β zwischen $k \cdot n_3$ und $k \cdot n_r$ liegen muss, damit eine Mode geführt werden kann. Die Lösungen gelten nur für diskrete β , die möglichen Moden eines Leiters. Die Moden werden allerdings auch für diesen Fall nicht vollständig im Wellenleiter geführt. Wie man in Abbildung 2.3 sehen kann, liegt ein Teil der Welle außerhalb des Lichtwellenleiters. Dieser Teil wird evaneszentes Feld der Mode genannt. Über das evaneszente Feld ist es möglich, Energie von einem Wellenleiter in einen anderen zu übertragen, ohne dass sich diese berühren. Dieser Effekt wird beispielsweise für Richtkoppler und einigen Formen von Ringresonatoren genutzt [3].

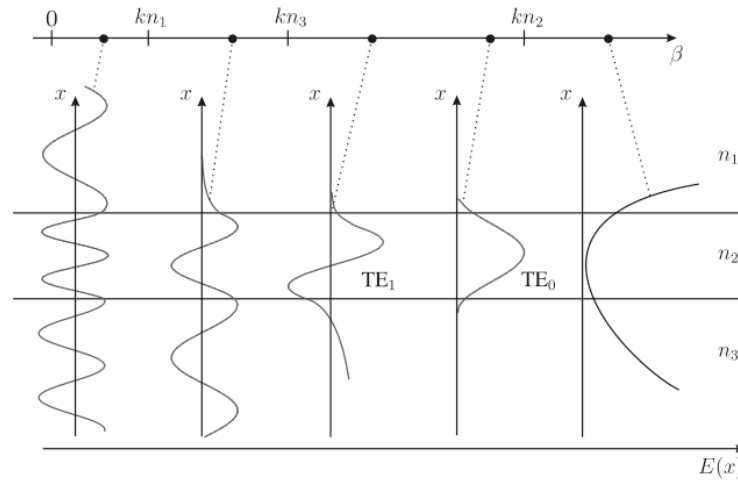


Abbildung 2.3: E-Feld Verteilungen für unterschiedliche Propagationskonstanten β [29].

2.1.2 Streifen- und Rippenwellenleiter

Streifenwellenleiter entstehen, wenn das Kernmaterial zusätzlich in horizontaler Richtung an zwei Seiten von Material mit geringerem Brechungsindex begrenzt wird (Abb. 2.4). Bei der theoretischen Betrachtung der Feldausbreitung muss dabei beachtet werden, dass es sowohl in x- als auch in y-Richtung zur Ausbreitung verschiedener Moden kommen kann. Ein häufig in der Praxis vorkommender Fall ist ein rechteckiger Wellenleiter. Die Ableitung der Feldverteilung für diesen Fall ist allerdings sehr umfangreich [26] und wird deshalb hier nicht näher erläutert.

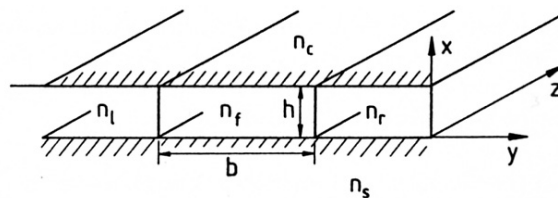


Abbildung 2.4: Prinzipskizze eines Streifenwellenleiters [26].

Eine weitere Möglichkeit zur Lichtführung ist eine sprunghafte Veränderung der Filmdicke des Wellenleiters (Abb. 2.5). Da die Ausbreitungskonstante β im dickeren Film größer ist als im dünneren, steigt wie in Gleichung (2.5) beschrieben im dickeren Bereich der effektive Brechungsindex. Für die Beschreibung der Bedingungen für die Lichtleitung wird die Struktur auf die in Abb. 2.5 dargestellten Filmwellenleiter zurückgeführt (Effektiv-Index-Methode) [26]. Der besondere Vorteil von Rippenstrukturen besteht darin, dass sie bedingt durch den starken Brechzahlunterschied zwischen Rippe und umgebenden Medium (in der Regel Luft) das Feld stärker führen als z.B. vergrabene Wellenleiter. Dadurch werden

kleinere Krümmungsradien und damit kompaktere Designs möglich. Weiterhin ermöglichen stark führende Strukturen den Aufbau von Ringresonatoren (siehe 2.1.4).

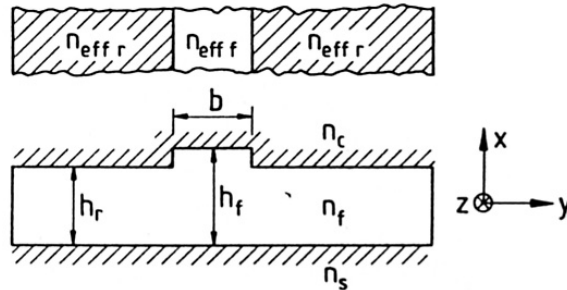


Abbildung 2.5: Rippenwellenleiter (unten) und zugehöriger verallgemeinerter Filmwellenleiter [26].

Bei den in dieser Arbeit hergestellten und untersuchten Strukturen handelt es sich um eine Sonderform eines Rippenwellenleiters. Dabei wird zuerst eine Rippenstruktur hergestellt und die Brechzahl an der Oberfläche des Materials anschließend durch UV-Bestrahlung erhöht (s. 2.2.5). Bedingt durch die Absorption des Materials bildet sich dabei in Richtung des Substrates kein Stufenprofil heraus, sondern ein exponentieller Abfall der Brechzahl. Abbildung 2.6 zeigt eine Skizze des Wellenleiters. Es ist zu erkennen, dass auch die Brechzahl der tiefer liegenden Bereiche modifiziert wird. Deshalb muss die Rippenhöhe ausreichend groß gewählt werden, um ein Überkoppeln von Licht in diese Bereiche zu verhindern.

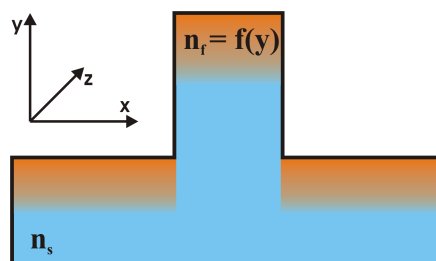


Abbildung 2.6: Skizze der in der Arbeit hergestellten Rippenwellenleiterstruktur.

Neben geraden Rippenwellenleitern wurden in der Arbeit auch komplexere passive Komponenten wie Koppler und Ringresonatoren realisiert.

2.1.3 Multimodige Interferenzkoppler

Koppler sind Basisstrukturen in optischen Netzwerken. Sie dienen beispielsweise zur Leistungsaufteilung auf mehrere Ausgänge oder der Ein- und Auskopplung von Energie in Ringresonatoren. Zu den Anforderungen an Koppler in optischen Netzwerken gehört eine große optische Bandbreite sowie geringe Polarisationsabhängigkeit. Für die Herstellung sind

geringe Bauteilabmessungen bei möglichst hohen geometrischen Toleranzen notwendig. Diese Forderungen werden besonders gut von multimodigen Interferenzkopplern (MMIs) erfüllt [30].

Die Hauptstruktur eines MMIs besteht aus einem multimodigen Wellenleiter, in dem üblicherweise drei oder mehr Moden geführt werden (s. Abb. 2.7). Die Ein- und Ausgänge des MMIs können z.B. monomodige Wellenleiter sein.

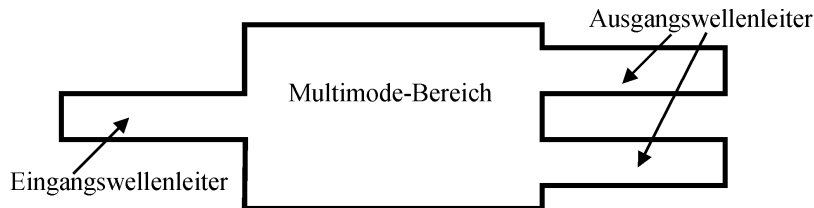


Abbildung 2.7: Schema eines multimodigen Interferenzkopplers mit einem Eingang und zwei Ausgängen (1x2-Koppler).

Das Funktionsprinzip des MMIs ist das so genannte Self-Imaging Prinzip. Self-Imaging ist eine Eigenschaft von multimodigen Wellenleitern, bei der das Profil eines Eingangsfeldes in einzelne oder mehrere Abbilder in periodisch sich wiederholenden Intervallen in Ausbreitungsrichtung des Wellenleiters abgebildet wird. Abbildung 2.8 zeigt, wie sich die Eingangsmode in einem multimodigen Wellenleiter in einem periodischen Muster zu höheren Moden ausbreitet. Ist eine Leistungsaufteilung von 50% auf zwei Ausgänge angestrebt, so wird der MMI-Wellenleiter an der Stelle abgeschnitten, an der sich zwei Maxima gleicher Intensität ausgebildet haben. Die beiden Ausgangswellenleiter werden dann genau an der lateralen Position dieser Maxima platziert.

Für eine genaue mathematische Beschreibung der multimodigen Feldausbreitung in Wellenleitern wird auf [30] verwiesen.

2.1.4 Ringresonatoren

Optische Ringresonatoren bestehen aus einem kreis- oder stadienförmig gebogenen Wellenleiter. Er befindet sich i.d.R. in geringem Abstand zu einem oder mehreren geraden Wellenleitern, so dass Licht über das evaneszente Feld Licht in den Ringresonator ein- bzw. ausgekoppelt werden kann. Innerhalb des Rings kommt es für bestimmte resonante Wellenlängen zur Interferenz. Aufgrund dieser Eigenschaft werden Ringresonatoren häufig als Filter eingesetzt, sie können aber auch als Resonatoren für Laser dienen.

Abbildung 2.9 zeigt ein einfaches Modell für einen optischen Ringresonator mit dem Umfang L ($L = 2\pi R$). Dabei bezeichnen E_i bzw. E_t das eingespeiste bzw. transmittierte elektrische Feld, κ der Koppelfaktor, der von der Länge und dem Abstand der Koppel-elemente bestimmt wird. Das Feld wird bei einem Schleifendurchlauf mit $e^{-\alpha L}$ gedämpft ($\alpha =$ Dämpfungskoeffizient).

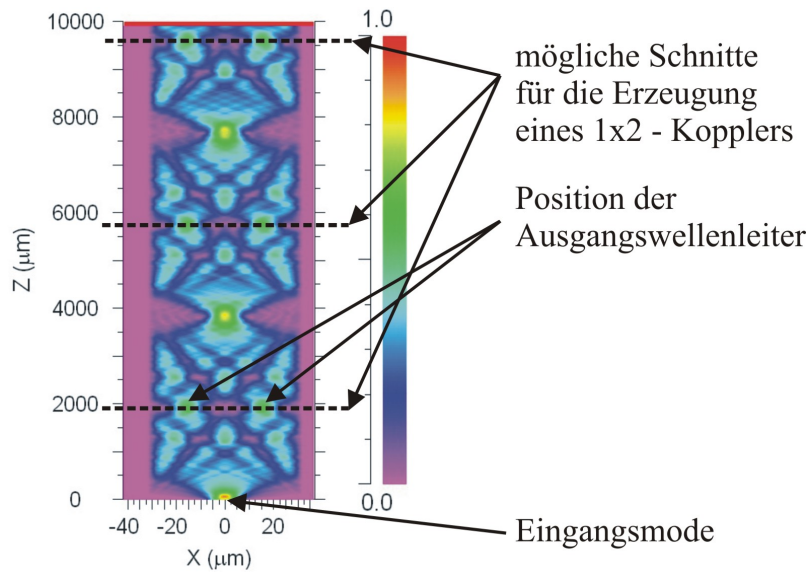


Abbildung 2.8: Typische Intensitätsverteilung in einem multimodigen Wellenleiter.

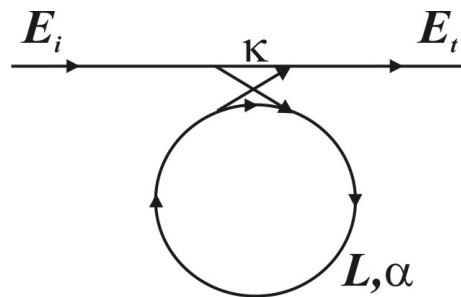


Abbildung 2.9: Modell eines optischen Ringresonators.

Die Übertragungsfunktion $I_t/I_i = |E_t^2/E_i^2|$ eines Ringresonators zeigt in periodischen Abständen Resonanzen (Abb. 2.10). Den Abstand der Resonanzen nennt man freien Spektralbereich (*engl. Free Spectral Range*, FSR). Der FSR ist abhängig von der Geometrie, der Lichtwellenlänge und den verwendeten Materialien. Er kann näherungsweise durch

$$FSR = \Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{n_{eff} \cdot L} \quad (2.14)$$

beschrieben werden, wobei hierbei die Wellenlängenabhängigkeit des Brechungsindex nicht berücksichtigt wird.

Die Dämpfungstiefe im Resonanzpunkt λ_r hängt von κ und der Dämpfung αL ab. Abbildung 2.10 zeigt die Übertragungsfunktion eines Ringresonators für verschiedene Werte von κ sowie verschiedene Dämpfungswerte. Eine Nullstelle im Resonanzpunkt wird nur für

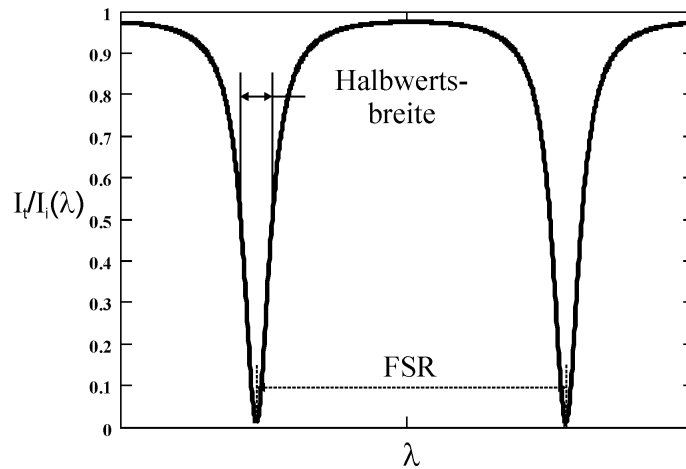


Abbildung 2.10: Übertragungsfunktion eines Ringresonators.

$$\kappa = 1 - e^{-2\alpha L} \approx 2\alpha L \quad (2.15)$$

erreicht.

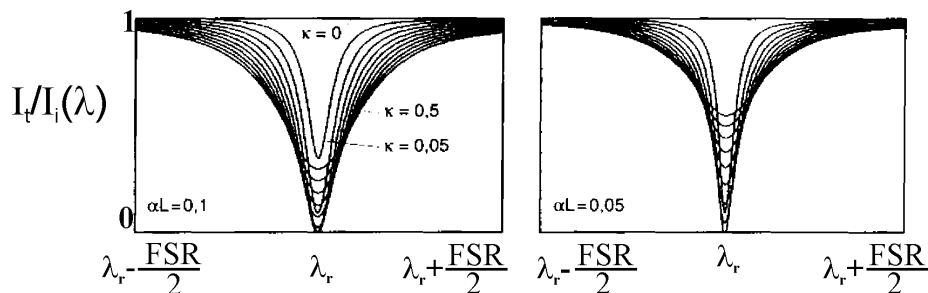


Abbildung 2.11: Verhalten der Übertragungsfunktion [31]. Es sind die Abhängigkeit der Dämpfungstiefe sowie der Halbwertsbreite von Koppelfaktor und Wellenleiterdämpfung dargestellt.

Eine ausführliche Darstellung der mathematischen Grundlagen von optischen Resonatoren findet sich in [31], speziell zu Ringresonatoren sei auf [32] verwiesen.

2.1.5 Organische Distributed Feedback (DFB)–Laser

Im Rahmen der Arbeit wurden organische Laser als Lichtquellen für die Integration mit polymeren Wellenleitern untersucht. LASER steht für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ (Lichtverstärkung durch induzierte Emission). In einem laseraktiven Material kann durch Zufuhr von Energie (Pumpen) eine Besetzungsinversion erzeugt werden,

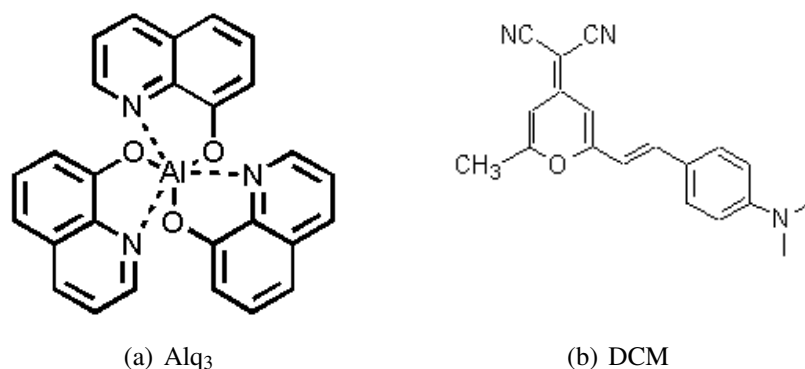


Abbildung 2.12: Strukturformeln des Materialkomplexes Alq₃:DCM.

d.h. es befinden sich durch die Anregung mehr Elektronen in einem angeregten Zustand als im Grundzustand.

Organische Laser bestehen aus einem organischen laseraktiven Material, einem Resonator sowie einer optischen Pumpquelle. Einen ausführlichen Überblick über organische Lasermaterialien geben Samuel und Turnbull [33]. Bei den in dieser Arbeit behandelten organischen Lasern handelt es sich um einen Materialkomplex aus dem organischen Halbleiter Aluminium-tris-(8-hydroxychinonlin) (Alq₃), der mit 3 mol% des Laserfarbstoffes DCM dotiert wird. Abbildung 2.12 zeigt die Strukturformeln der Materialien. Vorteile von Alq₃:DCM sind die Stabilität der Verbindung sowie gute Effizienzen bei Elektro- und Photolumineszenz [34]. Es wurden mit dem Material Lasertätigkeit im Bereich von 605 bis 728 nm gezeigt [35].

Der Materialkomplex Alq₃:DCM realisiert das System eines Vier-Niveau-Lasers. Die Pumpstrahlung wird vom Alq₃ absorbiert, die Energie durch einen strahlungslosen Förstertransfer [36] auf das DCM übertragen, was zur Emission von Photonen in diesem führt. Für eine ausführliche Beschreibung der Grundlagen organischer Laser wird auf [35] verwiesen.

Durch optische Anregung des aktiven Materials kommt es zur spontanen Emission von Photonen, bei der das so genannte Photolumineszenzspektrum emittiert wird. Bei Erhöhung der Pumpleistung verengt sich das Spektrum auf einige Nanometer Halbwertsbreite um die Wellenlänge mit der höchsten Verstärkung. Diese Intensitätsverteilung wird ASE-Spektrum (von engl. *Amplified Spontaneous Emission* = verstärkte, spontane Emission) genannt. Bei der ASE ist wie beim Laser eine Richtungsabhängigkeit und ein Schwellenverhalten feststellbar. Es wird deshalb auch oft als „spiegelloses Lasing“ bezeichnet [37, 38]. Um den optischen Gewinn im aktiven Lasermaterial zu erhöhen und niedrige Laserschwellen sowie eine schmalbandige Emission zu erreichen, wird ein Resonator benötigt. Dies kann z.B. durch zwei planparallele Spiegel an den Enden des Lasermaterials realisiert werden, von denen einer teildurchlässig ist, um die Strahlung auszukoppeln. Dabei bilden sich zwischen den Spiegeln stehende Wellen, es kommt zur Ausbildung mehrerer longitudinaler

Lasermode, deren Anzahl nur durch ein stark wellenlängenabhängiges Verstärkermaterial reduziert werden kann. Wenn man die Länge des Resonators sehr stark verkürzt, ist eine Wellenlängenselektion durch Interferenz möglich. Die Länge muss dazu der Bedingung

$$L_R = \frac{\lambda_{\text{Laser}}}{2 \cdot n_{\text{Medium}}} \quad (2.16)$$

genügen. Es ist in der Regel nicht möglich, den Resonator so weit zu verkürzen, dass nur die Grundmode angeregt wird. Bei organischen Lasern wird deshalb häufig das Prinzip der verteilten Rückkopplung (*engl. Distributed Feedback, DFB*) verwendet. Hierbei wird die Reflexion durch dielektrische Spiegel, so genannte Braggreflektoren, also eine periodische Variation des Brechungsindex erreicht. Durch Braggreflektoren wird nur Licht rückgekoppelt, das die Braggbedingung

$$\lambda_B = \frac{2 \cdot \Lambda \cdot n_{\text{eff}}}{m} \quad (2.17)$$

erfüllt. Dabei ist n_{eff} der effektive Brechungsindex, Λ die Periode des DFB-Gitters und m die Ordnung des Braggreflexes. Durch destruktive Interferenz werden andere Wellenlängen unterdrückt, es kommt zu einer Wellenlängenselektion.

Die höchste Rückkopplung erhält man für die erste Braggordnung, doch auch höhere Ordnungen der DFB-Gitter können ausreichend für Laseraktivität sein. Bei einem DFB-Laser erster Ordnung wird die Rückkopplung in der ersten Braggordnung erreicht und das Licht parallel zur Gitterebene emittiert. 2. Ordnung DFB-Laser nutzen die zweite Braggordnung für die Rückkopplung und emittieren das Laserlicht senkrecht zum Gitter (siehe Abb. 2.13) [39]. Der Vorteil von Resonatoren höherer Ordnung liegt darin, dass die Braggbedingung für die gewünschte Wellenlänge mit Gittern einer größeren Periode erreicht wird, die leichter herzustellen sind. Allerdings sind sie weniger effizient, da nur ein Teil des Lichtes zur Rückkopplung verwendet wird.

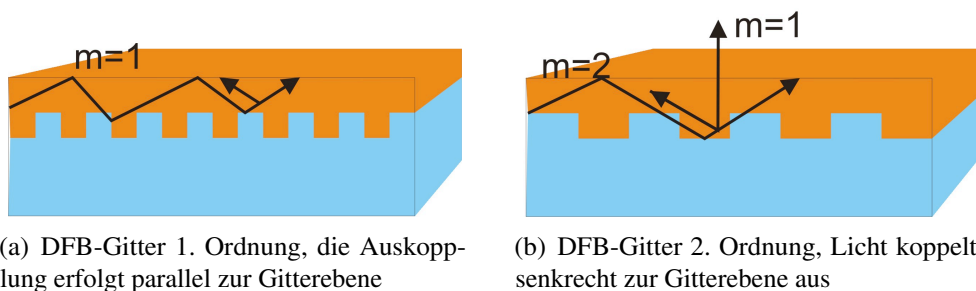


Abbildung 2.13: Laserordnungen eines DFB-Gitters.

2.2 Herstellungstechnologien

Die Herstellung der in dieser Arbeit untersuchten Rippenwellenleiter besteht aus zwei grundsätzlichen Herstellungsschritten:

1. Herstellung der Rippenstruktur
2. lokale Erhöhung der Brechzahl zur Erzeugung eines wellenleitenden Kerns

Zur Herstellung der Rippenstruktur wurden im LIGA–Verfahren [40] Fotoresiste strukturiert und galvanisch Abformwerkzeuge hergestellt. Als Replikationstechnik wurde das Heißprägen angewendet. Die Brechzahlerhöhung in den Oberflächen der Rippen wurde durch Bestrahlung mit tiefem UV–Licht (*engl. Deep UV, DUV*) erreicht.

2.2.1 Fotolithografie

Unter Fotolithografie versteht man die Strukturierung eines Polymers (des Fotoresistes) mit Hilfe elektromagnetischer Strahlung. Im LIGA–Verfahren dient die Fotolithografie zur Herstellung der Masterstruktur für den nachfolgenden Galvanikprozess. Die Qualität der Resiststruktur ist damit ausschlaggebend für die Qualität der abgeformten Strukturen.

In der vorliegenden Arbeit wurde Fotolithografie für folgende Prozesse eingesetzt:

- UV–Lithografie der Negativ-Resiste SU-8 und AR-N 4400 zur Herstellung von Shim-Formeinsätzen
- Röntgenlithografie von PMMA zur Herstellung von Shim-Formeinsätzen
- direktlithografische Herstellung photonischer Strukturen mit Röntgenlithografie sowie mit tiefer UV-Strahlung

Die Resiststrukturierung gliedert sich in fünf Prozessschritte:

- Aufschleudern des Resistes
- Prebake
- Belichtung
- Post-Exposure-Bake (nur bei Negativresisten)
- Entwickeln des Resistes

Entscheidend für die Wahl der Belichtungsparameter ist die Kontrastkurve eines Resistes. Der Kontrast γ eines Resistes ist ein Maß für die Schärfe des Übergangs von belichteten zu unbelichteten Bereichen nach dem Entwicklungsvorgang. Er ist definiert als die maximale Steigung der Tangente an der Kontrastkurve [41]:

$$\gamma = \log \frac{D_m}{D_0} \quad (2.18)$$

mit den Belichtungsintensitäten

$$D_m = D(z = 1) \text{ und } D_0 = D(z = 0) \quad (2.19)$$

für Positivresiste sowie

$$D_m = D(z = 0) \text{ und } D_0 = D(z = 1) \quad (2.20)$$

für Negativresiste, mit der normierten Schichtdicke $z = L_R(t)/L_R$ (t = Entwicklungszeit, L_R = Resistschichtdicke). Abbildung 2.14 zeigt eine typische Kontrastkurve eines Negativ-Fotoresistes. Es ist ersichtlich, dass unterhalb einer bestimmten Dosis keine Vernetzung stattfindet und der Resist deshalb beim Entwickeln vollständig gelöst wird. Eine vollständige Vernetzung findet erst oberhalb einer Mindestdosis statt.

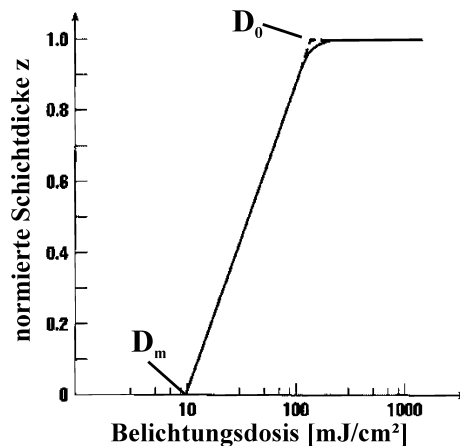


Abbildung 2.14: Kontrastkurve eines Negativ-Fotoresistes [41].

2.2.2 Shim-Galvanik

Zur Erzeugung eines Metallformeinsatzes wird in der Mikrosystemtechnik oft die elektrochemische Abscheidung genutzt. Das dafür am meisten verwendete Metall ist Nickel [42]. Die Grundlagen des Prozesses sind in [43] beschrieben.

Zur Abscheidung der Shim-Formeinsätze wird am IMT ein Nickelsulfamatelektrolyt eingesetzt. Dabei wird eine spezielle Halterung benutzt, die das Abscheiden auf beschichteten Wafern ermöglicht (siehe Abb. 2.15). Im Gegensatz zu den standardmäßig am IMT hergestellten Formeinsätzen beträgt die Dicke nur wenige hundert μm , was die Zeit für die Abscheidung deutlich verkürzt. Die dabei entstehenden dünnen Nickel-Scheiben werden auch als Shims (von engl. *Shim*, Scheibe) bezeichnet. Abbildung 2.16 zeigt typische Shim-Formeinsätze mit photonischen Strukturen.

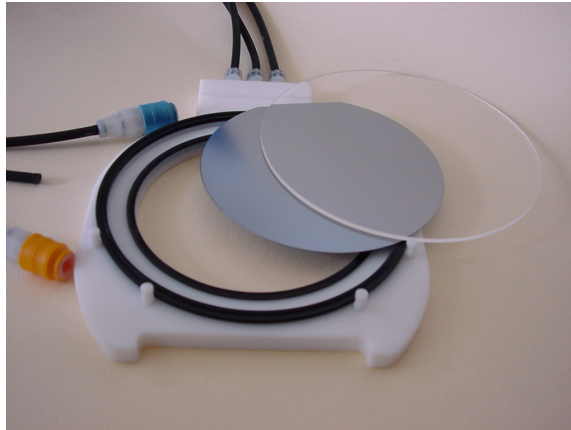


Abbildung 2.15: Spezialhalterung zur galvanischen Abscheidung von Metall auf Wafern (Hersteller: SILICET AG). Die Substrate werden durch Vakuum fixiert, die Kontaktierung erfolgt über Metallstifte am Rand.

2.2.3 Abformung durch Vakuumheißprägen

Vakuumheißprägen ist wie Spritzgießen, Spritzprägen und Thermoformen ein Verfahren zur Strukturierung von thermoplastischen Polymeren [44]. Für die Abformung von Mikrostrukturen wurde das Heißprägen erstmals Anfang der 1990er Jahre am Forschungszentrum Karlsruhe eingesetzt [45].

Der Werkstoff wird in Form dünner Folien zwischen ein mikrostrukturiertes Werkzeug (Formeinsatz) und eine unstrukturierte Substratplatte eingelegt, die sich in einer Vakuumkammer befinden. Auch eine Abformung zwischen zwei strukturierten Formeinsätzen ist möglich. Der Prozess des Prägens gliedert sich dabei wie in Abbildung 2.17 dargestellt in vier Abschnitte:

1. Einlegen des Halbzeugs und Aufheizen auf Umformtemperatur
2. Aufbringen der Prägekraft, Umformung
3. Abkühlen von Formteil und Formeinsatz auf die Entformtemperatur unter Beibehaltung der Kraft
4. Entformen des Bauteils durch Auseinanderziehen von Formeinsatz und Substratplatte

Der kritischste Punkt dabei ist die Entformung, bei der eine sehr präzise Steuerung von Kraft, Weg und Temperatur notwendig ist. Speziell bei Strukturen mit Aspektverhältnissen >1 ist zudem die Qualität des Formeinsatzes von entscheidender Bedeutung. Für eine ausführliche Darstellung der Prozessschritte, Parameter und Einflussgrößen wird auf [46] verwiesen.

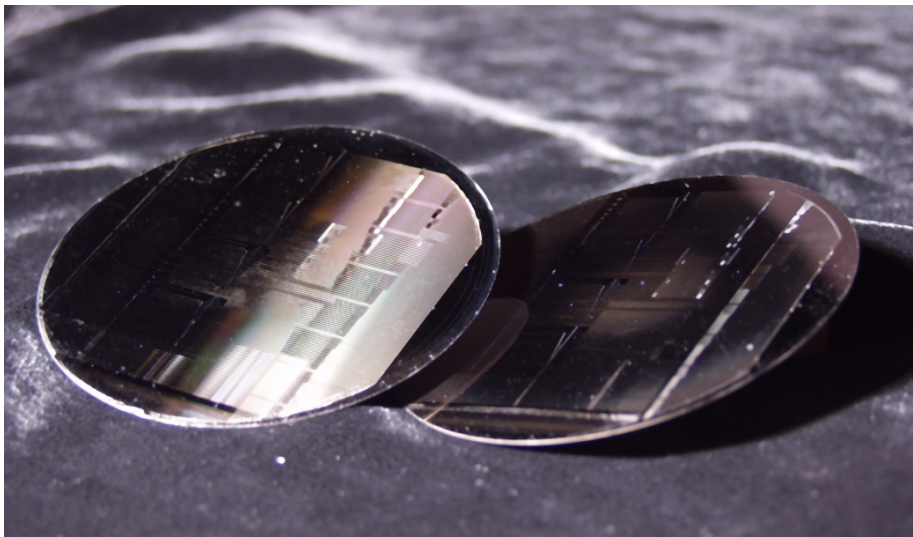


Abbildung 2.16: Durch galvanische Abscheidung hergestellte Nickel-Shim-Formeinsätze mit photonischen Strukturen.

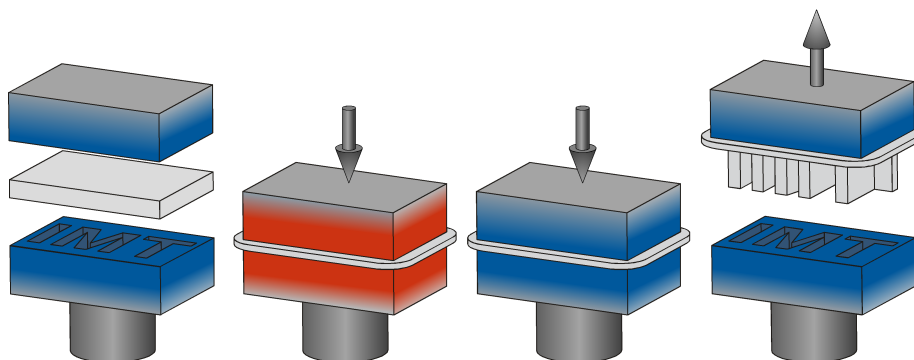


Abbildung 2.17: Prozessschritte beim Vakuumheißprägen.

2.2.4 Grundlagen der Haftung

Beim Heißprägen werden die Kräfte bei der Entformung durch die Haftung des Abformteils auf der Substratplatte übertragen. Zusätzlich spielt die Haftung für die Realisierung der Shimfixierung (siehe 3.4.1) eine entscheidende Rolle. Deshalb ist es notwendig, die physikalischen Grundlagen des Effektes zu erläutern.

Als Haftung oder Adhäsion wird der aus zwischenmolekularen Wechselwirkungen an Phasengrenzen resultierende Widerstand gegenüber einer trennenden Beanspruchung bezeichnet [47]. Jede Haftung ist durch eine so genannte Haft- oder Adhäsionsfestigkeit σ_H charakterisiert:

$$\sigma_H = \frac{F_i}{A_w} \quad (2.21)$$

F_i ist dabei die in der Grenzflächenschicht zur Überwindung der Haftung erforderliche innere Kraft und A_w die beim Bruch gebildete wahre Fläche. Da die alleinige Messung der Haftfestigkeit nicht möglich ist, wird die z.B. durch Zugversuche ermittelbare Festigkeit als Verbundfestigkeit σ_V bezeichnet:

$$\sigma_V = \frac{F_a}{A_g} \quad (2.22)$$

mit F_a = messbare äußere Kraft, A_g = geometrische Oberfläche. Eine alleinige Aussage über die Haftung ist aber nur anhand dieses Kennwertes nicht möglich, da auch Kohäsions- und Mischbrüche damit charakterisierbar sind. Deshalb muss eine mechanische Prüfung eines Verbundes immer mit der Bruchcharakteristik kombiniert werden.

Es existieren verschiedene Modelle, mit denen das Phänomen der Haftung je nach konkretem Anwendungsfall mehr oder weniger gut beschrieben werden kann. Bischof [47] und Habenicht [48] unterscheiden dabei zwischen den Hauptmodellen der mechanischen und der spezifischen Adhäsion, wobei die spezifische Adhäsion dabei die Polarisations-, die Diffusions-, die elektrostatische und die thermodynamische Theorie sowie die Theorie der chemischen Bindung beinhaltet.

Mechanische Adhäsionstheorie Unter mechanischer Adhäsion versteht man eine mechanische Verklammerung der verfestigten Klebeschicht mit den Poren und Vertiefungen der Fügeiteiloberfläche. Im Fall des Heißklebens können hierzu außerdem die Kräfte gerechnet werden, die durch ein Aufschrumpfen des Polymers auf die raue Oberfläche des Metalls entstehen.

Spezifische Adhäsionstheorien Wenn man stattdessen davon ausgeht, dass die Haftung auf atomare bzw. molekulare Kräfte an der Oberfläche zurückzuführen ist, stellt sich die Frage nach der Reichweite und den Energien dieser Kräfte. Abbildung 2.18 zeigt an der Festkörperoberfläche wirkende Kräfte.

Aus der Reichweite lässt sich folgern, dass die Oberflächenatome des Metalls und die Oberflächenmoleküle des Polymers sehr nah in Kontakt kommen müssen, damit diese Kräfte wirken können. Voraussetzung für die Wirksamkeit der spezifischen Adhäsion ist also vor allem eine gute Benetzbarkeit. Für eine genauere Darstellung der verschiedenen Theorien zur spezifischen Adhäsion sei auf [47] verwiesen. Es muss dabei festgehalten werden, dass keines der bekannten Modelle allein als vollständige Erklärung des Phänomens Haftung gesehen werden kann. Vielmehr beschreibt jedes Modell abhängig vom jeweiligen Stoffsystem einen bestimmten Anteil der auftretenden Effekte.

2.2.5 Brechzahlmodifikation von Polymeren

Die Herstellung von Wellenleitern ist mit den verschiedensten Technologien möglich. Oftmals kommen Replikationstechniken zum Einsatz, bei denen die Struktur des Wellenleiters

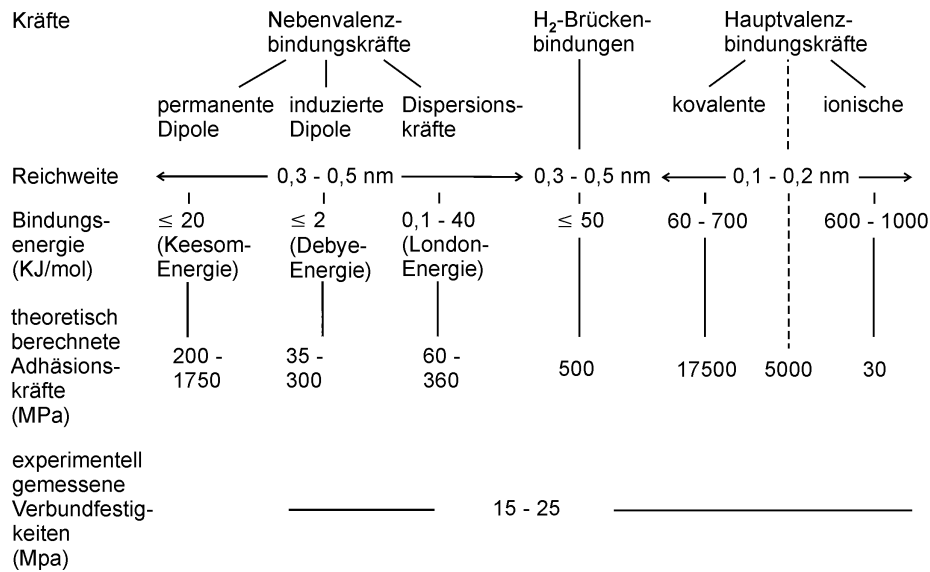


Abbildung 2.18: Wechselwirkungskräfte in Grenzflächenschichten [49].

in einem Mantelmaterial definiert und anschließend mit einem Kernmaterial aufgefüllt wird [50]. Ein anderer Ansatz ist die lokale Modifikation eines Polymers durch Strahlung. Die wichtigsten Verfahren hierbei sind Fotopolymerisation [51], Fotobleaching [52], Fotolocking [53] sowie Fotolyse. Die Herstellung der Rippenstrukturen aus verschiedenen Materialschichten kann durch Strukturierungstechnologien wie etwa reaktives Ionenätzen oder Laserablation geschehen [8].

Speziell die Fotolyse eignet sich zur Herstellung von Wellenleitern in Methacrylaten wie PMMA durch einfache Belichtung mit UV-Strahlung und wurde bereits am IMT untersucht. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich deshalb auf diese Methode. Im Folgenden soll kurz auf die chemischen Grundlagen eingegangen werden, für eine ausführlichere Darstellung sei auf [24] verwiesen.

Die grundlegenden Zusammenhänge zwischen der chemischen Zusammensetzung eines Materials und dem Realteil des Brechungsindex sind durch die Lorentz-Lorenz-Beziehung beschrieben:

$$R_m = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{N_A}{3\epsilon_0} \cdot \alpha_e \quad (2.23)$$

mit molarer Refraktion R_m , Elektronenpolarisierbarkeit α_e , molarer Masse des Monomers M , Dichte ρ , Avogadrokonstante N_A und Dielektrizitätskonstante ϵ_0 . Mit dem molaren Volumen

$$V_m = \frac{M}{\rho} \quad (2.24)$$

ergibt sich für die Brechzahl

$$n = \sqrt{\frac{1 + 2\frac{R_m}{V_m}}{1 - \frac{R_m}{V_m}}} \quad (2.25)$$

Die Änderung der Brechzahl ist nach dieser Gleichung durch zwei Methoden möglich:

- Änderung des molaren Volumens
- Änderung der molaren Refraktion

Bei der Fotolyse von Methacrylaten wird die Carbonylgruppe der Esterseitenkette abgespalten. Das zurückbleibende Alkyl-Radikal wird entweder durch Wasserstoffabstraktion und Ausbildung einer ungesättigten Kohlenstoff-Doppelbindung in der Hauptkette oder mittels eines Hauptkettenbruchs abgebaut. Dies führt bei UV-Bestrahlung im Gegensatz zur Röntgen- oder Teilchenbestrahlung größtenteils zur Bildung von Doppelbindungen in der Hauptkette und selten zu Hauptkettenbrüchen [54]. Durch die beschriebene Reaktion erhöht sich der Anteil der Doppelbindungen und damit die molare Refraktion. Außerdem kommt es zu einem Einsinken des belichteten Bereiches und damit zu einer Veränderung der Dichte des Materials. Diese Effekte führen zu einer lokalen Brechzahlerhöhung [55]. Abbildung 2.19 zeigt die Zerfallsreaktion.

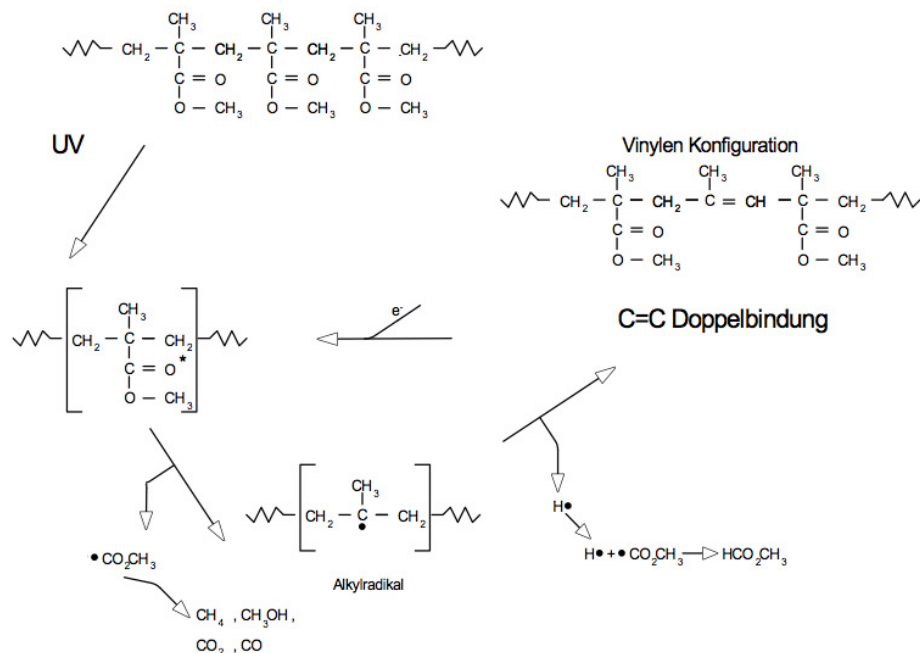


Abbildung 2.19: Fotolyse von PMMA durch UV-Strahlung [54]. Die Reaktion führt zur Bildung von Kohlenstoff-Doppelbindungen und damit zur Brechzahlerhöhung der belichteten Bereiche.

3 Herstellung photonischer Strukturen

Es ist nicht genug zu wissen, man muss auch anwenden; es ist nicht genug zu wollen, man muss auch tun.

(Johann Wolfgang von Goethe)

Die Herstellung der photonischen Strukturen erfolgte zum größten Teil durch das LIGA-Verfahren. Abbildung 3.1 zeigt die einzelnen Prozesse. Nach der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Simulation der Wellenleitergeometrie musste eine geeignete Resisttechnik entwickelt werden, um die Masterstrukturen lithografisch herzustellen (Abschnitt 3.2). Dabei wurden sowohl UV- wie auch Röntgenlithografie zur Strukturierung eingesetzt. Die Masterstrukturen wurden anschließend galvanisch umkopiert (Abschnitt 3.3) und die entstandenen Shim-Formeinsätze wurden durch Vakuumheißprägen in PMMA abgeformt (Abschnitt 3.4). Abschließend wurde durch DUV-Belichtung die Brechzahl modifiziert (Abschnitt 3.5). Die Vereinzelung der Strukturen (Abschnitt 3.6) kann dabei vor oder nach der Belichtung stattfinden. Weiterhin wird in diesem Kapitel auf die Herstellung von DFB-Laserstrukturen eingegangen (Abschnitt 3.7).

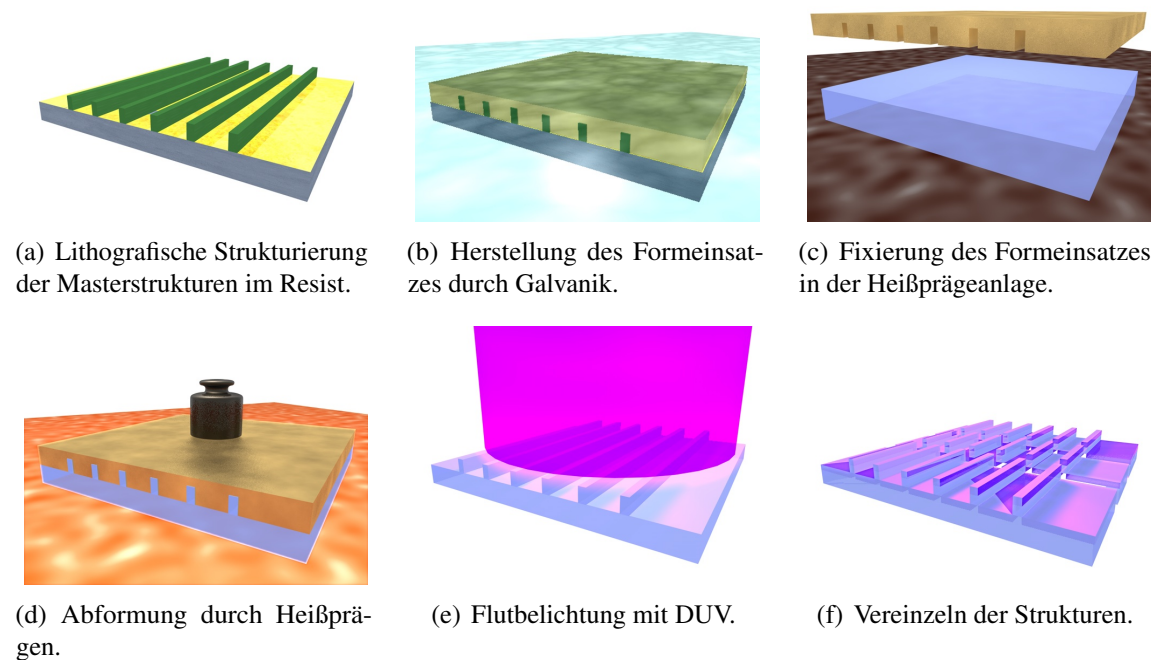


Abbildung 3.1: Schema des Herstellungsverfahrens geprägter Rippenwellenleiter.

3.1 Simulation der Wellenleitergeometrie

Um integriert optische Strukturen genauer zu beschreiben und dabei auch auf komplexe Strukturen wie Krümmung, nichtlineare Medien und Anisotropie analysieren zu können, verwendet man die „Beam Propagation Method“ (BPM). Das Prinzip der Simulation ist es, das optische Feld durch Störungsrechnung in sehr kleinen Schritten Δz längs der Ausbreitungsrichtung zu ermitteln. Dabei werden an jeder Grenzfläche der Simulationsteilschritte die Randbedingungen berücksichtigt. Grundlage dafür ist die skalare Helmholtz-Gleichung

$$\nabla E(r) + k^2 \cdot n(r)^2 \cdot E(r) = 0. \quad (3.1)$$

Der Brechungsindex $n(x, y, z)$ wird in einen konstanten Mittelwert \bar{n} und kleine Abweichungen von ihm zerlegt:

$$n(x, y, z) = \bar{n} + \Delta n(x, y, z) \quad (3.2)$$

Die Basisgleichung der Berechnung ergibt sich unter der Annahme, dass sich das E-Feld in z-Richtung nur schwach verändert ($E(x, y, z) = u(x, y, z) \cdot e^{i\bar{k}z}$), zu:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{i}{2\bar{k}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}) \cdot u \right) \quad (3.3)$$

$\bar{k} = k \cdot \bar{n}$ ist die Referenz-Wellenzahl der sich ausbreitenden Mode. Für eine zweidimensionale Rechnung werden Quotienten in y-Richtung vernachlässigt.

Aufgrund der getroffenen Annahmen unterliegt dieses Verfahren einigen Einschränkungen. Zum einen ist die Ausbreitungsrichtung auf die z-Richtung festgelegt und erlaubt nur Abweichungen in einem engen Winkelbereich. Zum anderen muss die Änderungsrate des Brechungsindex klein sein. Auch werden Reflexion und damit rücklaufende Wellenlösungen sowie Phasenvariation nicht unterstützt. Für die Simulation der geraden Wellenleiter und der MMI-Koppler ist die BPM aber ausreichend, da keine großen Richtungswechsel der Ausbreitung und kleine Brechzahlhübe auftreten.

Die Festlegung der geometrischen Abmaße der Rippenwellenleiterstruktur wurden Simulationen mit der auf der BPM beruhenden Software „BeamPROP“ von RSoft durchgeführt. Das Programm eignet sich für die Simulation zahlreicher optischen Anwendungen mit komplexen Brechungsprofilen in nahezu allen Geometrien wie z.B. einmodigen und mehrmodigen Wellenleitern, Y-Verzweigern, Polarisations-elementen etc. Für die Ausbreitungsrichtung der Welle in den Geometrien erlaubt die BPM jedoch nur kleine Richtungsänderungen in einem engen Winkelbereich. Neben dem Modenspektrum können auch Feldverteilungen berechnet werden. Bei der Simulation wird die optische Struktur in Volumenelemente unterteilt und entlang der Ausbreitungsrichtung die Feldverteilungen schrittweise berechnet. Dafür werden folgende Parameter benötigt:

- Brechungsindexprofil $n(x, y, z)$
- Wellenleitergeometrie
- Feld der Eingangswelle $u(x, y, z)$

Für den BPM-Algorithmus sind

- Simulationsbereich (x, y, z)
- Laterale Schrittweiten $\Delta x, \Delta y$
- Transversale Schrittweite Δz

für die Genauigkeit der Simulation maßgeblich.

Die Simulation wurde genutzt, um die Geometrie der in dieser Arbeit betrachteten Rippenwellenleiter festzulegen. Dazu wurde basierend auf in Vorarbeiten ermittelten Messwerten [24] die Modenkennlinien ermittelt (Abb. 3.2). Laut dieser Simulation ist eine Mode ab einer Breite von ca. 10 μm ausbreitungsfähig; die obere Grenze (Cut-off-Breite) für monomodiges Verhalten beträgt ca. 22 μm . Basierend darauf wurden die Breite für monomodige Wellenleiter im ersten Design auf 17 μm festgelegt.

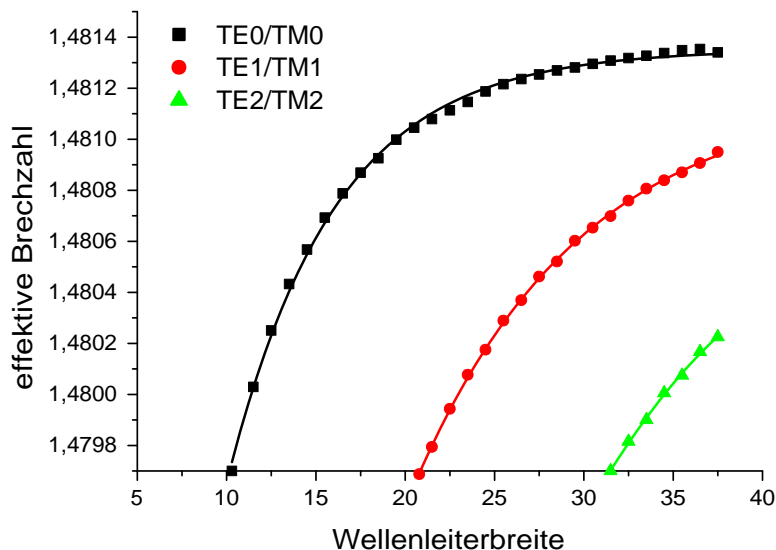


Abbildung 3.2: Simulierte Modenausbreitung in einem Rippenwellenleiter bei einer Wellenlänge von 1550 nm.

Die für die Simulation verwendeten Parameter waren:

- Brechzahländerung $\Delta n = 0,008$
- Substratbrechzahl $n_s = 1,4797$
- Wellenlänge: 1550 nm
- Profil: exponentieller Abfall der Brechzahl in vertikaler Richtung (als selbstdefinierte Profildfunktion nach [24])

Zur Abschätzung der Rippenhöhe wurde eine Rippe in BeamPROP modelliert und deren Grundmode berechnet. Die Intensität fällt in y -Richtung nach ca. $17\ \mu\text{m}$ auf $1/e^2$ ab. Dieser Wert ist nur als Richtwert zu verstehen, da die Genauigkeit des Modells noch nicht ausreichend getestet werden konnte. Der Parameter ist allerdings im Vergleich zur Strukturbreite von geringerer Bedeutung, da die Höhe des Formeinsatzes durch die Einstellung der Resistdicke angepasst werden kann und die Herstellung eines Shim-Formeinsatzes bei vorhandener Maske einen relativ geringen Aufwand darstellt. Abbildung 3.3 zeigt die simulierte Grundmode sowie eine grafische Darstellung des Brechzahlverlaufes im Wellenleitermodell.

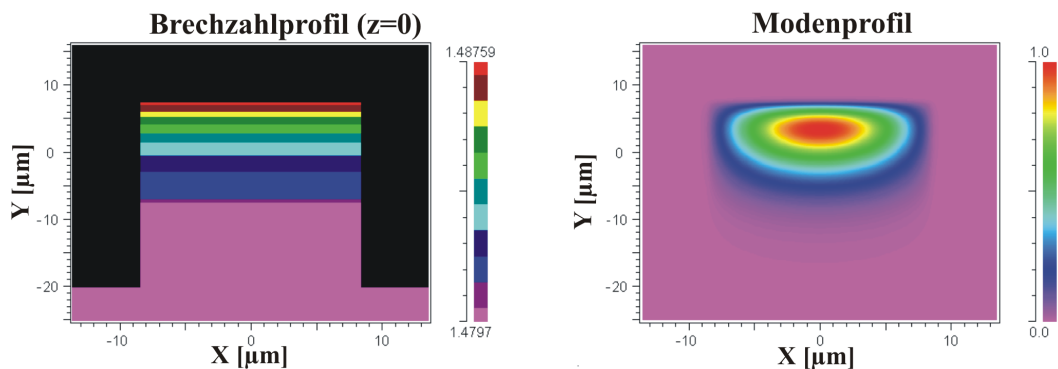


Abbildung 3.3: Grafische Darstellung des verwendeten Simulationsmodells und simulierte Intensitätsverteilung der Grundmode des Rippenwellenleiters.

Auf Basis dieser Simulationen wurden Masken für UV-Lithografie sowie für Röntgenlithographie entworfen und hergestellt. Mit diesen Masken wurden mit den in Abschnitt 2.2 beschriebenen Prozessen Rippenwellenleiter hergestellt. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf geraden Wellenleitern und multimodigen Interferenzkopplern. Die Breite der Rippenwellenleiter sowie die Länge des MMI-Bereiches der Koppler wurde dabei variiert, um Toleranzen des Herstellungsprozesses auszugleichen.

3.2 Resisttechnik

3.2.1 Resisttechnik für UV-Lithografie

Zur Herstellung der Formeinsätze kamen die Negativ-Fotoresiste SU-8-10 sowie AR-N 4400-25 zum Einsatz. SU-8 (Hersteller: MicroChem Corporation) ist ein Negativ-Fotoresist bestehend aus Epoxydharz, Triarylsulfoniumsalz und Lösungsmittel. Die Belichtung führt zum Zerfall des Salzes und zur Bildung von Säure, die im anschließenden Post-Exposure-Bake als Katalysator für die Vernetzung des Epoxydharzes dient. Mit SU-8 lassen sich auch sehr dicke Schichten strukturieren und dabei sehr steile Strukturkanten realisieren [56]. AR-N 4400 (Hersteller: Allresist GmbH) ist ein Negativresist auf Novolakbasis. Er wurde

speziell für die Herstellung hoher Strukturen und Galvanoformung entwickelt. Im Gegensatz zu SU-8 lässt sich AR-N 4400 auch nach der Vernetzung chemisch relativ einfach entfernen [57].

Für die Resiste wurden Schleuderkurven ermittelt (siehe Abbildungen 3.4 und 3.5). Ziel war es, eine möglichst homogene Resistschicht zu erzeugen, deren Dicke der durch die Simulation ermittelten Höhe der Rippenstrukturen entspricht. Für das Aufschleudern wurde ein Spincoater vom Typ RC8 (Karl Süss) benutzt, die Messungen der Dicke erfolgten mit einem Weißlichtinterferometer (MPV-SP, Leitz AG).

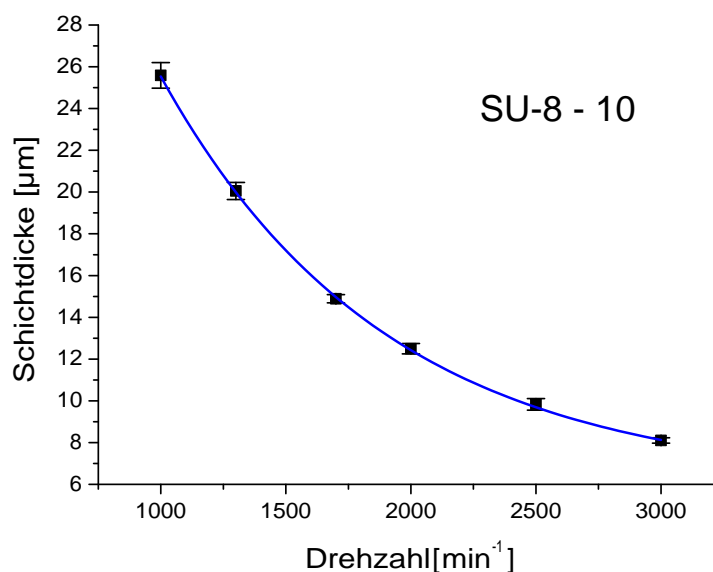


Abbildung 3.4: Ermittelte Schleuderkurve des Resists SU-8-10.

Da für die Galvanik eine umlaufende Kontaktierung am Rand notwendig ist (siehe 2.2.2), wurde nach dem Prebake der Resist in einem ca. 5 mm breiten Bereich am Rand des Wafers mit Aceton entfernt. Die für die Belichtung notwendige Dosis wurde aus der Kontrastkurve des Resistes sowie den Eigenschaften des Belichtungsgerätes berechnet. Das mathematische Modell für die Berechnung ist in [58] beschrieben. Für SU-8 konnte dabei auf bereits vorhandene Daten zurückgegriffen werden. Die Kontrastkurve von AR-N 4400 wurde in Vorversuchen ermittelt. Zum Test der ermittelten Dosis wurde ein Wafer mit einer 20 μm dicken Schicht Resist beschichtet und anschließend belichtet. Abbildung 3.6 zeigt REM-Aufnahmen der Strukturen. Damit konnte gezeigt werden, dass sich mit dem Negativresist AR-N 4400 Strukturen mit den gewünschten Aspektverhältnissen herstellen lassen. Er besitzt zudem eine gute Kantenqualität und ist deshalb für die Herstellung der Rippenwellenleiterstrukturen geeignet.

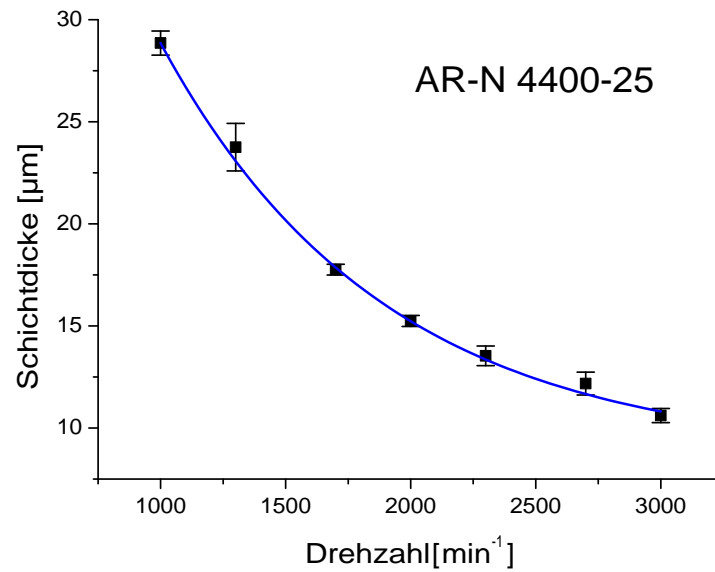


Abbildung 3.5: Ermittelte Schleuderkurve des Resists AR-N 4400–25.

Für die vorliegende Arbeit wurden Shim-Formeinsätze auf Basis beider Resiste hergestellt. Die vollständigen Parameter für die UV-Lithografie sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Es hat sich gezeigt, dass die Verwendung von mit SU-8 hergestellten Shims bei der Abformung deutlich schlechtere Ergebnisse liefert. Dies ist vor allem durch zwei Effekte bedingt: Haftung des Resists an der Maske während der Belichtung sowie schlechte Entfernbarekeit des Resists aus den Strukturen.

Nach der elektrochemischen Abscheidung des Formeinsatzes muss der entstandene Nickel-Shim vom Wafer getrennt werden. In der Regel war dies zerstörungsfrei durch

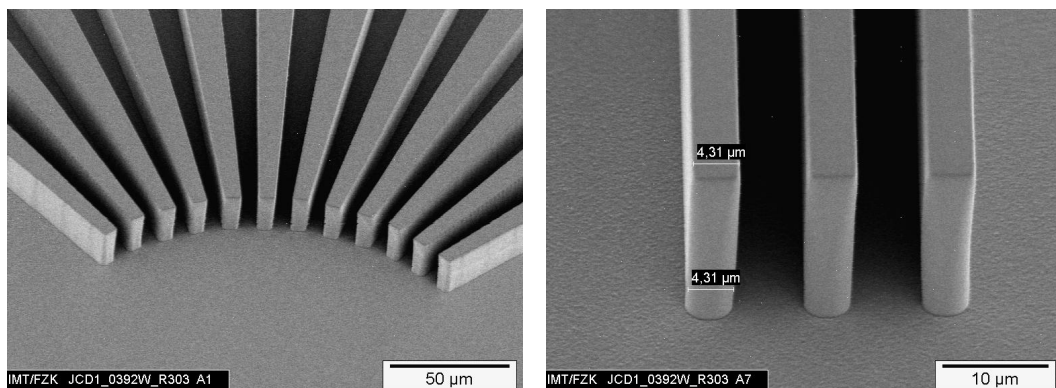


Abbildung 3.6: Teststrukturen aus durch UV-Lithografie strukturiertem AR-N 4400 Negativresist.

leichte elastische Deformation des Verbundes möglich. Der Resist verbleibt teilweise in den Strukturen und muss anschließend chemisch entfernt werden. Dies geschah bei SU-8 durch Veraschen im Sauerstoffplasma. Dabei erwies ich die hohe chemische Beständigkeit von SU-8 [59] als problematisch. Auch wenn sich im Sauerstoffplasma der größte Teil des Resistes veraschen ließ, kam es teilweise zu Passivierung, wodurch nicht entfernbare Resistreste in den Mikrokavitäten des Formeinsatzes verblieben und die Strukturen damit unbrauchbar machten. AR-N 4400 ist weniger chemisch beständig und kann z.T. nasschemisch durch spezielle Remover oder mit Aceton gelöst werden. Als praktikabel hat sich ein mehrstündiges Anlösen in Aceton und anschließende Plasmaveraschung erwiesen. Verbleibende Verunreinigungen oder bei der Galvanik durch Unterplattierung entstehende feine Grate ließen sich in der Regel durch eine abschließende Ultraschallreinigung entfernen.

Während der Belichtung von SU-8 kam es zum mehr oder weniger großflächigen Haften des Resistes an der Chrommaske, was zu einer Beschädigung des Resistes und damit zur Beeinträchtigung der Qualität der Formeinsätze führte. Dies wiederum führt zu einer Erhöhung der Entformkräfte und zu schlechterer Qualität der Abformung bis hin zur Zerstörung der Strukturen beim Heißprägeprozess.

Parameter	SU-8-10	CAR-4400-25
Schleuderdrehzahl und -zeit	1700 min ⁻¹ ; 40 s	1250 min ⁻¹ ; 3 min
Schichtdicke des Resistes	16 µm	19 µm
Prebake	95 °C; 5 min Hotplate	85 °C; 5 min Hotplate
Belichtungsdosis	790 mJ/cm ² gemessen bei 365 nm	3220 mJ/cm ² gemessen bei 405 nm
Post-Exposure-Bake	65 °C; 35 min 95 °C; 15 min Ofen	95 °C; 15 min Ofen
Entwickler, Entwicklungszeit	PGMEA 40 min (Becherglas)	AR-300-44 12 min (Becherglas)

Tabelle 3.1: Parameter für die UV-Lithografie zur Herstellung von Shim-Formeinsätzen.

3.2.2 Resisttechnik für Röntgenlithografie

Für die röntgenlithografische Strukturierung wurde der Positivresist PMMA genutzt. Da für die Formeinsätze relativ geringe Strukturhöhen von weniger als 20 μm notwendig waren, konnte nicht auf die üblicherweise verwendete Technik des Aufklebens von PMMA-Platten auf vorbereitete Substrate zurückgegriffen werden. Statt dessen wurde der Resist in gelöster Form auf einen mit Titanoxid beschichteten Wafer aufgeschleudert. Kommerziell erhältliches in Anisol gelöstes PMMA besitzt nur einen Feststoffanteil von maximal 11 %, was zur Herstellung dicker Schichten nicht ausreicht (siehe Schleuderkurve Abb. 3.7). Deshalb wurden für die Formeinsätze drei Schichten aufgeschleudert (Drehzahl 450^{-1} für 3 min) und nach jedem Aufschleudern bei 180°C ausgeheizt. Dabei ist zu bemerken, dass die zweite und dritte Schicht eine geringfügig höhere Dicke aufweisen als die erste Schicht. Dies ist auf die Aufnahme von Lösungsmittel in den bereits ausgeheizten Resist und die damit verbundene Viskositätssteigerung zu erklären. Die Gesamtschichtdicke betrug 19 μm . Bei dem Verfahren können in der Resistoberfläche feine Risse entstehen, die sich allerdings nur an der Oberfläche befinden und keinen erkennbaren Einfluss auf die Qualität des Formeinsatzes haben.

Ein Problem bei der Verwendung von PMMA stellt die Randentlackung dar. Es ist im Gegensatz zur UV-Lithografie nicht möglich, den Resist auf einfache Weise nach dem Aufschleudern zu entfernen. Für die Herstellung der Formeinsätze wurde dies dadurch gelöst, dass der Rand des Wafers vor dem Belackern abgeklebt wurde. Das verwendete Adhäsionsband (Polyester Klebeband 851, 3M GmbH) war beständig gegenüber dem Prebake und ließ sich gut wieder entfernen.

Die Belichtung des Resistes erfolgte am Strahlrohr „Litho1“ der Synchrotronquelle ANKA. Das Strahlrohr ist mit einem Spiegel (Kippwinkel $15,4\text{ mrad}$) ausgerüstet, um den kurzwelligen Anteil der Strahlung herauszufiltern. Die notwendige Strahlungs-dosis wurde durch das am IMT entwickelte Programm „DoSim“ berechnet und betrug $3,5\text{ kJ/cm}^3$. Als Maske wurde eine Röntgenzwischenmaske benutzt, die aus Goldabsorberstrukturen mit einer Dicke von $2,2\text{ }\mu\text{m}$ auf einer $2\text{--}3\text{ }\mu\text{m}$ dicken oxidierten Titanfolie besteht [56]. Aufgrund der geringen Resisthöhe war es nicht notwendig, eine Arbeitsmaske mit dickeren Absorberstrukturen herzustellen. Nach einer ersten Bestrahlung zur Definierung der Struktur wurde in einem zweiten Bestrahlungsschritt die Fläche der Maske vollständig mit einem Absorber aus Stahl abgedeckt. Anschließend wurde der Resist außerhalb der Strukturen vollständig bestrahlt, um zu vermeiden, dass die Resistfläche bei der anschließenden Galvanik nicht überwächst (siehe Abschnitt 3.3.2). Die Entwicklung erfolgte mit einer Lösung aus 60 Vol-% Diethylenglykolmonobutylether, 20 Vol-% Morpholin, 5 Vol-% Aethanolamin und 15 Vol-% deionisiertem Wasser („GG-Entwickler“) bei Raumtemperatur mit anschließendem Spülen in einer Lösung aus 80 Vol-% Diethylenglykolmonobutylether und 15 Vol-% deionisiertem Wasser („BDG“) [61].

Es hat sich gezeigt, dass die nach der Galvanik und dem Entfernen des Resistes auf dem Formeinsatz zurückbleibende Titanoxidschicht die Abformung negativ beeinflusst. Da Titanoxid chemisch sehr beständig ist, wurde es durch Polieren mechanisch entfernt. Um

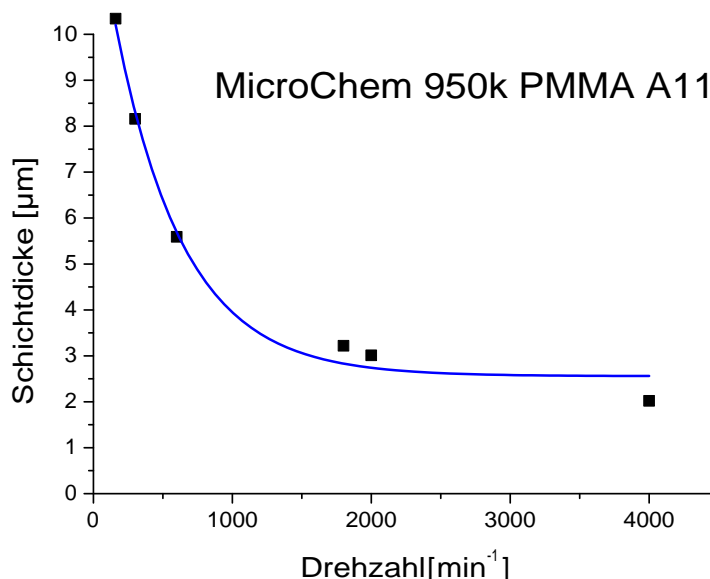


Abbildung 3.7: Schleuderkurve des Resists 950k PMMA A11 [60].

die dabei auftretende Belastung und die Bearbeitungszeit des Formeinsatzes zu minimieren, wurde die Titanschicht nicht wie üblich mehrere Minuten [56], sondern lediglich 30 s mit 30%iger Wasserstoffperoxidlösung oxidiert. Ein vollständiger Verzicht auf das Oxidieren ist nicht möglich, da die Haftung des PMMA auf reinem Titan nicht ausreicht.

3.3 Galvanik

Die Formeinsätze wurden wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben durch Nickel-Galvanik hergestellt. Für die Galvanik muss eine geeignete leitfähige Startschicht vorhanden sein. Dafür wurden im Rahmen der Arbeit drei Möglichkeiten näher untersucht:

- Metallisierung nach der Resiststrukturierung über alle Strukturen
- Metallisierung des Substrates vor dem Aufschleudern des Resists
- Verwendung von hoch n-dotierten Silizium-Substraten

3.3.1 Metallisierung nach der Resiststrukturierung über alle Strukturen

Abbildung 3.8 zeigt schematisch die Galvanikstartschicht bei einer Metallisierung nach der Resiststrukturierung. Schwierigkeiten ergeben sich bei dieser Art der Metallisierung,

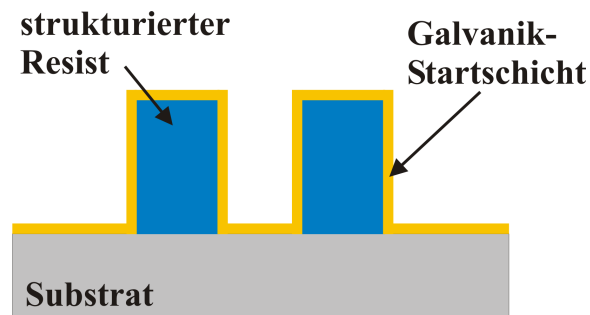
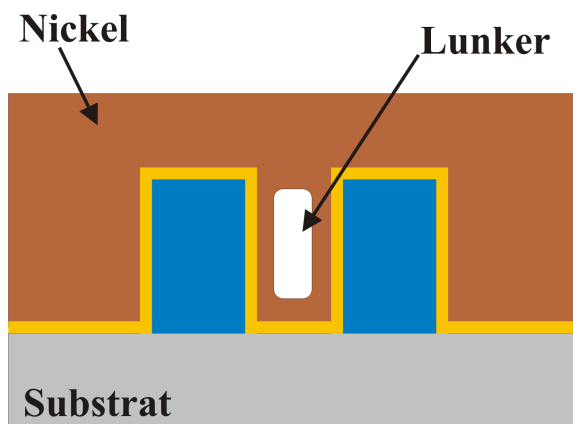
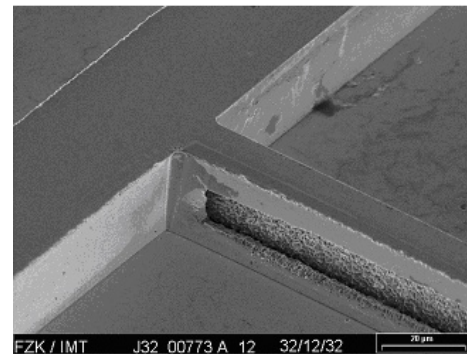


Abbildung 3.8: Galvanikstartschicht auf den Resiststrukturen.

wenn das Aspektverhältnis in den aufwachsenden Bereichen deutlich größer als 1,0 ist. Es kann dadurch zur Bildung von Hohlräumen (Lunkern) kommen wie in Abbildung 3.9 zu sehen. Ursache dafür ist der verminderte Elektrolytaustausch in den Kavitäten durch die Metallabscheidung an den Seitenflächen und der Oberfläche des Resistes.



(a) Prinzip der Lunkerbildung.



(b) Verbleibende Hohlräume in einer Struktur mit einem Aspektverhältnis von drei.

Abbildung 3.9: Lunkerbildung bei galvanisierten Nickelstrukturen.

3.3.2 Metallisierung des Substrates vor dem Aufschleudern des Resists

Um die Entstehung von Lunkern zu vermeiden, kann man vor dem Auftrag und der Strukturierung des Resists das Substrat vollflächig metallisieren (siehe Abbildung 3.10). Das Aufwachsen des Nickels zwischen den Resiststrukturen erfolgt dann nur von einer Seite. Der Nachteil des Verfahrens ist die Bildung von so genannten Galvanik-Nähten. Für geringe zu überwachsende Flächen wie bei Rippenwellenleitern stellt dieser Effekt allerdings kein

Problem dar. Die Größe der entstehenden Defekte liegt meist deutlich unterhalb der Größe der durch andere Effekte auftretenden Fehler.

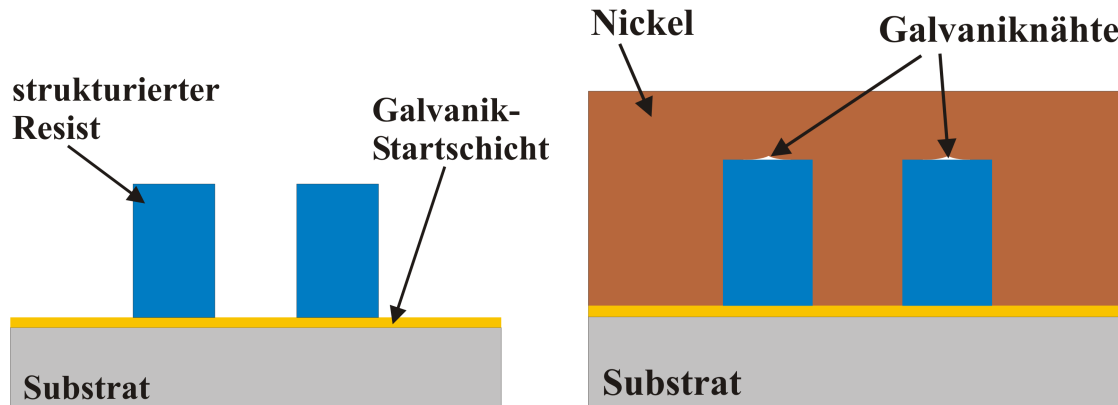


Abbildung 3.10: Schematische Darstellung der Bildung von Galvaniknähten beim Überwachsen von Resiststrukturen.

Die Haftung des Resists auf der Metallisierung ist von entscheidender Bedeutung für die Anwendbarkeit des Verfahrens. SU-8 zeigt sehr schlechte Haftung auf Edelmetallen sowie auch auf Titan. Gute Ergebnisse wurden mit einer Chrom/Gold/Chrom-Schichtfolge erzielt, wobei die Goldschicht für die Kontaktierung bei der Galvanik notwendig ist, da eine reine Chromschicht einen zu hohen Widerstand aufweist. Der Resist AR-4400 zeigt eine gute Haftung auf gesputterten Titanschichten, für PMMA wurde Titanoxid als Startschicht verwendet (siehe 3.2.2).

Um ein vollständiges Überwachsen der Strukturen zu erreichen, ist eine entsprechende Anpassung des Designs notwendig. Die Breite der zu überwachsenden Resistflächen muss klein gegenüber der Dicke des Shims sein, um sicherzustellen, dass das Metall eine geschlossene Fläche bilden kann. Wird dies nicht beachtet, so entstehen Löcher im Shim, die zu Problemen bei der Abformung führen.

3.3.3 Verwendung von hoch n-dotierten Si-Substraten

Wenn die Haftung des Resistes auf einer Metallschicht nicht gewährleistet ist, kann man auch hochdotiertes Silizium als Galvanik-Kontakt verwenden [62]. Das Verfahren zeigt die gleichen Eigenschaften wie die Metallisierung unter dem Resist. Technologisch ist diese Methode allerdings aufwendiger. So muss kurz vor dem Einbringen des Substrates in das Galvanikbad die Siliziumoberfläche durch Flusssäurebehandlung von ihrer natürlichen Oxidschicht befreit werden und die Kontaktierung über eine Titanklemme erfolgen. Da dies nach dem Einbau in eine Verschaltung geschehen muss, stellen sich besondere Anforderungen an die Materialien der Verschaltung und das Ätzgefäß.

Für die Herstellung von Rippenwellenleitern wurde nach der Evaluierung dieser drei

Möglichkeiten die Methode der Metallisierung vor der Resistbeschichtung verwendet. Der Prozess funktionierte reproduzierbar und lieferte gute Ergebnisse.

3.4 Abformung

3.4.1 Fixierung der Shim-Formeinsätze

Die Verwendung von Nickel-Shims stellt spezielle Anforderungen an die Fixierung der Formeinsätze während der Abformung. Bisher verwendete Formeinsätze haben eine Dicke von ca. fünf Millimetern und lassen sich durch Anbringen von Bohrungen oder stufenförmigen Haltestrukturen form- oder kraftschlüssig an der Grundplatte der Heißprägeanlagen befestigen (Abb. 3.11). Dies ist durch die geringe Dicke von nur 300 bis 600 μm bei den Shim-Formeinsätzen nicht ohne weiteres möglich. Weiterhin sind die bekannten Konzepte der Halterung von Shims aus der CD-Herstellung [63, 64] aufgrund der durch die höheren Aspektverhältnisse auftretenden höheren Entformkräfte nicht ohne weiteres übertragbar.

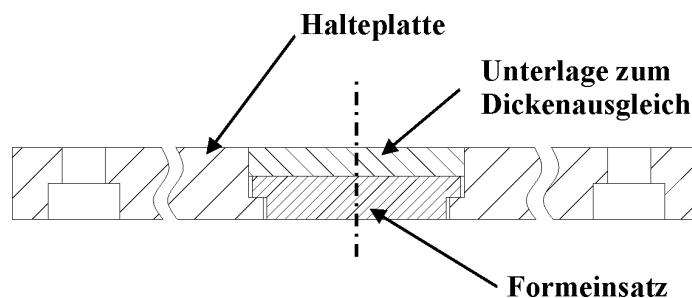


Abbildung 3.11: Klassische Halterung für Formeinsätze durch Einbau in eine massive Halteplatte.

Als Teil der Arbeit wurde eine Methode entwickelt, die das sichere und reproduzierbare Befestigen von Nickel-Shims in den am IMT verwendeten Heißprägeanlagen ermöglicht. Gewünscht war dabei, dass die galvanisch hergestellten Shims ohne weitere mechanische Bearbeitung verwendet werden sollten, um den Prozess zu vereinfachen sowie das Risiko einer Beschädigung der Mikrostrukturen zu verringern. Weiterhin wurde eine lösbare Verbindung von Grundplatte und Shim angestrebt.

Es wurden bislang am IMT folgende Konzepte der Shimfixierung untersucht:

Galvanisches Fügen mit massiver Halteplatte Versuche zum galvanischen Fügen der Nickel-Shims mit einer mit konischen Bohrungen versehenen massiven Nickel-Halteplatte führten nicht zum erwünschten Ergebnis, da sich die Bohrungen beim Abformen deutlich durch den Shim abzeichneten [65].

Aufkleben des Shims mit keramischem Klebstoff Klebstoffe auf Keramikbasis zeigen eine sehr hohe Temperaturbeständigkeit. Es wurden in der Vergangenheit Versuche zum Aufkleben mit keramischen Klebstoffen durchgeführt [65, 66]. Die Kleber ließen sich bis zu einem Shimformat von 89 mm Durchmesser verwenden, bei größeren Formaten härteten sie in der Mitte nicht vollständig aus. Weiterhin bildeten sich in der Kleberschicht Agglomerationen von festen Bestandteilen, die beim Abformen gegen die Shimrückseite drücken und zu einer plastischen Deformation des Shims führen. Diese Technologie ist deshalb für die Shimhalterung nicht geeignet.

Aufkleben des Shims mit Epoxydharzklebstoff Bei Tests zum Aufkleben von Shims war festzustellen, dass sich der Klebstoff bei manuellem Auftrag mit Pinsel oder Spachtel keine dünnen, homogenen Schichten bildet. Das kann dazu führen, dass der Klebstoff beim Aufeinanderdrücken von Halteplatte und Shim am Rand unter dem Shim hervortritt und auf die Strukturseite fließt und so die Mikrostrukturen beschädigt. In weiteren Versuchen wurde das Epoxydharz mit einer Walze aufgetragen. Diese Technik wird standardmäßig beim Aufkleben von Titan-Membranen bei der Herstellung von Röntgenmasken verwendet. Die hergestellten Schichten waren vergleichsweise homogen, die Schichtdicken betragen ca. 20 bis 60 μm . Erste Abformtests mit einem 4"-Shim ergaben zufrieden stellende Ergebnisse [67].

Epoxydharze haben typischerweise Wärmebeständigkeit im Bereich von -40 bis 200 °C. Auch unterhalb der Maximaltemperatur kann es aber beim Prägen durch die aufgebrachte Kraft zu einem Fließen des Klebers kommen, was zur Beschädigung des abgeformten Teiles und des Formeinsatzes führen kann.

Alle bisherigen Konzepte konnten aufgrund der genannten Mängel nicht für die Halterung von Shim-Formeinsatzes angewendet werden. Für die Abformung der Wellenleiter wurde deshalb eine andere Variante gewählt.

Aufkleben des Shims mit thermoplastischer Klebeschicht (Heißkleben) Für die Entformung der abgeformten Teile wird beim Heißprägen eine aufgeraute Gegenplatte verwendet, an der die Restschicht des Abformteils stark genug haftet, um die Entformkräfte zu übertragen. Diese Haftung eines thermoplastischen Polymers kann auch für die Halterung der Nickel-Shims verwendet werden. Dies hat den Vorteil der einfachen Verarbeitung mit den bestehenden Anlagen und ist sehr flexibel bezüglich der Abmessungen des Shim-Formeinsatzes. Im Rahmen der Technologieentwicklung in dieser Arbeit wurde diese Methode deshalb näher untersucht.

Um das Haftungsverhalten von Nickel-Shims auf Stahlplatten zu untersuchen, wurden Zugversuche durchgeführt. Ziel war es, eine einfach messbare physikalische Größe zu bestimmen, die eine Aussage über eine Verbesserung oder Verschlechterung der Haftung unter verschiedenen Bedingungen ermöglicht. Als Proben wurden dabei galvanisch aufgewachsene und erodierte Nickel-Plättchen verwendet, deren Oberflächenrauheit auf der Rückseite

mit denen der Shim-Formeinsätze übereinstimmt. Diese wurden in einer Heißpräganlage (WUM02, Jenoptik Mikrotechnik) mit thermoplastischer Polymerfolie als Zwischenschicht auf eine Stahlplatte mit einer definierten Oberflächenstruktur geklebt. Abbildung 3.12 zeigt den Aufbau des Klebeverbundes. Die Verklebetemperatur betrug 175 °C bei einem Druck von 10 bis 16 MPa. Zur Halterung in der Zugprüfmaschine (Universalprüfmaschine Instron 4505) wurde ein Probenhalter mit Sekundenkleber auf die Vorderseite des Nickel-Plättchens geklebt.

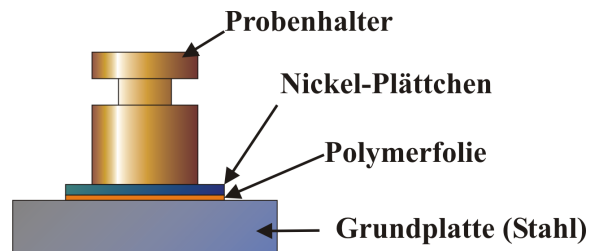


Abbildung 3.12: Skizze einer für die Zugversuche verwendeten Probe.

Als thermoplastischer Heißkleber wurde PMMA-Folie (Plexiglas XT farblos 99845, Degussa) verwendet. Die Foliendicke betrug 40 μm , für das Aufkleben wurden jeweils zwei Lagen der Folie benutzt. PMMA wurde als Material ausgewählt, weil es leicht chemisch entfernbar ist. Damit ist die Forderung nach der Lösbarkeit der Verbindung erfüllt. Nicht mehr genutzte Formeinsätze können leicht wieder von der verwendeten Grundplatte entfernt werden. Da die PMMA-Klebeschicht dasselbe Viskositätsverhalten zeigt wie das zu prägende Halbzeug, kommt es während des Heißprägeprozesses zum Erweichen der Klebeschicht. Dies spielt jedoch für die Haftfestigkeit keine Rolle, da dabei Zugkräfte übertragen werden müssen. Während der Entformung liegt die Temperatur der Klebeschicht wieder unterhalb der Glasübergangstemperatur des Polymers. Damit kann eine sichere Entformung gewährleistet werden, solange die auftretenden Entformkräfte kleiner sind als die von der Klebeschicht maximal übertragbare Kraft.

In Vorversuchen konnte festgestellt werden, dass bei den Zugversuchen der Verbund immer an der Grenzfläche zwischen Polymer und einem der Metalle getrennt wurde (Adhäsionsbruch). Es kann also bei der vorliegenden Verbindung davon ausgegangen werden, dass es nicht zu einer Beanspruchung des Polymers im Volumen kommt. Deshalb ist auch die Dicke der Polymerschicht für die Verbundfestigkeit nicht ausschlaggebend, solange sie eine minimale Dicke nicht unterschreitet, die durch die Rauheit der Metalloberflächen vorgegeben wird [48].

Eine typische Einflussgröße zur Charakterisierung von Oberflächen ist der Mittenrauhwert R_a . Dieser wird durch die Bearbeitung des Materials definiert. In einer Versuchsreihe wurden Stahlplatten mit verschiedenen Oberflächen mit jeweils gleichen Parametern vorbehandelt und mit Nickelplättchen verklebt. Die Ergebnisse der Versuche sind in Abbildung 3.13 dargestellt.

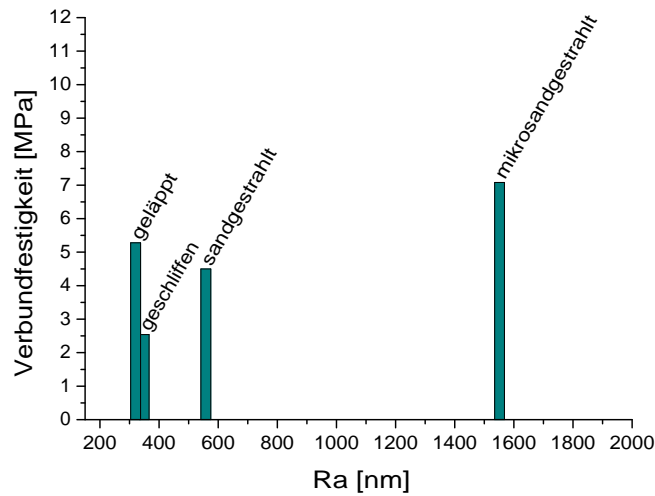


Abbildung 3.13: Verbundfestigkeit von Proben mit verschiedenen Oberflächen.

Es ist erkennbar, dass die Festigkeit der Klebung nicht mit der Rauheit der Oberfläche korreliert ist, da die deutlich rauere sandgestrahlte Oberfläche eine geringere Haftfestigkeit als die geläppte Oberfläche aufweist. Die geschliffenen Stahlplatten haben eine Rauheit in der Größenordnung der geläpten Platten, sind aber in Bezug auf die Haftfestigkeit wesentlich schlechter zum Verkleben geeignet. Damit ist die Erhöhung der Rauheit einer Oberfläche keine ausreichende Vorbereitungsmethode für eine Vergrößerung der Haftung. Weiterhin sind die Ergebnisse nicht ohne weiteres mit dem mechanischen Modell der Haftung zu erklären. Die bessere Haftung der geläpten Platten gegenüber den sandgestrahlten ließe sich zwar eventuell dadurch erklären, dass aufgrund der Bearbeitung beim Läppen Hinterschnitte entstehen, die durch Formschluss mit dem flüssigen Polymer größere Kräfte übertragen können. Allerdings ist dieser Aspekt nicht geeignet um die gute Haftung auf der geschliffenen Oberfläche zu erklären.

Ein anderer Ansatz findet sich im Bereich der thermodynamischen Adhäsionstheorien nach Zisman, Fowkes, Good u.a. [47]. Gegenstand sind die spezifischen Oberflächenenergien der kontaktierenden Phasen. Eine gängige Methode zur Bestimmung der Oberflächenenergie ist die Kontaktwinkelmessung an einem liegenden Tropfen in Verbindung mit der Anwendung der Youngschen Gleichung

$$\cos\Theta = \frac{\sigma_S - \sigma_{LS}}{\sigma_L} \quad (3.4)$$

mit Θ = Kontaktwinkel, σ_S = freie Oberflächenenergie des Festkörpers, σ_{LS} = Grenzflächenenergie zwischen Flüssigkeit und Festkörper sowie σ_L = Oberflächenspannung der Flüssigkeit (siehe auch Abb. 3.14).

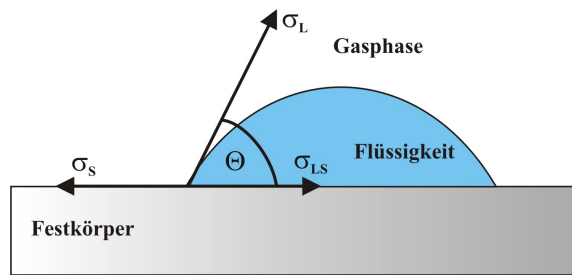


Abbildung 3.14: Kontaktwinkelbestimmung an einem liegenden Tropfen.

Eine Verringerung der Oberflächenenergie des Metalls sollte entsprechend zu einer Verringerung des Kontaktwinkels führen. In der Technik wird meist eine Plasmabehandlung eingesetzt, um gezielt Oberflächeneigenschaften zu verändern. Für die Haftung von Nickel-Shims konnte in ersten Versuchen gezeigt werden, dass sich die Verbundfestigkeit nach einer Behandlung der Metalloberflächen von Shim und Grundplatte im Sauerstoffplasma (4Tec-Plasmaanlage, 100 W, 0,4 mbar, 15 min) deutlich erhöht (siehe Abb. 3.15).

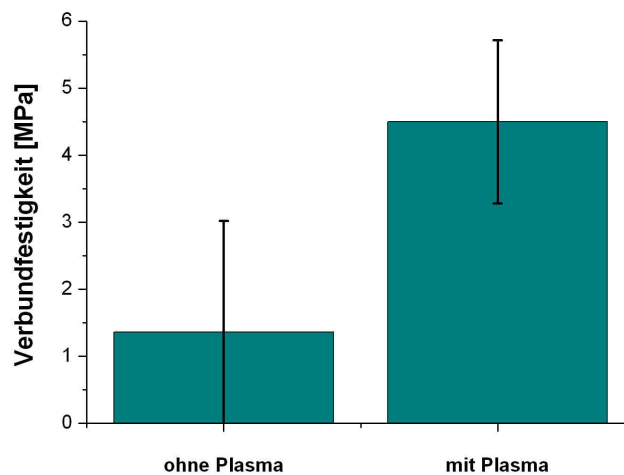


Abbildung 3.15: Verbundfestigkeit der Proben vor und nach einer Behandlung im Sauerstoffplasma.

Zur Analyse dieser Beobachtung wurde der Kontaktwinkel auf der Nickeloberfläche sowie auf der Oberfläche von sandgestrahlten Metallplatten gemessen. Die Messungen wurden mit einem Kontaktwinkelmessgerät (Contact Angle System OCA, Data Physics) durchgeführt. Als Flüssigkeit für die Messungen wurde deionisiertes Wasser verwendet. Wasser besitzt eine höhere Oberflächenspannung als Polymere und kann deshalb zur Simulation des Verhaltens genutzt werden [48]. Es ist deutlich erkennbar, dass sich die Oberflächenenergie durch das Sauerstoffplasma deutlich verringert. Speziell beim Nickel-Shim war die Benetzbarkeit deutlich erhöht. Der Effekt lässt nach einiger Zeit wieder nach, nach fünf

Tagen konnte beim Nickel kein Unterschied mehr zur unbehandelten Oberfläche festgestellt werden.

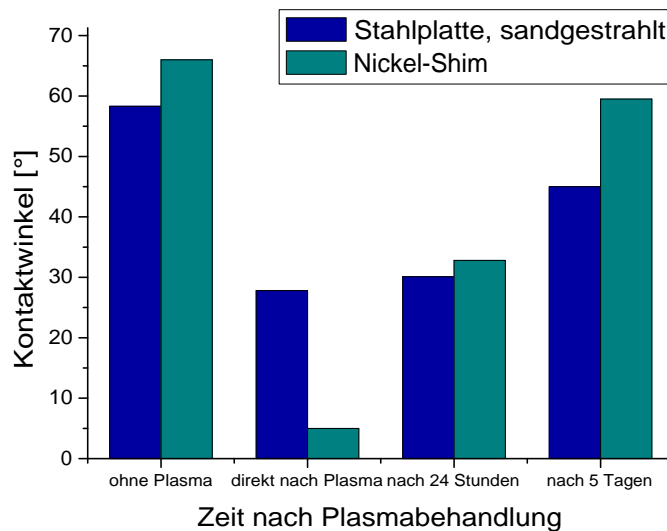


Abbildung 3.16: Veränderung der Benetzbarkeit über die Zeit nach der Plasmabehandlung.

Anschließend wurde bei Proben, deren Oberfläche zu unterschiedlichen Zeitpunkten vor dem Aufkleben behandelt worden war, die Verbundfestigkeit ermittelt. Alle Oberflächen wurden vor der Plasmabehandlung gründlich mit Isopropanol gereinigt. Wie in Abbildung 3.17 ersichtlich nimmt die Verbundfestigkeit nach der Sauerstoffplasmabehandlung deutlich zu. Bei den nach fünf Tagen aufgeklebten Proben war dagegen kein Unterschied mehr zu den unbehandelten Proben festzustellen. In einem weiteren Versuch wurden Nickelplättchen mit Stickstoffplasma behandelt (4Tec-Plasmaanlage, 100 W, 0,4 mbar, 15 min). Die Benetzbarkeit direkt nach dem Prozess war dabei ähnlich gut wie bei Sauerstoffplasma.

Es kann festgestellt werden, dass offensichtlich ein Zusammenhang zwischen der Benetzbarkeit der Metalloberfläche und der Festigkeit der sich ergebenden Metall-Polymer-Bindung besteht, was durch das thermodynamische Adhäsionsmodell auch so beschrieben wird. Es bleibt dabei jedoch festzuhalten, dass eine gute Benetzung zwar eine notwendige Bedingung für gute Haftung ist, aber direkte Schlüsse auf die Adhäsion nur bedingt möglich sind. Es besteht lediglich ein qualitativer Zusammenhang [68]. In den Versuchen konnte beispielsweise auch festgestellt werden, dass eine gründliche Reinigung der Metalloberflächen für die Verbundfestigkeit und speziell für die Reproduzierbarkeit einer Verklebung ebenso wichtig ist.

Insgesamt konnte in den Experimenten gezeigt werden, dass sich Nickel-Shims mittels Heißkleben mit PMMA-Folie nach entsprechender Oberflächenvorbereitung mit Stahlgrundplatten sicher verkleben lassen. Die in dieser Arbeit hergestellten Formeinsätze

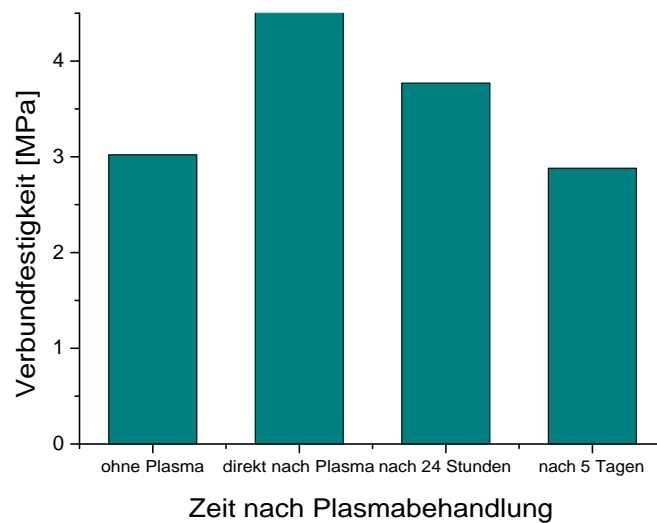


Abbildung 3.17: Veränderung der Verbundfestigkeit der Proben über die Zeit nach der Plasmabehandlung.

wurden auf diese Weise fixiert und wiesen eine ausreichende Haftung auf, um mit reproduzierbarer Qualität Abformungen herzustellen. Damit sind die gestellten Kriterien erfüllt:

- sichere, reproduzierbare Haftung
- Verzicht auf mechanische Nachbearbeitung der Shim-Formeinsätze
- lösbare Verbindung zwischen Shim-Formeinsatz und Grundplatte
- Fixierbarkeit unabhängig von der Größe des Shims

Es ist anzunehmen, dass die Rauheit und das Profil der Oberfläche nicht aufgrund mechanischer Verzahnungen zur Adhäsion beitragen, sondern aufgrund der Vergrößerung der Oberfläche. Das Maß der Oberflächenvergrößerung konnte allerdings im Rahmen der Arbeit nicht experimentell bestimmt werden.

Die bestmögliche Haftung von Polymerfilmen erreicht man entsprechend durch eine geeignete Oberflächenbearbeitung (z.B. Lappen) in Kombination mit einer gründlichen Reinigung und der Reduzierung der Oberflächenenergie im Sauerstoffplasma. Die erzielten Festigkeiten von einigen MPa waren für die Lösung der gestellten Aufgabe ausreichend. Sollten sich in der Zukunft Problemstellungen ergeben, bei denen höhere Entformkräfte übertragen werden müssen oder die Entformtemperatur für die Verwendung von PMMA als Klebeschicht zu hoch liegt, sollte der Aspekt der Benetzbarkeit als Ausgangspunkt für die weitere Optimierung des Heißklebprozesses gesehen werden.

3.4.2 Abformung der photonischen Strukturen

Die photonischen Rippenstrukturen stellen einige besondere Ansprüche an den Heißprägeprozess:

- Die Wellenleiter bilden zusammenhängende Strukturen von z.T. mehreren cm Länge, wobei an keiner Stelle ein Defekt auftreten darf, da ansonsten die Funktion nicht mehr erfüllt werden kann.
- Im Gegensatz zu freistehenden mechanischen Strukturen [69] können bei Wellenleitern keine Stützstrukturen vorgesehen werden.
- Strukturdetails (z.B. an Kopplerstrukturen) bilden spitz zulaufende Kanten, die hohe Aspektverhältnisse aufweisen und für die Funktion kritisch sind.
- Die Strukturen sind im Vergleich zu anderen im LIGA-Verfahren hergestellten optischen Strukturen klein, die angestrebte Fläche für die Abformung dabei relativ groß. Damit nimmt der Einfluss der Restschicht auf die Schwindung und damit auf die Abformqualität stark zu.

Mit durch Heißkleben fixierten Shim-Formeinsätzen konnten die genannten Anforderungen erfüllt und erfolgreich photonische Strukturen abgeformt werden. Der Durchmesser der Shims entsprach dem Innendurchmesser der Galvanikform von 89 mm, die tatsächlich abformbare Fläche lag durch für den beim Heißprägen typischen Druckabfall am Rand bei ca. 80 mm. Als Material wurde PMMA der Sorte „Hesaglas VOS“ (Hersteller: Notz Plastics AG) verwendet, da für dieses Material bereits die optischen Eigenschaften bekannt sind. Abbildung 3.18 zeigt einen typischen UV-lithographisch hergestellten Shim-Formeinsatz und damit abgeformte Strukturen.

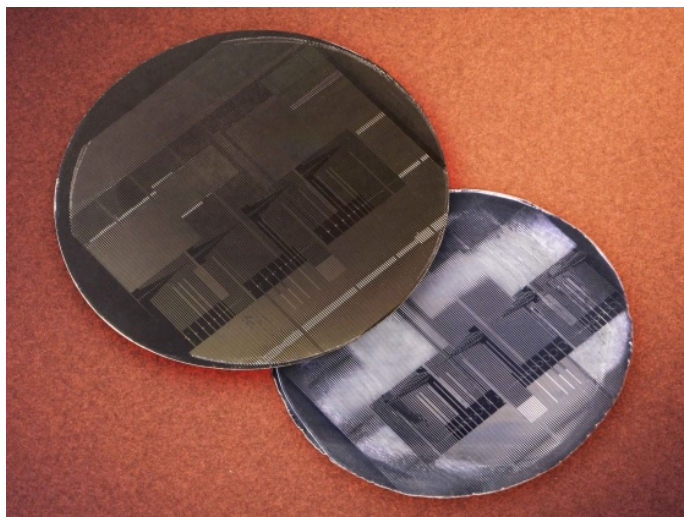


Abbildung 3.18: Shim-Formeinsatz und damit abgeformte photonische Strukturen.

3 Herstellung photonischer Strukturen

Die Parameter für die Abformung mussten dabei je nach verwendeter Anlage und Formeinsatz angepasst werden, um defektfreie Strukturen zu erhalten. Deshalb sind absolute Angaben zu den Prägeparametern nicht möglich, es lassen sich jedoch Bereiche angeben, die für die Abformung sinnvoll sind:

- Prägetemperatur: 130 °C – 160 °C
- Druck: 4,5 MPa – 33 MPa
- Entformtemperatur: 92 °C – 98 °C
- Halbzeugformat: Durchmesser ca. 80 mm (für UV-lithografische Shims) bzw. 30 x 70 mm (röntgenlithografische Shims), Dicke 300 bis 350 µm

Das Aspektverhältnis der Strukturen betrug je nach Formeinsatz für gerade Wellenleiterstrukturen bis zu drei, für Strukturdetails wie Y-Verzweiger in extremen Fällen bis zu 15. Für photonische Bauelemente sind diese Details funktionswichtig. Eine reproduzierbare und genaue Abformung setzt damit eine hohe Qualität der Formeinsätze voraus. Weiterhin ist es notwendig, unter Reinraumbedingungen abzuformen, da ungefilterte Luft zu viele Partikel mit Abmessungen in der Größe der Strukturen enthält.

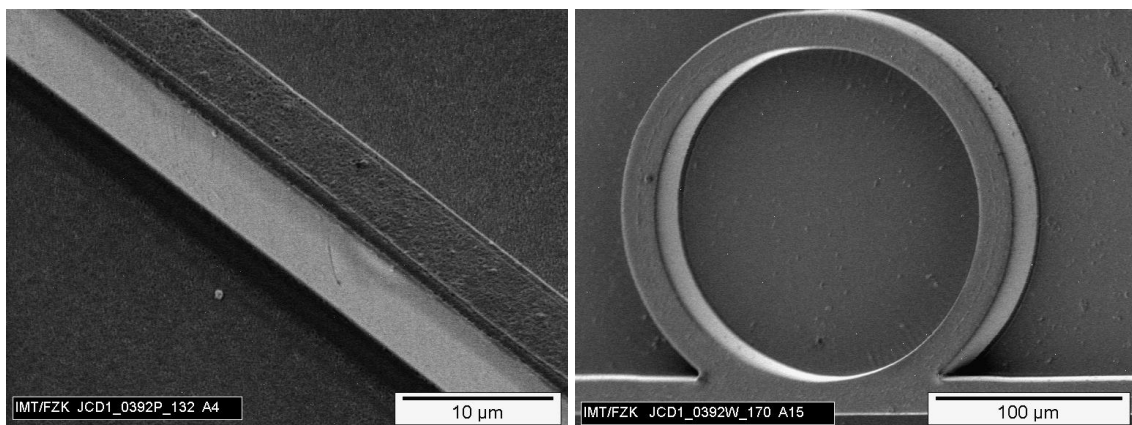


Abbildung 3.19: REM-Aufnahmen von abgeformten photonischen Strukturen in PMMA.
Links: Gerader Wellenleiter; Rechts: Ringresonator.

Abbildung 3.19 zeigt REM-Aufnahmen von abgeformten photonischen Strukturen. Während diese Strukturen reproduzierbar ohne funktionskritische Defekte abgeformt werden konnten, kam es speziell bei UV-lithografisch strukturierten Formeinsätzen häufig an Verzweigerstrukturen zu Deformationen und z.T. zum Abriss von Strukturen. Grund hierfür sind Defekte im Formeinsatz, die sich auf Fehler bei der Übertragung der Fotomaske auf den Resist sowie auf Fehler in der Galvanik bei besonders filigranen Strukturen (<3 µm) zurückführen lassen (Abb. 3.20). Obwohl beim Design der Fotomaske durch Abrundungen Strukturen unter 2 µm vermieden wurden, kam es durch Beugung zur teilweisen Belichtung

von Resist im geometrisch-optischen Schattenbereich der Maske. Bei spitz zulaufenden Verengungen wie Y-Kopplern, Richtkopplern oder den Bereichen zwischen Ring und Wellenleitern bei Ringresonatoren kam es deshalb dazu, dass Resistreste nach der Entwicklung zurückblieben und deshalb in diesen Bereichen kein Nickel abgeschieden werden konnte.

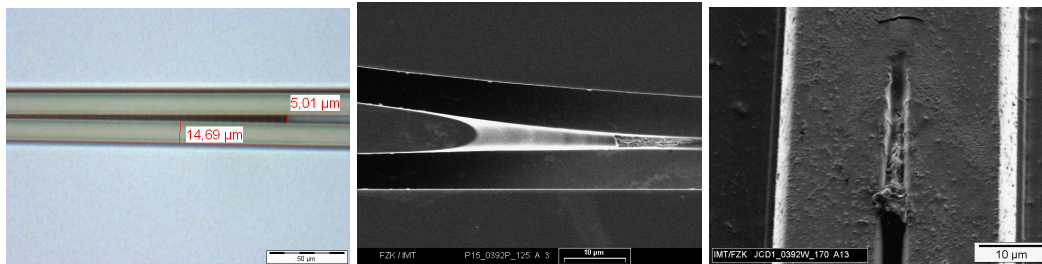


Abbildung 3.20: Fehler im Resist (links) und daraus resultierende Fehler bei der Galvanik (Mitte) und Abformung(rechts).

Weiterhin ist die mechanische Stabilität der abgeschiedenen Nickelstrukturen problematisch. Speziell bei den zu realisierenden Abständen zwischen Ringstrukturen und geraden Wellenleitern kam es zu Deformationen des Formeinsatzes, die zur Zerstörung der abgeformten Strukturen führten (Abb. 3.21).

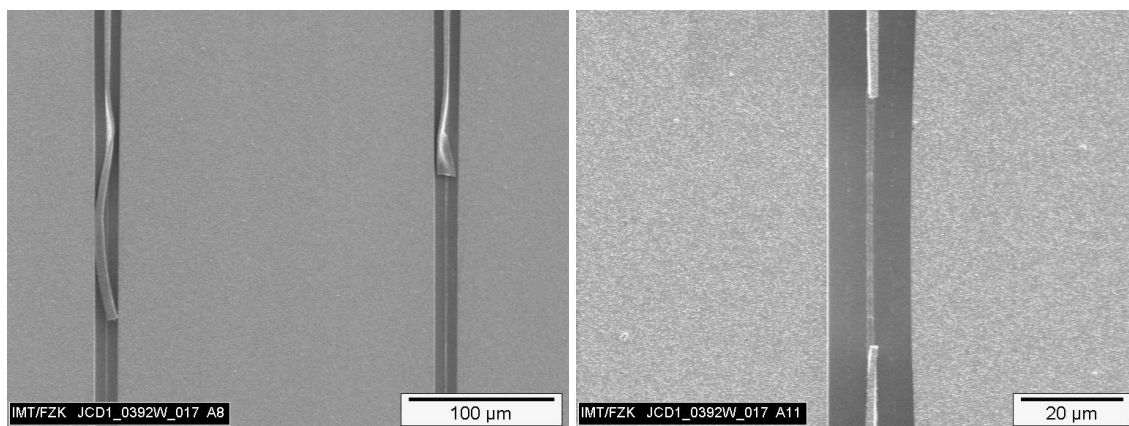


Abbildung 3.21: Defekte im Formeinsatz bei Strukturbreiten unter 2 µm.

Bei röntgenlithografisch strukturierten Formeinsätzen konnten im Gegensatz dazu bedingt durch die geringe Beugung der Röntgenstrahlung die Strukturen mit hoher Genauigkeit übertragen werden. Abbildung 3.22 und 3.23 zeigen im Vergleich REM-Aufnahmen der Ausgangsseite eines 1x3-MMI-Kopplers bei den verschiedenen Herstellungsverfahren.

Die Verwendung der Röntgenlithografie zur Strukturierung ermöglicht zwar eine genauere Strukturübertragung, jedoch bleiben die Probleme der mechanischen Stabilität freistehender Strukturen mit Breiten unterhalb von 2 µm bestehen.

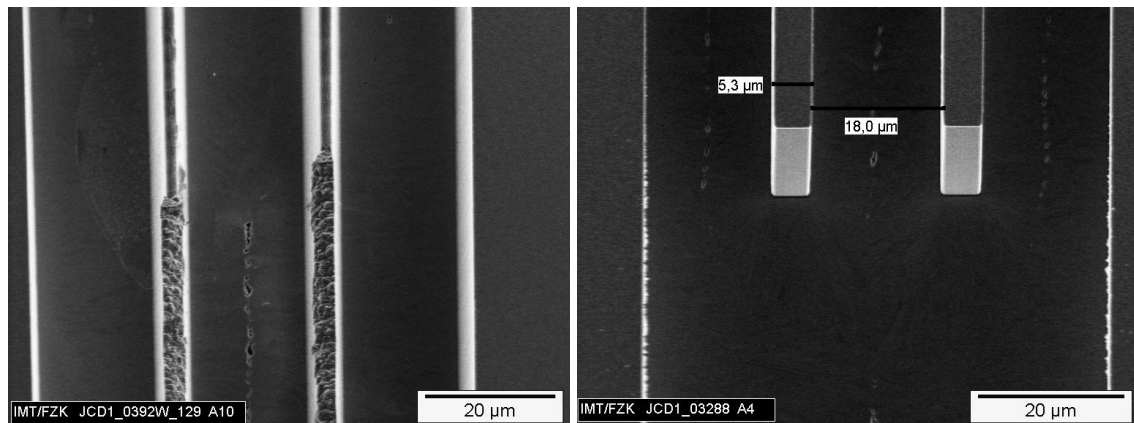


Abbildung 3.22: Ausgangsseite des Formeinsatzes eines 1x3-MMI-Kopplers bei Herstellung durch UV-Lithografie (links) bzw. Röntgenlithografie (rechts).

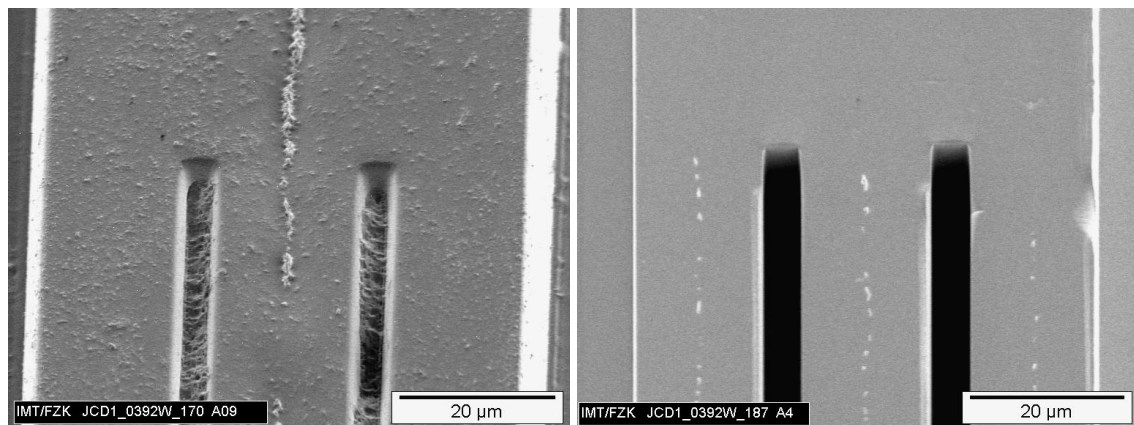


Abbildung 3.23: Ausgangsseite eines abgeformten 1x3-MMI-Kopplers bei Herstellung durch UV-Lithografie (links) bzw. Röntgenlithografie (rechts).

3.5 Brechzahlmodifikation durch DUV-Bestrahlung

Zur Erhöhung der Brechzahl in der Rippenoberfläche wurden die Proben mit einem kommerziellen Belichtungsgerät (Maskaligner EVG620, EV Group) flutbelichtet. Das Gerät verfügt im Gegensatz zu den für die UV-Lithografie üblichen Belichtern über eine DUV-Optik, die auch für Licht des für die Brechzahlmodifikation relevanten Wellenlängenbereiches von 200 bis 260 nm durchlässig ist. Abb. 3.24 zeigt das Spektrum der Lampe gemessen am Ort der Probe mit einem UV/VIS Spektrometer (USB2000, Ocean Optics). Die verwendete Lampe hat sich dabei im Vergleich zu Standard-UV-Strahlern als vorteilhaft für die Herstellung von Wellenleitern gezeigt [70].

Für den Belichtungsprozess ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Proben sich unter Vakuum befinden, da es sonst zur Reaktion der bestrahlten Bereiche mit Sauerstoff kommt, was vor allem die Dämpfung negativ beeinflusst [71]. Dies wurde durch die

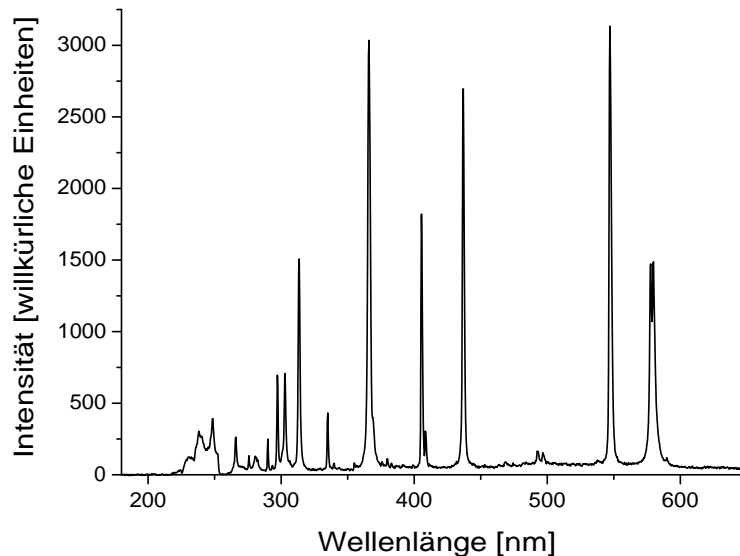


Abbildung 3.24: Spektrum eines EVG-620 Maskaligners mit DUV-Optik.

Verwendung eines Quarz-Maskenglases ohne Chromschicht („Quarz-Blank“) sichergestellt. Abschließend wurden die Proben für vier Stunden bei einer Temperatur von 70 °C im Ofen getempert, um das Ausgasen leicht flüchtiger Reaktionsprodukte zu beschleunigen und damit den stationären Endzustand der Brechzahländerung zu erreichen [24].

3.6 Vereinzeln der Strukturen

Das Vereinzeln der Strukturen erfolgte durch Sägen senkrecht zu den Wellenleitern. Die Qualität der Schnittkanten ist dabei von entscheidender Bedeutung für die Kopplung der Wellenleiter an externe Laser und Detektoren. Deshalb ist die Reproduzierbarkeit des Prozesses entscheidend für die Reproduzierbarkeit und damit der Vergleichbarkeit der Messwerte. Sägen ist ein Standardvereinzelnungsprozess in der Mikrosystemtechnik und wird u.a. in der Serienproduktion von Halbleiterchips und Mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) auf Silizium-Basis eingesetzt.

Während der ersten Versuche wurden Standardparameter für das Sägen von Kunststoffsubstraten verwendet. Dies führte jedoch zu einer starken Beschädigung der Strukturen an der Sägekante durch mechanische und thermische Effekte (siehe Abb. 3.25).

Im Rahmen der Arbeit wurden die Prozessparameter auf der am IMT verwendeten Wafersäge (MicroAce Three Series, Loadpoint Ltd.) speziell für das Trennen von Rippenwellenleitern optimiert. In Testserien wurden die verwendeten Sägeblätter und die

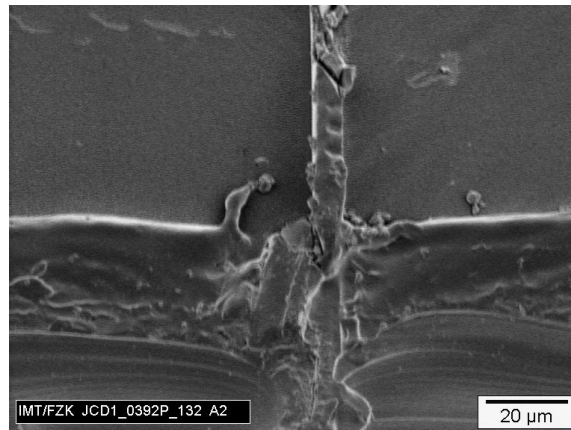


Abbildung 3.25: Zerstörter Wellenleiter vor der Optimierung des Vereinzelungsprozesses.

Schnittgeschwindigkeit variiert. Weiterhin wurden Vergleichstests am Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik des Forschungszentrums Karlsruhe und am Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien der TU Ilmenau durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass durch eine Reduzierung des Vorschubs sowie einen größeren Durchmesser des Sägeblattes deutlich weniger Strukturen beschädigt wurden. Dies ist dadurch zu erklären, dass dadurch die beim Durchtrennen des Materials auftretenden Schnittkräfte reduziert werden.

In einem weiteren Optimierungsschritt wurde die Rauheit der Schnittkantenoberfläche verbessert. Dies geschieht vor allem durch die Verwendung eines sehr dünnen Sägeblattes, welches normalerweise für das Sägen von Siliziumsubstraten verwendet wird. Durch die feinere Körnung von nur 6 bis 8 μm kommt es zu einer geringeren Rillenbildung. Damit kann das Licht besser in den Wellenleiter eingekoppelt werden. Abbildung 3.26 zeigt die REM-Aufnahme einer Sägekante nach der Optimierung des Prozesses. Es war somit möglich, Strukturen mit minimalen Breiten von 5,5 μm mit Strukturhöhen von bis zu 20 μm bzw. mit Breiten von bis zu 3 μm bei einer Höhe von 7 μm zu vereinzeln.

Es konnte in den Versuchen gezeigt werden, dass sich durch eine Reduzierung der mechanischen Belastung die Qualität der Schnittkante deutlich verbessert wird. Diese Größe ist bei Trennverfahren durch die spezifische Schnittkraft charakterisiert [72]. Eine weitere Verringerung der spezifischen Schnittkraft kann man durch folgende Parameter erreicht werden:

- Verringerung des Vorschubs
- Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit durch:
 - Erhöhung der Drehzahl
 - Vergrößerung des Sägeblattdurchmessers
- Verringerung der Zustellung

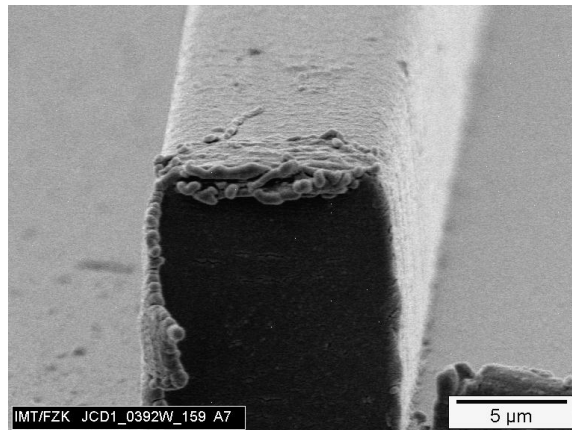


Abbildung 3.26: Endfacette eines Rippenwellenleiters nach der Optimierung des Vereinzelnungsprozesses. Sägeparameter: Vorschub 0,1 mm/min; Drehzahl 30000 min⁻¹; Blatt: Disco NBC-Z 2050 50.6x0.030x40.

Abschließend bleibt zu bemerken, dass trotz der vorgestellten guten Ergebnisse die Qualität der Sägekanten weiterhin Schwankungen unterliegt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass sich das Sägeblatt im Laufe seiner Lebenszeit abnutzt und die darin gebundenen Diamantkörner durch Selbstschärfungseffekte ihre Schnittcharakteristik ändern. Abbildung 3.27 zeigt Beispiele für diesen Effekt.

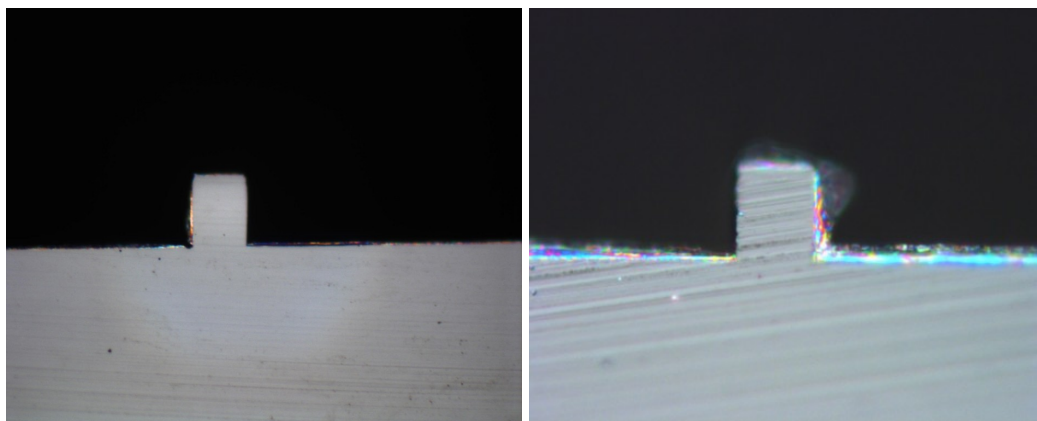


Abbildung 3.27: Mikroskopaufnahmen der Stirnflächen zweier mit den gleichen Parametern gesägter Wellenleiter. Es sind deutliche Unterschiede in der Rauheit erkennbar.

3.7 Herstellung von DFB–Resonatoren für wellenleitergekoppelte Laser

Wie in Abschnitt 3.6 deutlich wurde, ist das Vereinzeln ein komplexer und aufwendiger Fertigungsschritt. Dazu kommt, dass für eine Einkopplung von Licht in den Wellenleiter eine aktive Justierung der Ein- und Auskoppelfasern notwendig ist. Die Integration von Lichtquellen und perspektivisch auch Detektoren bietet die Möglichkeit, diese Probleme zu umgehen. Zudem kann die Größe des Messaufbaus deutlich reduziert werden.

Ein monolithischer Aufbau von Lichtquelle und Wellenleiter setzt eine gemeinsame technologische Plattform voraus. Die Prozessschritte müssen untereinander kompatibel sein und sich auf einem gemeinsamen Substrat durchführen lassen. Das Substratmaterial PMMA bietet diese Möglichkeiten und ist darüber hinaus sehr gut für Anwendungen im Bereich der Biophotonik geeignet [73]. Weiterhin konnte bereits gezeigt werden, dass sich ASE aus dem laseraktiven Material in planare PMMA–Wellenleiter einkoppeln lässt [74]. Die Integration von Lasern ermöglicht eine Erhöhung der Leistungseinkopplung. Dazu muss auf dem Substrat zusätzlich zum Wellenleiter ein Resonator in Form eines Bragg-Gitters strukturiert werden.

3.7.1 Herstellung von Resonatoren durch Heißprägen

In Kooperation mit dem Lichttechnischen Institut der Universität Karlsruhe (LTI) wurde eine Technologie erarbeitet, die die Integration von optisch gepumpten organischen DFB–Lasern mit Wellenleitern ermöglicht. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Wellenleitern handelt es sich in diesem Fall nicht um Rippen, sondern um planare Strukturen. Weiterhin wird, bedingt durch das verwendete laseraktive Material, Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich erzeugt und geführt.

Das Design der Lasergitter, die Deposition des laseraktiven Materials $\text{Alq}_3\text{:DCM}$ sowie die Charakterisierung der Strukturen wurde dabei am LTI durchgeführt [75]. Die Tiefe der Gitterstrukturen betrug 70 nm, die kleinste Linienbreite 100 nm. Das Gitter ist damit als Bragg-Resonator erster Ordnung ausgelegt (siehe 2.1.5). Die Herstellung der Masterstrukturen erfolgte an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig.

Abbildung 3.28 zeigt die Prozessschritte zur Herstellung eines geprägten wellenleitergekoppelten DFB–Lasers. Nach der Herstellung der Masterstrukturen durch Elektronenstrahl-lithografie und reaktives Ionenätzen in Siliziumdioxid wurde am IMT eine Gold-Startschicht auf den Wafer gesputtert. Aufgrund des geringen Aspektverhältnisses konnte die Metallisierung über den Strukturen erfolgen. Damit die Struktur dabei nicht überlagert wird, wurde die Startschicht mit einer Dicke von 30 nm sehr dünn gewählt und auf eine Haftschiicht aus Titan oder Chrom verzichtet. Um dennoch eine ausreichende Haftung zu erreichen, wurde der Sputterprozess bei erhöhter Substrattemperatur von ca. 200 °C durchgeführt (Sputteranlage Univex 500, Leybold). Anschließend konnte galvanisch Nickel zu einem Shim-Formeinsatz

3.7 Herstellung von DFB-Resonatoren für wellenleitergekoppelte Laser

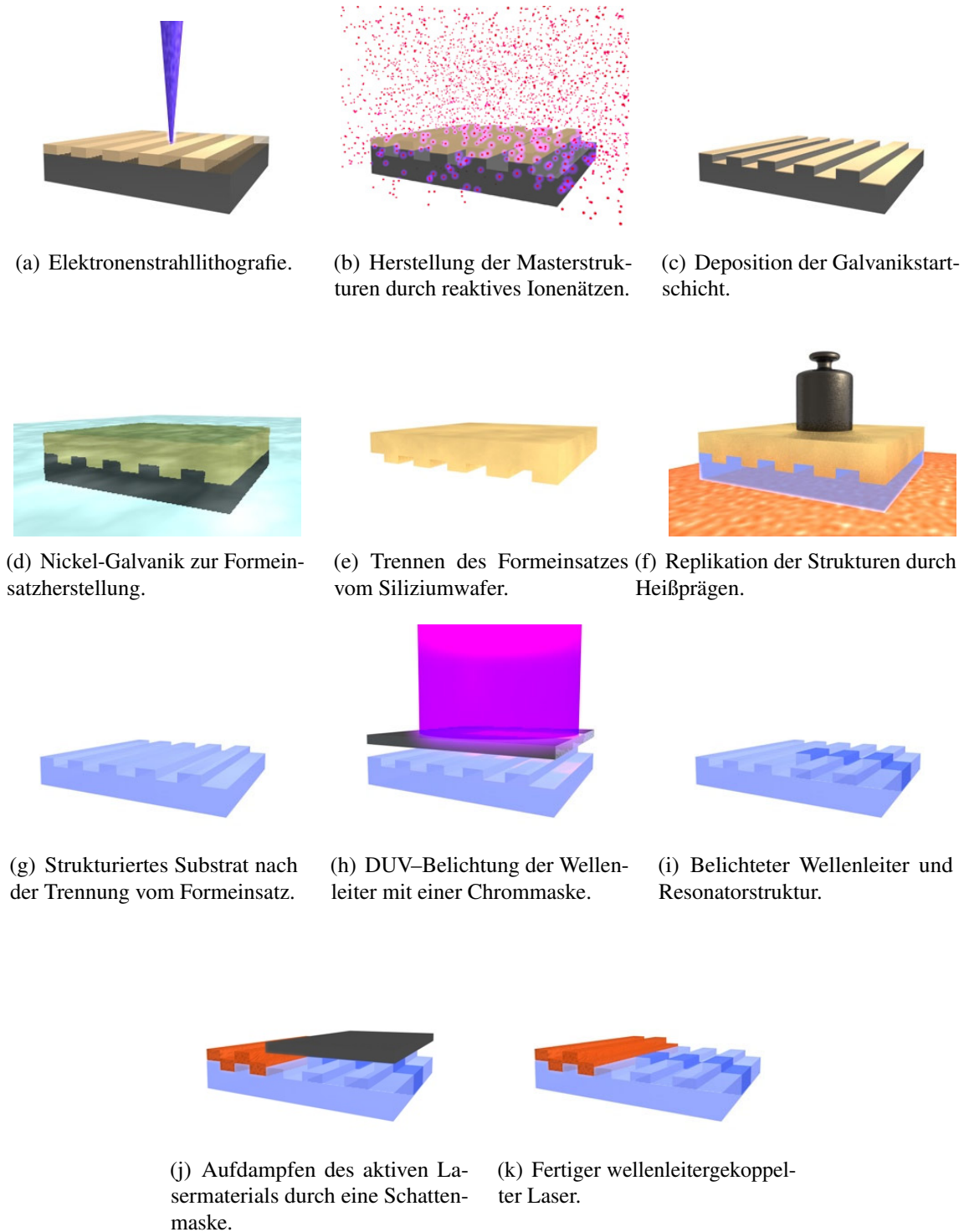


Abbildung 3.28: Schema des Herstellungsprozesses wellenleitergekoppelter geprägter organischer DFB-Laser.

abgeschieden werden. Abbildung 3.29 zeigt ein Foto des Shim-Formeinsatzes. Die Felder mit den Gitterstrukturen sind deutlich erkennbar.

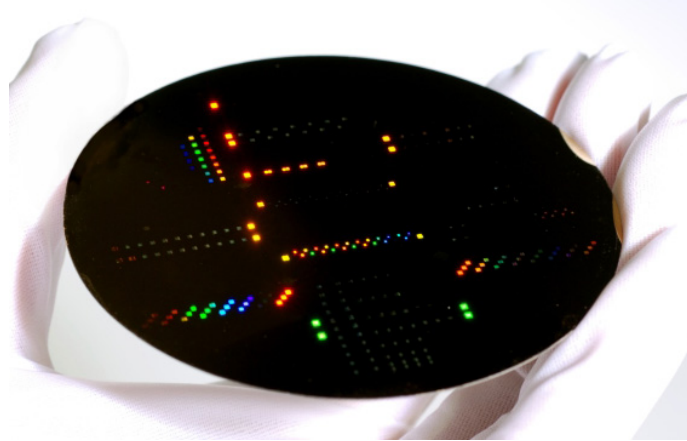


Abbildung 3.29: Fotografie des Shim-Formeinsatzes mit den Lasergittern.

Der Shim-Formeinsatz wurde anschließend durch Heißprägen auf einer kommerziellen Heißpräganlage (HEX03, Jenoptik Mikrotechnik) abgeformt. Als Substratmaterial dienten PMMA-Platten (Hesaglas VOS) mit einer Dicke von 500 μm . Die Prägetemperatur betrug 165 $^{\circ}\text{C}$ bei einem Druck von ca. 47 MPa und einer Haltezeit von ca. 10 min [76]. Abb. 3.31a zeigt eine REM-Aufnahme eines vollständig abgeformten Resonatorgitters.

Nach dem Prägen wurden die Substrate durch eine Chrommaske mit DUV-Strahlung mit einer Dosis von 3 J/cm^2 belichtet. Wie in 2.2.5 beschrieben wurde dadurch der Brechungsindex lokal erhöht und planare Welleneiter in der Substratoberfläche definiert. Das laseraktive Material wurde anschließend durch Aufdampfen abgeschieden, wobei durch eine Schattenmaske die Bereiche außerhalb der Resonatoren abgedeckt wurden. Die Dicke der $\text{Alq}_3:\text{DCM}$ -Schicht beträgt 350 nm. Abbildung 3.30 zeigt eine hergestellte Probe nach dem Bedampfen.

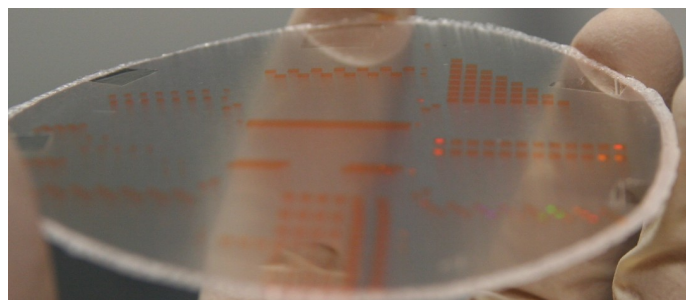


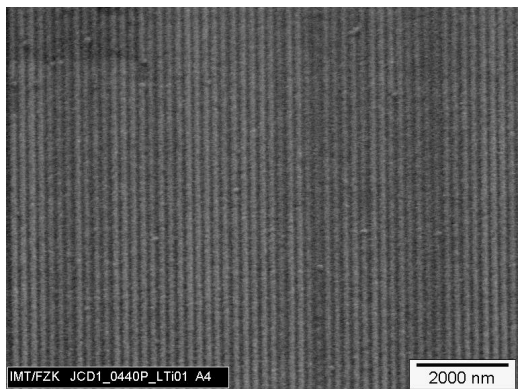
Abbildung 3.30: Probe mit geprägten DFB-Lasergittern nach dem Bedampfen mit $\text{Alq}_3:\text{DCM}$.

Mit der beschriebenen Methode konnte erfolgreich Licht vom Laser in den Wellenleiter eingekoppelt werden (siehe 4.5). Damit konnte erstmalig die Integration von Wellenleitern

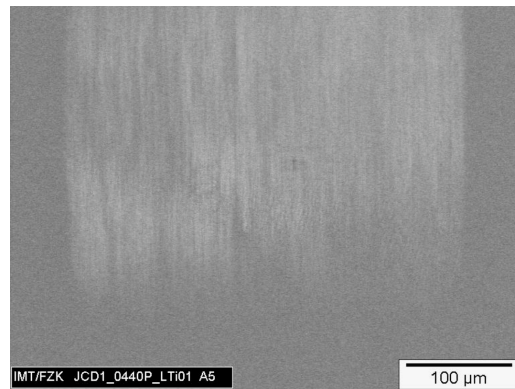
und Lichtquellen auf einem PMMA–Substrat gezeigt werden. Der vorgestellte Prozess ist prinzipiell für eine Serienfertigung geeignet, allerdings muss dazu speziell die Prägetechnologie verbessert werden.

Bei klassischen abgeformten Mikrostrukturen liegt die Dicke der Restschicht in der Größenordnung der Strukturhöhe. Dies ist bei der Herstellung von Submikrometer-Strukturen mit den hier verwendeten Anlagen nicht möglich. Im konkreten Fall betrug die Dicke der Restschicht mehrere hundert μm und liegt damit um vier Größenordnungen über der Strukturhöhe. Damit dominiert sie das Schrumpfungsverhalten, was zu unvollständiger Strukturfüllung und zur Beschädigung von Strukturen bei der Entformung führt (s. Abb. 3.31b). Die so beschädigten Gitter zeigten erhöhte Laserschwellen bis zum vollständigen Ausbleiben von Lasertätigkeit. Es ist möglich, diese Effekte durch eine Erhöhung der Prägekraft teilweise zu kompensieren. Allerdings wird dadurch das Bauteil zusätzlich verformt. Ursachen der Verformung sind:

- Deformation des Shim-Formeinsatzes. Grund dafür kann eine ungleichmäßige Dicke der Galvanik, Inhomogenität in der Klebeschicht sowie eine ungleichmäßige Druckverteilung beim Prägen [77] sein.
- Durchbiegung der Traversen der Maschine beim Prägen.
- Unzureichender Keilfehlerausgleich zwischen Werkzeugseite und Substratseite.
- Unebenheiten/ nicht genaue Planparallelität der Substratplatte bzw. der Grundplatte bzw. des Shims.



(a) Vollständig abgeformtes Gitter.



(b) Unvollständig abgeformtes Gitter.

Abbildung 3.31: REM–Aufnahmen abgeformter Gitterstrukturen.

Bei den abgeformten Gitterstrukturen kam es dadurch zu Dickenschwankungen des Gesamtbauteils von bis zu $70 \mu\text{m}$. Diese Deformation wirkt sich nachteilig auf alle nachfolgenden Prozesse aus, die auf eine gute Oberflächenebenheit angewiesen sind. Speziell kam

es zu Problemen bei der optischen Lithografie, die dazu führten, dass nicht alle Wellenleiter auf dem Substrat korrekt zu den Resonatorgittern ausgerichtet werden konnten.

Um das Verfahren für eine großformatige Abformung von Gitterstrukturen und nachfolgende optische Lithografie nutzen zu können, muss die Verformung des Bauteils reduziert werden. Dazu zählt vor allem die Durchbiegung, aber auch die Änderung der Außenabmaße durch das Fließen des Polymers, da die Anlagen für die optische Lithografie für die Verarbeitung von in der Halbleitertechnologie üblichen Wafermaße konzipiert sind. Eine Verringerung der Verformung kann nur zum Teil durch genaue Tolerierung der Anlage (incl. Grundplatten) und des Werkzeuges realisiert werden. Tendenziell ist es sinnvoll, die Prägekraft zu reduzieren und gleichzeitig einen zu starken Duckverlust zu verhindern. Dies kann durch die Verwendung eines geschlossenen Werkzeuges geschehen. Der Druckabfall zum Rand hin kann so reduziert werden. Denkbar wäre der Einsatz einer abgewandelten CD-Spritzgussform.

3.7.2 Herstellung von Resonatoren durch DUV-Lithografie

Aufgrund der diskutierten Schwierigkeiten bei der Laserherstellung durch Abformtechnik wurde nach alternativen Wegen gesucht, die Ebenheit der Substrate zu verbessern. Als eine viel versprechende Möglichkeit wurde die Herstellung von Gittern mit DUV-Lithographie untersucht. Das Design der Lasergitter lässt sich dabei allerdings nicht von den geprägten Gittern übernehmen, da es nicht möglich ist, mit den vorhandenen Geräten die notwendige Auflösung zu erreichen, um Linien von 100 nm Breite zu übertragen. Zwar sind in der Elektronikindustrie mittlerweile mit optischer Lithografie Leiterbahnbreiten von unter 100 nm erreichbar, allerdings wird dafür keine Schattenprojektion einer Maske mehr eingesetzt, sondern eine verkleinernde Abbildung[41]. Zusätzlich kommen zur Vergrößerung der numerischen Apertur Immersionsobjektive zum Einsatz [78].

Ziel war deshalb die Strukturierung von Bragg-Gittern dritter Ordnung, die im Vergleich zu den Gittern erster Ordnung die dreifache Periode besitzen und deshalb deutlich einfacher herstellbar sind (s. Gleichung (2.17)). Der Nachteil der höheren Gitterordnung besteht darin, dass das Licht nicht in der Gitterebene emittiert wird, sondern durch Beugung in einem Winkel von $\pm 110^\circ$ (1. Beugungsordnung) bzw. $\pm 70^\circ$ (2. Beugungsordnung) [35]. Dadurch verringert sich der Anteil der in einen Wellenleiter einkoppelbaren Energie. Für die Experimente wurde eine vorhandene Chrommaske mit einer Gitterperiode von 500 bis 530 nm benutzt. Der Spektralbereich des optischen Gewinns von $\text{Alq}_3\text{:DCM}$ liegt zwischen 585 nm und 690 nm [79]. Bei einer Brechzahl des Materials von ca. 1,76 [74] liegt die zu erwartende Laserwellenlänge in diesem Bereich.

In einem ersten Versuch wurden PMMA-Platten mit unterschiedlichen Dosen belichtet. Es konnte darauf hin ein Einsinken der belichteten Bereiche festgestellt werden, welches auch bei der Herstellung von Wellenleitern auftritt. AFM-Messungen zeigten eine gute Übertragung der Gitterperiode, das Gitter selbst war mit einer Tiefe von 11 nm bei einer Bestrahlungsdosis von $2\text{-}3 \text{ mJ/cm}^2$ jedoch nur schwach ausgeprägt. Bei einer zweiten Belichtung

3.7 Herstellung von DFB-Resonatoren für wellenleitergekoppelte Laser

zur Definition eines Wellenleiters (Dosis: 3 mJ/cm^2) sanken die belichteten Bereiche zusätzlich weiter ein. Das Gitter blieb somit auf den Wellenleitern nicht erhalten (s. Abb.3.33). Damit ist alleiniges Belichten für die Herstellung von Resonatorgittern nicht ausreichend.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurden deshalb die Proben nach dem Belichten analog zu dem in 3.2.2 beschriebenen Prozess entwickelt. Dadurch konnten Gitterstrukturen hergestellt werden, die durch die nachfolgende Wellenleiterbelichtung nicht zerstört wurden. Abbildung 3.32 zeigt die Prozessschritte.

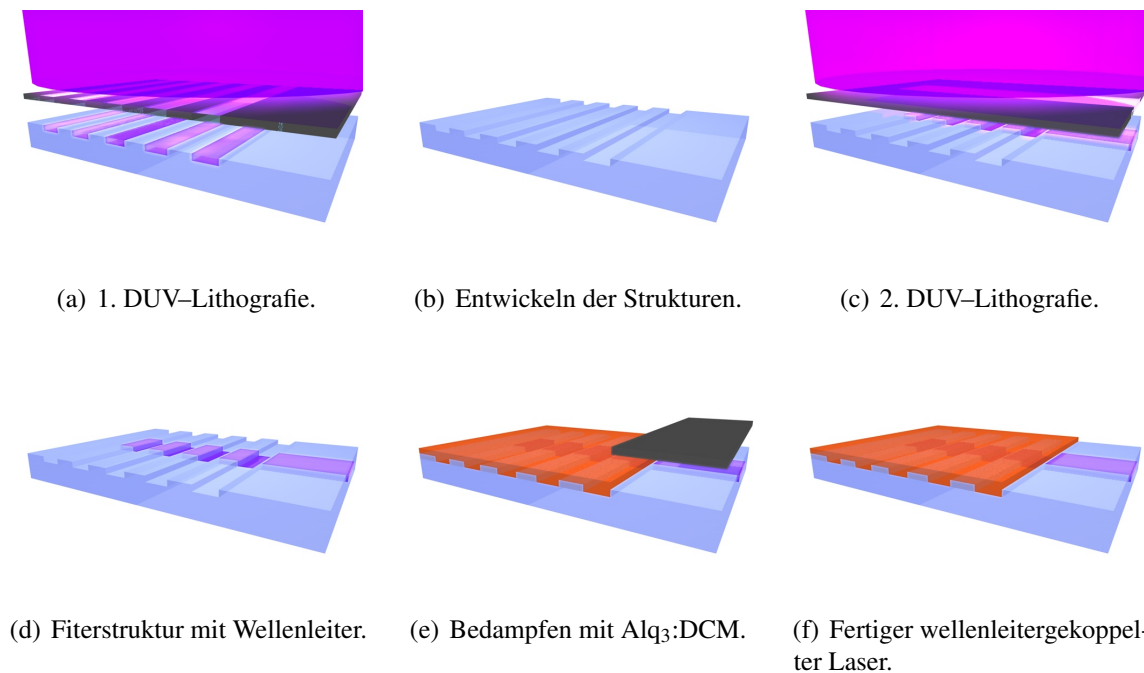


Abbildung 3.32: Schema des Herstellungsprozesses lithografisch hergestellter wellenleitergekoppelter organischer DFB-Laser.

Durch die Entwicklung entstanden Gitterstrukturen, die auch nach anschließender Belichtung des Wellenleiters deutlich nachweisbar blieben (siehe Abb. 3.34). Die Justierung der Wellenleiter zu den entwickelten Strukturen war durch justierte Belichtung problemlos möglich. An den so hergestellten Strukturen konnte in ersten Versuchen Lasertätigkeit nachgewiesen werden (s. 4.5).

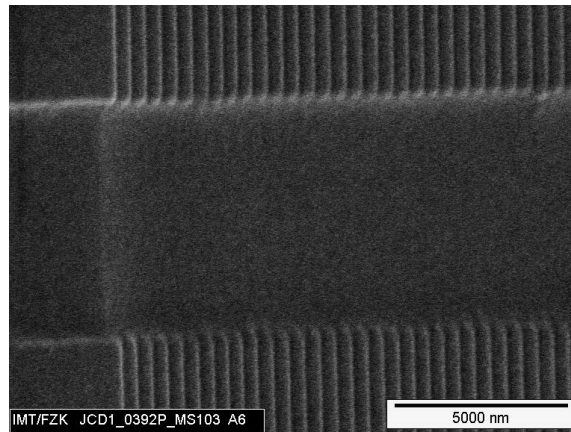


Abbildung 3.33: REM-Aufnahme eines belichteten, aber nicht entwickelten Gitters. Im Bereich des Wellenleiters ist kein Gitter mehr erkennbar.

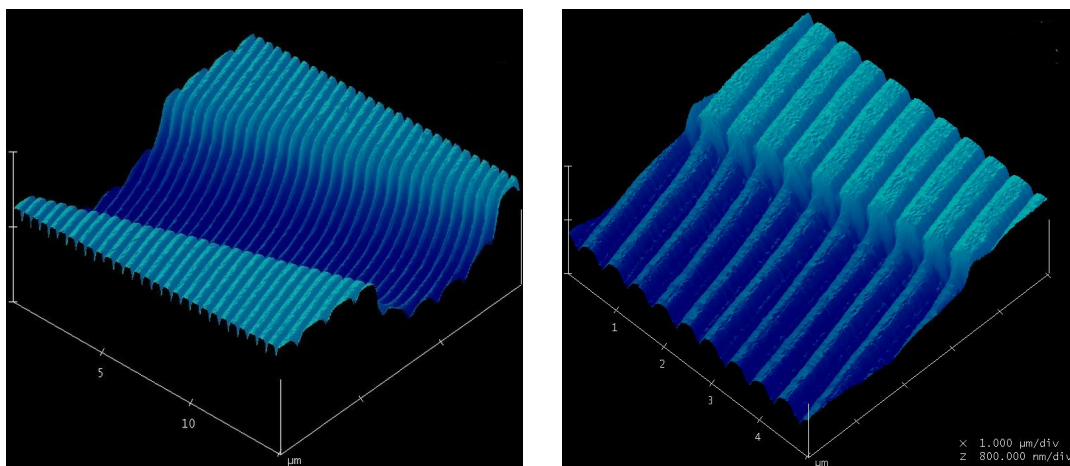


Abbildung 3.34: AFM-Aufnahmen eines belichteten und entwickelten Gitters. Die Strukturen bleiben auch im Bereich der Wellenleiters erhalten.

4 Charakterisierung der photonischen Strukturen

Darin besteht das Wesen der Wissenschaft. Zuerst denkt man an etwas, das wahr sein könnte. Dann sieht man nach, ob es der Fall ist und im Allgemeinen ist es nicht der Fall.

(Bertrand Russell)

Für die auf der Basis des beschriebenen Fertigungsprozesses hergestellten photonischen Strukturen wurden grundlegende Parameter der Wellenleiter experimentell ermittelt. Dazu dienen vor allem die Messung der Wellenleiterdämpfung sowie die Charakterisierung der Nahfeldintensität im Wellenleiter.

Im folgenden Abschnitt werden die Messmethoden kurz erläutert sowie die experimentell ermittelten Werte vorgestellt und mit den Annahmen und Simulationen verglichen.

4.1 Messtechnik zur Wellenleitercharakterisierung

4.1.1 Dämpfungsmessung

Dämpfungsmessungen dienen der Ermittlung von in Wellenleitern auftretenden Verlusten. Besonders in der optischen Nachrichtentechnik ist es wichtig, eine möglichst geringe Dämpfung zu erreichen und damit eine gute Signalübertragung sicherzustellen.

Folgende Faktoren tragen zu Verlusten in optischen Wellenleitern bei:

- intrinsische Dämpfung des Materials
- Kopplungsverluste
- Krümmung
- Streuung an der Oberfläche
- Streuung im Material

Beim Durchgang einer elektromagnetischen Welle durch ein Material kommt es zu Wechselwirkungen mit den Elektronen, was zur Anregung von Schwingungen und damit zu intrinsischer Dämpfung führen kann. Der Effekt ist stark wellenlängenabhängig. Im

NIR-Bereich spielen bei Polymeren für die Absorption von Strahlungsleistung vor allem die Schwingungsresonanzen der Moleküle des Materials eine Rolle, die durch die Bindungen zwischen den Atomen bestimmt werden [80, 81].

Kopplungsverluste entstehen bei der Ein- bzw. Auskopplung von Licht in bzw. aus dem Wellenleiter. In dieser Arbeit wurde die Kopplung durch Stirnflächenkopplung realisiert. Dabei muss das Licht pro Kopplung je einen Übergang Polymer-Luft und Glasfaser-Luft überwinden, wobei es zu Reflexionen kommt. Die Verwendung einer Zwischenschicht zur Brechzahlanpassung („Index Matching Liquid“) war bei den Rippenstrukturen nicht möglich. Weiterhin trägt die unterschiedliche Intensitätsverteilungen der in der Glasfaser und im Rippenwellenleiter geführten Mode (Modenfehlanspassung) zu den Kopplungsverlusten bei.

Weicht die Wellenleitergeometrie von der eines geraden Wellenleiters ab, entstehen zusätzliche Verluste durch die Krümmung. Diese Verluste hängen exponentiell vom Krümmungsradius ab [26] und sind in dieser Arbeit besonders bei den hergestellten Ringresonatoren von Bedeutung.

Da in der Praxis kein Wellenleiter eine ideal glatte Oberfläche aufweist, kommt es zur Streuung von Licht an den Grenzflächen. Die Verluste steigen mit zunehmender Varianz des Grenzflächenprofils. Weiterhin kann es zur Streuung im Material kommen. Ursachen dafür sind z.B. Einschlüsse von Gasbläschen oder Partikeln und lokale Schwankungen der Brechzahl durch Inhomogenitäten im Material oder innere Spannungen.

Die Dämpfung D der in dieser Arbeit hergestellten Wellenleiter wurde durch Intensitätsmessungen bestimmt. Dabei wird die in den Wellenleiter eingestrahlte Leistung P_i zu der am Wellenleiterende ausgekoppelten Leistung P_o ins Verhältnis gesetzt:

$$D = 10 \cdot \log \frac{P_o}{P_i}. \quad (4.1)$$

Der verwendete Messaufbau ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Mit einem durchstimmbaren Laser (Agilent 81680A) wurden sowohl Dämpfungsmessungen bei einer festen Wellenlänge von 1550 nm als auch wellenlängenabhängige Messungen zur Charakterisierung der Ringresonatoren durchgeführt. Zur Leistungsmessung wurde Licht über eine monomodige Faser in die Strukturen ein- und wieder ausgekoppelt.

4.1.2 Nahfeldmessung

Bei einer Nahfeldmessung von optischen Wellenleitern wird die Intensitätsverteilung an der Auskoppelfacetten des Wellenleiters ermittelt. Die Messung diente im vorliegenden Fall der Charakterisierung der Modenausbreitung im Wellenleiter und der Ermittlung der Modengrenzen.

Der Nahfeldmessplatz am IMT besteht aus einer Probenhalterung mit Vakuumchuck, einem Dreiaxsentisch mit Piezostellern zum Justieren der Einkoppelfaser sowie einem Kamerasystem. Abb. 4.2 zeigt das Prinzipbild des Aufbaus. Für die Versuche wurde für die Charakterisierung im NIR-Bereich ein Halbleiterlaser (Santec TSL-210) benutzt. Das Licht wurde über eine so genannte „Lensed fiber“ in den Wellenleiter eingekoppelt. „Lensed

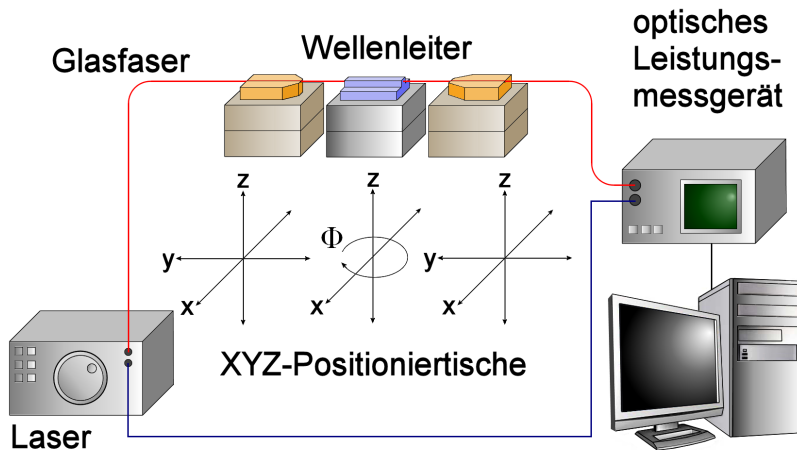


Abbildung 4.1: Skizze des Dämpfungsmessplatzes.

Fibers“ sind Lichtwellenleiter, die durch Schmelztechnik an einem Ende linsenförmig ausgeprägt sind und so einen wesentlich geringeren Spottedurchmesser aufweisen als der 9 μm dicke Kern einer glatt abgeschnittenen Faser. Dadurch ist es möglich, neben der Grundmode auch die höheren Moden des Wellenleiters anzuregen und somit die Modengrenze experimentell zu bestimmen.

Die Endfacette des Wellenleiters wurde über ein Nahfeldmesssystem (Hamamatsu A 4859-01) auf eine Infrarotkamera (IR Kamera 13215, Electrophysics) abgebildet und mit Hilfe der Analysesoftware LEPAS-11 die Intensitätsprofile berechnet. Zur exakten Unterscheidung, ob mehrere Moden im Wellenleiter geführt werden, wird die Einkopplung in horizontaler Richtung leicht variiert. Bei einem monomodigen Wellenleiter bleibt dabei die Charakteristik des Intensitätsprofils gleich, es ändert sich lediglich dessen Intensität.

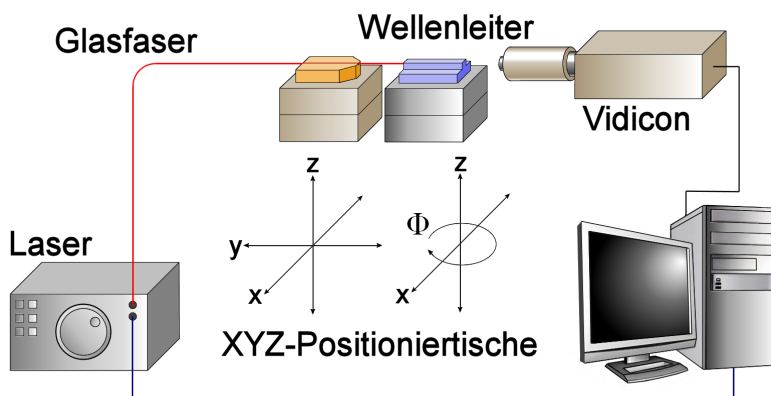


Abbildung 4.2: Skizze des Nahfeldmessplatzes.

4.1.3 Brechzahlbestimmung

Zur Bestimmung des Brechzahlprofils wird am Institut für Mikrostrukturtechnik die Modenlinienspektroskopie eingesetzt. Die Methode ist geeignet, um mit relativ geringem Präparationsaufwand die Anzahl der in einem Filmwellenleiter geführten Moden und die zugehörige Brechzahl zu ermitteln.

In Abbildung 4.3 ist das Prinzip der Messung dargestellt. Die zu vermessende Probe wird auf ein Prisma gepresst, über die Stirnfläche wird divergentes Licht eingekoppelt, das alle im Filmwellenleiter ausbreitungsfähigen Moden anregt. Durch das Prisma kommt es zur Auskoppelung von Licht, der Winkel der Auskoppelung kann in einem Beobachtungsfernrohr abgelesen werden. Aus dem Winkel und der Geometrie des Prismas lässt sich der jeweilige Brechungsindex n_{eff} der geführten Mode bestimmen [82].

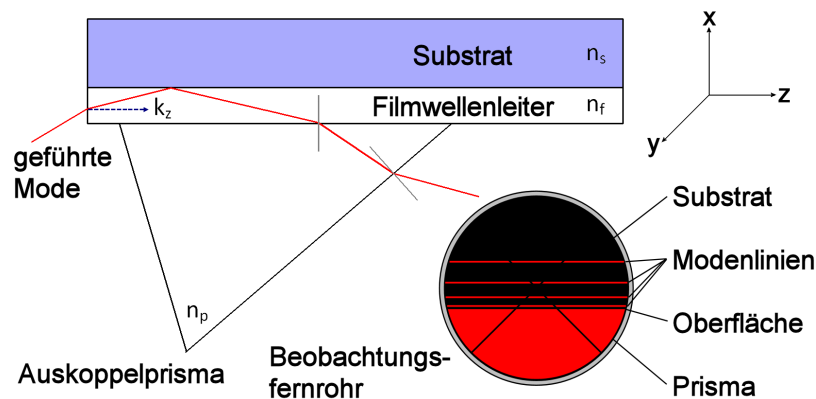


Abbildung 4.3: Prinzip der Modenlinienmessung.

Der am IMT verwendete Messaufbau besteht aus einem Abbe-Refraktometer (Abbe-Refraktometer A, Carl Zeiss) sowie Diodenlasern zur Messung im sichtbaren und NIR-Bereich. Die gemessenen Werte müssen mit Kalibrierkurven korrigiert werden, um den Einfluss der Dispersion zu erfassen. Da von der Herstellerseite nur Kalibrierkurven für den VIS-Bereich vorliegen, wurden für den NIR-Bereich Gläser mit bekannten Dispersionskurven zur Kalibrierung benutzt [24]. Weiterhin wurde die auch zur Nahfeldmessung benutzte Kamera als Detektor verwendet.

Die Rückrechnung aus den gemessenen Werten auf das Brechzahlprofil erfolgt nach dem Verfahren nach White und Heidrich [83]. Die Genauigkeit des Verfahrens hängt dabei stark von der Anzahl der gemessenen Moden ab, da diese die Anzahl der Stützstellen der ermittelten Kurve bestimmt. Durch die geringe Eindringtiefe der DUV-Strahlung ist die Anzahl der im Film geführten Moden allerdings stark begrenzt. Speziell im NIR-Bereich ist es nicht möglich, mehr als zwei Moden anzuregen, was zu einer erhöhten Ungenauigkeit der Rechnung führt [84].

4.2 Gerade Rippenwellenleiter

4.2.1 Bestimmung der Wellenleiterdämpfung

Die Wellenleiterdämpfung wurde durch Cut-Back-Messungen ermittelt. Dabei wurden Wellenleiter derselben Probe in unterschiedlich lange Bereiche gesägt und anschließend wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben die Dämpfung gemessen. Trägt man die erhaltenen Werte abzüglich der durch Faser-Faser-Messung erhaltenen Dämpfung des Messsystems über die Länge auf und legt eine Ausgleichsgerade durch die Punkte, so repräsentiert der Schnittpunkt durch die Ordinate die Koppelverluste des Gesamtsystems (Ein- und Auskoppeldämpfung).

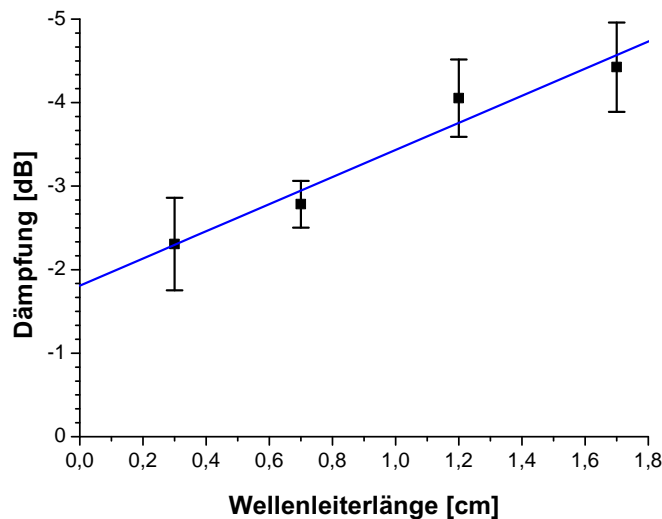


Abbildung 4.4: Cut-Back-Messung von geprägten Rippenwellenleitern

Wie aus Abb. 4.4 ersichtlich betragen die Koppelverluste im Durchschnitt ca. 1,8 dB, was einem Koppelverlust von 0,9 dB pro Facette entspricht. Die aus dem Anstieg der Ausgleichsgeraden ermittelte Wellenleiterdämpfung von geprägten und mit einer Dosis von 4 J/cm^2 bestrahlten Rippenwellenleitern betrug $1,6 \text{ dB/cm}$ bei einer Wellenlänge von 1550 nm. Unter Voraussetzung der gleichen Koppelverluste beträgt die bei lithografisch hergestellten Rippenwellenleitern festgestellte Dämpfung ca. $2,3 \text{ dB/cm}$. Die höheren Verluste sind dadurch erklärbar, dass es auf Grund der geringen Rippenhöhe zu einer stärkeren Abstrahlung von Leistung in das Substrat kommt.

4.2.2 Ermittlung der Modencharakteristik

Zur Beurteilung der Modencharakteristik wurden Nahfeldmessungen durchgeführt. Abbildung 4.5 zeigt die Feldverteilung in einem Rippenwellenleiter mit einer Höhe von ca. $16 \text{ }\mu\text{m}$

und einer Breite von ca. $10\ \mu\text{m}$ bei einer Wellenlänge von $1550\ \text{nm}$. Der Wellenleiter ist einmodig, es ist deutlich die durch den Brechzahlverlauf bedingte Asymmetrie der Feldverteilung in vertikaler Richtung erkennbar. Weiterhin lässt sich keine Kopplung von Licht in die bestrahlte Substratoberfläche erkennen, die Höhe ist also ausreichend.

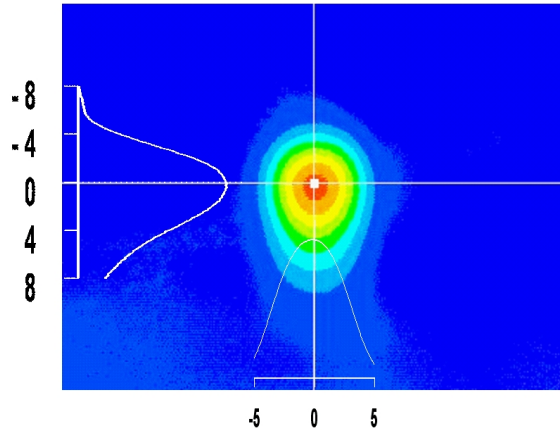


Abbildung 4.5: Nahfeldaufnahme eines geprägten Rippenwellenleiters. Die Kurven repräsentieren die Intensitätsverteilung entlang der Schnittlinien. Einheiten in μm .

Bei der Überprüfung der Intensitätsverteilung in Abhängigkeit von der Rippenbreite wurde festgestellt, dass das Verhalten der Wellenleiter nicht mit dem simulierten B - V -Diagramm übereinstimmt. Da die hergestellten Wellenleiter mit hoher Strukturtreue abgeformt worden, kann eine Deformation als Ursache der Abweichungen ausgeschlossen werden.

	untere Grenze für Lichtausbreitung	Grenze für monomodige Lichtausbreitung
Simulation	$10\ \mu\text{m}$	$22\ \mu\text{m}$
geprägte Wellenleiter	$< 5,5\ \mu\text{m}$	$10,5\ \mu\text{m}$

Tabelle 4.1: Simulierte und experimentell ermittelte Modengrenzen in Rippenwellenleitern bei $\lambda=1550\ \text{nm}$.

Es sind zwei Ursachen für die beobachtet Abweichungen möglich, auf die im Folgenden eingegangen werden soll:

- Ungenauigkeiten der Simulation
- Veränderung der optischen Eigenschaften des Materials durch den Prägeprozess

Abweichungen durch Ungenauigkeiten der Simulation Wie in 3.1 beschrieben spielen für die Simulation geometrische Parameter des Modells sowie die Brechzahlverteilung eine Rolle. Da die Geometrie durch das Heißprägen gut abgebildet werden konnte, ist es

wahrscheinlich, dass die angenommene Brechzahlverteilung nicht der realen Brechzahlverteilung entspricht. Für die Simulation wurden deshalb Substratbrechzahl, Brechzahlhub und Brechzahlprofil angepasst, wobei neuere Erkenntnisse zu Brechzahlprofil und Dispersion in durch DUV-Bestrahlung hergestellten Wellenleitern [85] mit einbezogen wurden.

- Brechzahländerung $\Delta n = 0,006$
- Substratbrechzahl $n_s = 1,4805$
- Wellenlänge: 1550 nm
- Profil: exponentieller Abfall in y-Richtung mit einem Intensitätsabfall auf $1/e$ bei einer Tiefe von 5 μm

Mit diesen Änderungen ergibt sich das in Abbildung 4.6 dargestellte B - V -Diagramm. Die Modengrenzen sind deutlich in Richtung geringerer Wellenleiterbreiten verschoben, die Grenze für Monomodigkeit liegt bei etwa 13 μm .

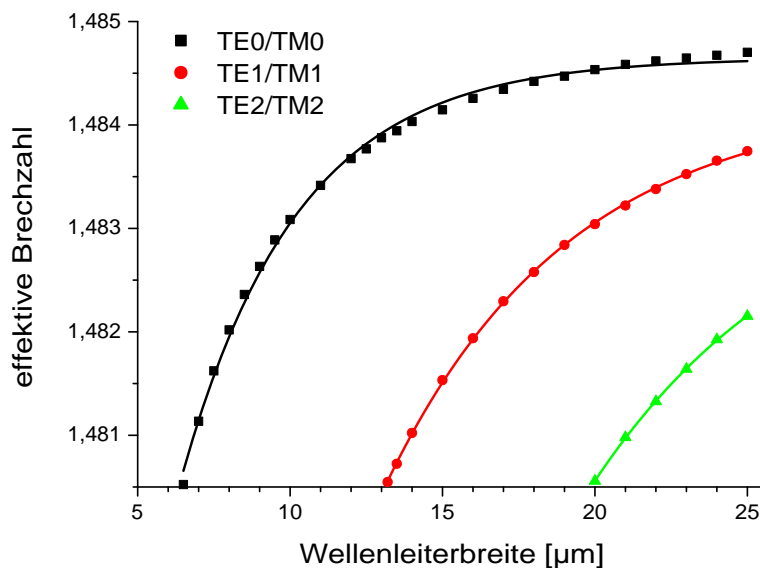


Abbildung 4.6: Korrigierte Simulation der Modenausbreitung in einem Rippenwellenleiter bei einer Wellenlänge von 1550 nm.

Durch die angepassten Annahmen im Simulationsmodell konnten die Unterschiede zu den Messwerten deutlich verkleinert werden. Allerdings lassen sich die noch beobachteten Abweichungen nicht durch Toleranzen in der Simulation begründen. Auch können damit beobachtete Schwankungen der Modengrenze bei verschiedenen Proben nicht erklärt werden.

Abweichungen durch Veränderung des Materials beim Prägen Zur Ermittlung des Einflusses des Prägens auf die optischen Eigenschaften der Wellenleiter wurden für Referenzmessungen direktlithografisch Rippenstrukturen hergestellt. Dazu wurden sowohl Röntgenlithografie als auch UV-Lithografie verwendet.

Direktlithografische Herstellung von Wellenleiterstrukturen mit Röntgentiefenlithografie Mittels einer Röntgenzwischenmaske wurden Strukturen in PMMA-Substrate (HesaGlas VOS, Dicke 500 μm) belichtet. Die Rippenhöhe wurde durch die Bestrahlungsdosis definiert, die wie bei der Formeinsatzherstellung mit dem Programm DoSim berechnet wurde. Ziel war eine Rippenhöhe von 20 bis 50 μm . Da ein Vereinzeln durch Sägen bei solchen extremen Aspektverhältnissen nicht möglich ist, wurde in einem zweiten Belichtungsschritt eine Stahlblende mit senkrechten Schlitzen so über der Struktur justiert, dass die Kanten der Schlitze senkrecht zu den Wellenleitern positioniert waren. Dadurch konnten Kanten mit hoher Qualität unabhängig von der Breite der Struktur realisiert werden. Anschließend wurden die Proben wie in 3.5 beschrieben flutbelichtet.

Die mit dieser Technologie hergestellten Strukturen wurden auf ihre Modencharakteristik hin untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass in der vertikalen Ebene auch bei einer Wellenlänge von 1550 nm mehrere Moden ausbreitungsfähig waren. Dies ist durch die DUV-Modifikation nicht zu erklären, da die Eindringtiefe der UV-Strahlung dafür nicht ausreicht. Eine Referenzmessung einer unbestrahlten Rippe zeigte, dass die Struktur auch ohne zusätzliche UV-Bestrahlung bereits Licht leiten konnte. Das bedeutet, dass bei der Strukturierung die Restdosis unter dem Goldabsorber bereits zu einer signifikanten Brechzahlhöhung geführt hat, ohne aber die Löslichkeit des Materials zu verändern [86]. Eine Vermeidung dieses Effektes ist nur möglich, wenn die Dosis unter dem Absorber deutlich abgesenkt werden kann, d.h. der Kontrast der Maske muss erhöht werden. Eine Lösung kann die Verwendung einer Standard-Röntgenmaske mit einer Absorberdicke von mehr als 10 μm sein. Die Herstellung einer solchen Maske ist allerdings mit erheblichem Aufwand verbunden und wurde deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht realisiert.

Direktlithografische Herstellung von Wellenleiterstrukturen mit UV-Lithografie Alternativ zu Röntgenlithografie bietet UV-Lithografie die Möglichkeit zur Herstellung von Rippenstrukturen. Bedingt durch die Eindringtiefe der Strahlung ist allerdings die erreichbare Rippenhöhe auf ca. 7 μm begrenzt. Der Prozess war aufgrund dieser Einschränkung zu Beginn der Arbeit auch nicht als geeigneter Herstellungsprozess für die Rippenstrukturen eingestuft worden.

Die Rippenstrukturen wurden durch DUV-Belichtung und Entwicklung von PMMA (Hesaglas VOS) hergestellt. Die chemische Reaktion, die zur Erhöhung der Löslichkeit führt, entspricht der in 3.5 dargestellten Reaktion für die Brechzahlmodifikation. Die verwendete Dosis betrug 6 J/cm^2 , womit eine Rippenhöhe von 7 μm erzielt wurde. Eine höhere Dosis führt aufgrund der begrenzten Eindringtiefe der Strahlung nicht zu höheren Strukturen [87]. Anschließend wurden die Strukturen zur Erhöhung der Brechzahl flutbelichtet. Die Dosis betrug dabei 5 J/cm^2 .

Die Nahfeldcharakterisierung zeigte, dass Licht in den Rippen geführt wird. Es ist dabei Streuung des Lichtes in die ebenfalls modifizierte Oberfläche der entwickelten Bereiche zu erkennen (siehe Abb. 4.7).

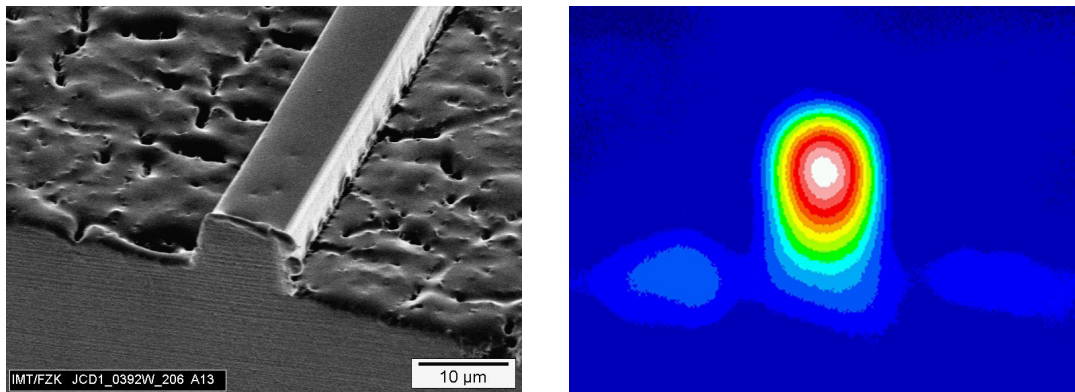


Abbildung 4.7: REM-Bild und Nahfeldaufnahme eines lithografisch hergestellten Rippenwellenleiters. Im Nahfeld ist eine Streuung von Intensität in das Substrat erkennbar.

In Tabelle 4.2 sind die an den Strukturen ermittelten Modengrenzen bei einer Wellenlänge von 1550 nm im Vergleich zu denen geprägter Wellenleiter dargestellt ¹.

	untere Grenze für Lichtausbreitung	Grenze für monomodige Lichtausbreitung
Heißprägen	< 5,5 µm	10,5 µm
DUV-Lithografie	7,5 µm	15 µm

Tabelle 4.2: Experimentell ermittelte Modengrenzen in lithografisch hergestellten und in geprägten Rippenwellenleitern bei $\lambda=1550$ nm.

Es ist ersichtlich, dass neben den diskutierten Ungenauigkeiten der Simulation auch das Prägen ein Grund für die aufgetretenen Abweichungen ist. Läge die Ursache nur in der Simulation, so würde sich das Verhalten eines lithografisch hergestellten Wellenleiters nicht von einem geprägten Wellenleiter unterscheiden. Wie in Gleichung (2.25) beschrieben, kommen als Ursachen hierfür die Änderung des molaren Volumens sowie die Änderung der molekularen Refraktion durch Veränderung von Bindungen im Material in Frage.

Es erscheint wahrscheinlich, dass es durch die mechanische Belastung des Materials beim Prägen und der Verschiebung der Polymerketten zu einer Erhöhung der Dichte des Materials und damit zu einer Verringerung des molaren Volumens gekommen ist. Modenlinienmessungen an unstrukturierten, geprägten Proben aus PMMA (geprägt bei

¹Für sichtbares Licht der Wellenlänge 635 nm wurde für mit 3 J/cm^2 bestrahlte lithografisch hergestellte Rippen bei einer Breite von 5 µm monomodige Lichtausbreitung festgestellt. In 3 µm breiten Rippen ließ sich kein geführtes Licht nachweisen.

170 °C und 3 MPa) zeigten zwar keine Veränderung der Brechzahl, jedoch entspricht die flächenhafte Belastung nicht den Verhältnissen, die beim Befüllen der Mikrostrukturen herrschen. Die m-Linien-Spektroskopie eignet sich nicht zur Messung kleiner Proben, weshalb das tatsächlich in der Rippe vorherrschende Brechzahlprofil im Rahmen der Arbeit nicht bestimmt werden konnte.

Eine Abschätzung der Abhängigkeit der Brechzahl von der Dichte nach Gleichung (2.23) bis (2.25) mit Werten aus [88] ergibt, dass eine Brechzahländerung in der Größenordnung der durch DUV-Bestrahlung erzeugten Brechzahlerhöhung bereits durch eine Dichteänderung von einem Prozent hervorgerufen wird. Ein solcher Wert ist für den Heißprägeprozess durchaus realistisch [89].

Eine weitere Möglichkeit zur Modifikation der Brechzahl ist eine Änderung der molaren Refraktion durch chemische Veränderungen im Material. Zum Nachweis solcher Veränderungen wurde mit dynamischer Differenzkalorimetrie (*engl. Differential Scanning Calorimetrie*, DSC) das thermische Verhalten des Materials untersucht.

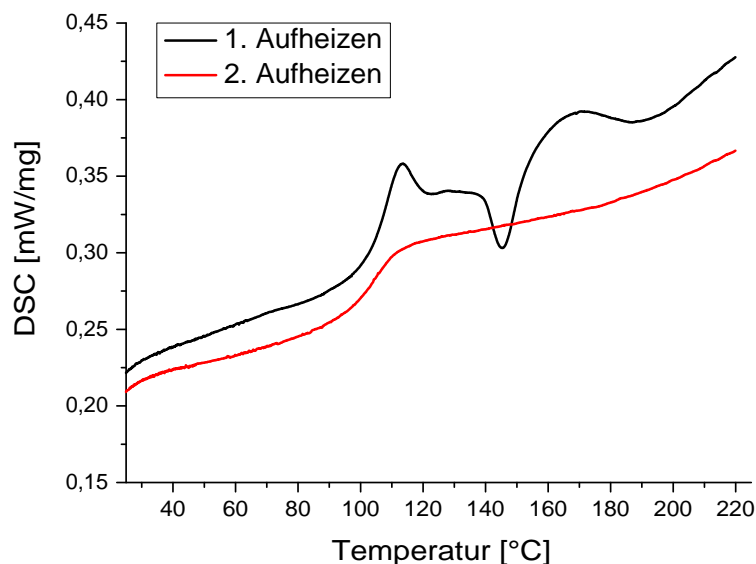


Abbildung 4.8: DSC-Analyse von Hesaglas VOS.

Die zyklische DSC-Messung in Abbildung 4.8 zeigt beim 1. und 2. Aufheizen jeweils eine endotherme Stufe (Glasübergangsbereich) mit einer ermittelten Glasübergangstemperatur $T_g \approx 105^\circ\text{C}$ (1. Aufheizen) und $T_g \approx 103^\circ\text{C}$ (2. Aufheizen). Nur beim 1. Aufheizen tritt im Bereich des Glasübergangs ein endothermer Peak (Enthalpielaxation) bei $T \approx 114^\circ\text{C}$ und zusätzlich ein exothermer Peak bei $T \approx 145^\circ\text{C}$ auf. Eine Enthalpielaxation tritt dann auf, wenn das Material einer physikalischen Alterung (z.B. Lagerung) bei Temperaturen unterhalb der Glasübergangstemperatur ausgesetzt ist, was zu einer Enthalpieniedrigung des Probenmaterials führt. Ein anschließendes Aufheizen des Materials führt zu einem so

genannten Überhitzungspeak. Die bei der ersten Messkurve ausgewertete Glasübergangstemperatur ist dabei durch die thermische Vorgeschichte des Probenmaterials beeinflusst. Bei der bei der schwarzen Messkurve ausgewerteten Glasübergangstemperatur handelt es sich um einen Materialkennwert, da das Probenmaterial durch ein definiertes Abkühlen in einen Referenzzustand gebracht wurde. In einer Thermogravimetriemessung trat im Bereich des exothermen Peaks bei 145 °C keine Gewichtsänderung auf.

Eine Erklärung für das Auftreten des exothermen Peaks in der DSC-Kurve bei 145 °C kann nicht zweifelsfrei gegeben werden. Denkbar wäre eine chemische Reaktion von Zusatzstoffen im Polymer. Diese Veränderungen könnten theoretisch ebenfalls die Brechzahl beeinflussen, da aber an den unstrukturierten geprägten Proben keine Änderung der Brechzahl festgestellt wurde, sind keine präzisen Aussagen zum Einfluss möglich.

4.3 Kopplerstrukturen

Als Beispiel für einfache zu realisierende, aber dabei sehr effektive und kompakte Bauelemente wurden im Rahmen der Arbeit Multimode-Interferenzkoppler simuliert und hergestellt. Multimode-Interferenzkoppler zeichnen sich durch Kompaktheit und geringes Übersprechen aus [30]. Zudem sind sie weniger problematisch bezüglich der Fertigungstoleranzen als beispielsweise Y-Koppler oder Richtkoppler, deren z.T. sehr feine Strukturen bei der Prozessführung problematisch sind.

Die Geometrie der Multimode-Koppler wurde durch Simulation mit BeamPROP mit dem auch für gerade Wellenleiter verwendeten Modell ermittelt. Dabei wurde das Teilverhältnis durch die Wahl der Länge von 1213 μm des Multimode-Bereiches so gewählt, dass eine gleichmäßige Aufteilung der Intensität auf beide Ausgangswellenleiter gegeben ist (3 dB-Koppler). Auf dem Maskendesign wurde zudem die Länge des MMI-Bereiches variiert, um Herstellungstoleranzen auszugleichen.

Wie in Abschnitt 4.2.2 dargelegt, entspricht das verwendete Simulationsmodell nicht den gemessenen Werten. Auch die MMI-Koppler wiesen aus diesem Grund eine abweichende Charakteristik auf. So waren die Ein- bzw. Ausgangswellenleiter nicht mehr monomodig, sondern zeigten bei entsprechender Anregung das Anschwingen einer weiteren Mode. Bei der Charakterisierung wurde deshalb versucht, mittels einer möglichst zentralen Anregung des Feldes am Eingangswellenleiter nur die Grundmode anzuregen.

Es wurden abgeformte 1x2- und 1x3-MMI-Koppler charakterisiert. Die Nahfeldaufnahme des 1x2-MMI-Kopplers (Abb. 4.9) zeigt, dass die hergestellten Bauelemente trotz der Abweichungen vom Simulationsmodell funktionstüchtig sind. Die Aufnahme zeigt eine relativ gleichmäßige Aufteilung der Intensität auf beide Ausgänge, dabei wird nur die Grundmode der Wellenleiter angeregt.

Die besten mit UV-lithografisch hergestellten Shims abgeformten 1x2-MMI-Koppler wiesen eine Gesamtdämpfung von 9 dB an jedem Ausgang auf. Nach Abzug der Dämpfung eines geraden Wellenleiters gleicher Länge und gleicher Breite wie die Ausgangswellenleiter

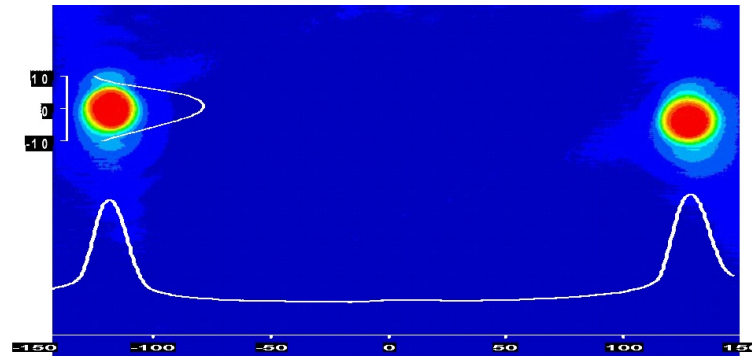


Abbildung 4.9: Nahfeldaufnahme eines abgeformten 1x2-MMI-Kopplers und gemessene Intensitätsverteilung. Einheiten in μm .

(4,9 dB) sowie der bestmöglichen theoretischen Dämpfung durch den Koppler von 3 dB ergibt sich eine zusätzliche Dämpfung von 1,1 dB durch Verluste innerhalb der Struktur. Bei 1x3-MMI-Kopplern lagen die in Bezug auf die Uniformität der Ausgänge besten Werte bei 11,8 dB, was nach gleicher Berechnung einen zusätzlichen, durch die Struktur bedingten Verlust von 2,1 dB bedeutet. Die Uniformität der Intensitätsverteilung liegt dabei jeweils bei ca. $\pm 0,5$ dB.

Die dabei in der Simulation ermittelte MMI-Länge von 1213 μm für 1x2-Koppler bzw. 1197 μm für 1x3-Koppler erwies sich allerdings bei den Messungen nicht als tauglich, die geringsten Verluste traten bei abweichenden Bauteillängen auf. In Abb. 4.10 ist der Verlauf der Ausgangsleistung eines 1x3-MMI-Kopplers über die Wellenlänge aufgetragen. Auch bei dieser Darstellung sind deutliche Abweichungen von der Simulation erkennbar. Die angestrebte gleichmäßige Aufteilung der Intensität auf alle Ausgänge wird nicht bei 1550 nm erreicht, vielmehr wären Wellenlängen von 1525 nm bzw. 1580 nm günstiger.

Weiterhin wurden mit Röntgenlithografie hergestellte Formeinsätze abgeformt und MMI-Strukturen vermessen. Dabei gab es bei den 1x2-MMI-Kopplern keine Verbesserung der Dämpfungswerte. Bei den 1x3-MMI-Kopplern war dagegen eine Reduzierung der Dämpfung zu beobachten. So betrug die zusätzliche Dämpfung bei einigen Strukturen nur ca. 0,5 dB. Dies ist dadurch zu erklären, dass im Gegensatz zu den UV-lithografisch hergestellten Strukturen der Ausgangsbereich deutlich besser abgeformt werden konnte (siehe 3.4.2).

Trotz der beschriebenen Abweichungen des Designs vom Simulationsmodell zeigen die hergestellten MMI-Koppler eine gute Leistung bezüglich der Verluste und der Leistungsverteilung. Dies spricht neben der Vorteile bei der Herstellung für die Verwendung von MMI-Kopplern in stark führenden photonischen Systemen.

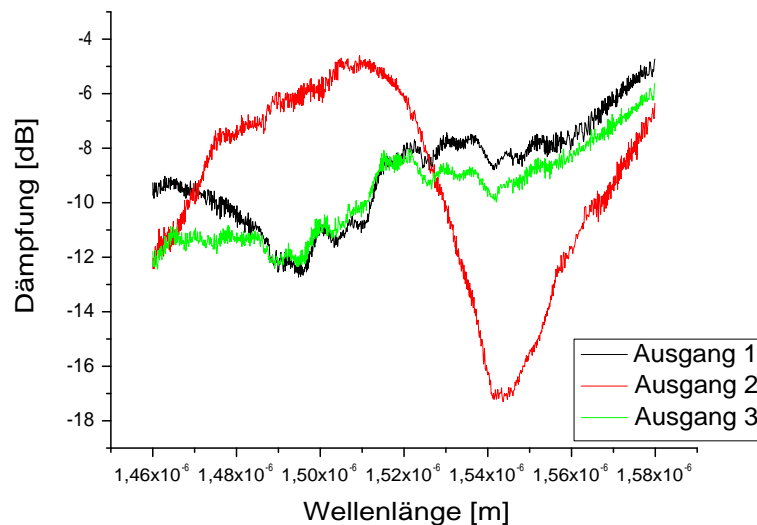


Abbildung 4.10: Wellenlängenabhängigkeit der Ausgangsleistung eines abgeformten 1x3-MMI-Kopplers.

4.4 Ringresonatoren

Für die in dieser Arbeit hergestellten Resonatoren wurde eine Geometrieabschätzung nach Formel (2.14) durchgeführt. Prinzipiell wird bei Ringresonatoren ein möglichst großer FSR angestrebt, was einem möglichst kleinen Radius entspricht. Allerdings nehmen durch die stärkere Krümmung die Wellenleiterverluste zu. Im Rahmen der Arbeit wurden verschiedene Ringgeometrien mit Radien zwischen 10 μm und 1000 μm hergestellt. Weiterhin wurde die Breite der Wellenleiter sowie der Abstand zwischen Eingangswellenleiter und Ring variiert. Dies war sinnvoll, da die Modencharakteristik der geprägten Strukturen Schwankungen unterliegt und Ringresonatoren monomodige Wellenleiter voraussetzen. Weiterhin ging es darum, die Grenze der Herstellbarkeit der Strukturen zu untersuchen. Speziell bei der Realisierung eines möglichst geringen Abstandes zwischen Ring und Wellenleiter traten dabei technologische Probleme auf. Wie in 3.4.2 beschrieben war es nicht möglich, Stege unterhalb einer Breite von 2 μm galvanisch abzubilden. Deshalb konnten so keine Abstände zwischen Ring und Wellenleiter hergestellt werden, die eine Kopplung von Licht in den Wellenleiter über das evaneszente Feld ermöglichen würden. Dagegen war es möglich, durch Überlagerung von Ring und Wellenleiter gekoppelte Strukturen zu erzeugen. Abbildung 4.11 zeigt die REM-Aufnahme einer solchen Struktur.

Um einen Resonator zu erhalten, muss genug Licht in den Ring und wieder aus dem Ring zurück in den Wellenleiter koppeln. Verluste treten an den Koppelstellen, durch die Krümmung des Ringes sowie durch die Dämpfung im Material auf. Prinzipiell ist zu erwarten, dass die Verluste durch die Kopplung mit Vergrößerung des Ringradius abnehmen,

da sich der Öffnungswinkel der Koppelstelle verringert. Auch nehmen durch einen größeren Radius die Krümmungsverluste im Ring ab, während bedingt durch den steigenden Umfang die materialbedingten Verluste zunehmen.

Die hergestellten Strukturen wurden durch Dämpfungsmessungen charakterisiert. Bei Strukturen mit großem Radius wurde dabei Resonatorverhalten festgestellt. Abbildung 4.12 zeigt die Abhängigkeit der Ausgangsleistung eines Ringresonators mit dem Radius $R=1000\ \mu\text{m}$. Bei den kleinen Ringen konnte keine Kopplung von Licht in den Resonator beobachtet werden.

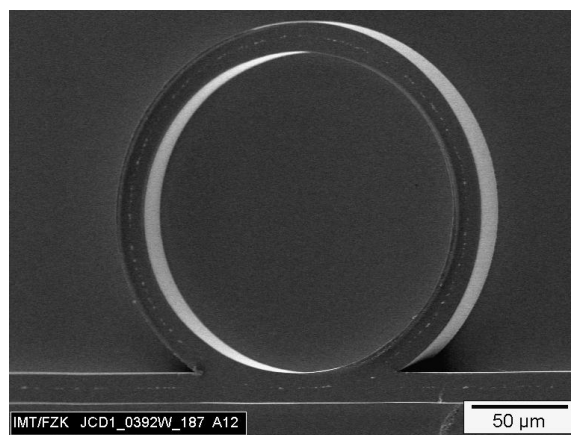


Abbildung 4.11: REM-Aufnahme eines durch Überschneidung der Wellenleiter gekoppelten Ringresonators.

Der Verlauf der in Abbildung 4.12 dargestellten Übertragungsfunktion zeigt, dass Licht vom Wellenleiter in den Ring übergekoppelt wurde und es zu den für Ringresonatoren typischen periodisch auftretenden Minima kommt. Der nach Gleichung (2.14) berechnete FSR von $0,26\ \text{nm}$ stimmt dabei sehr genau mit den gemessenen Werten überein. Auffällig sind die große Bandbreite sowie der geringe Abfall der Resonanzpeaks, die zu einer starken Abweichung von einer idealen Übertragungsfunktion führen.

Wie in 2.1.4 dargestellt wird eine Nullstelle nur bei ausreichender Überkopplung von Licht in den Ring und zurück in den Wellenleiter erreicht. Die Kopplung der hergestellten Strukturen ist bedingt durch den Überlapp von Wellenleiter und Ring nicht ideal. Das Ein- und Auskoppeln der Leistung erfolgt undefiniert durch deformierte Y-Koppler. In der Praxis werden deshalb Richtkoppler oder MMI-Koppler als Elemente zur definierten Leistungsübertragung zwischen Wellenleiter und Ring genutzt. Die Verbreiterung der Peaks lässt sich auf die hohe intrinsische Dämpfung der PMMA-Wellenleiter in Kombination mit den zusätzlichen Verlusten durch die Krümmung des Rings zurückführen.

Wie gezeigt wurde ist es prinzipiell möglich, Ringresonatoren mit dem beschriebenen Verfahren herzustellen. Um allerdings eine technische Anwendung zu ermöglichen, muss die Charakteristik der Übertragungsfunktion verbessert werden. Wegen der hohen intrinsischen Verluste von PMMA im NIR-Bereich erscheint eine Konzentration auf sichtbares

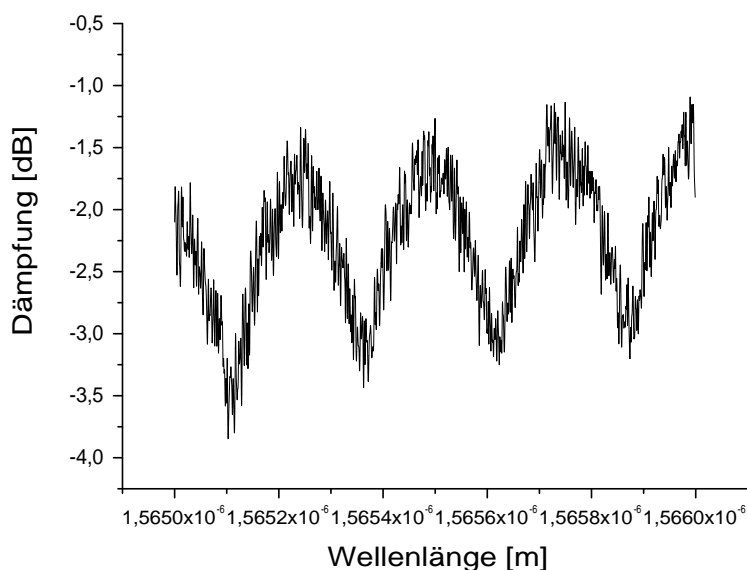


Abbildung 4.12: Resonatorverhalten in einem abgeformten Ringresonator.

Licht dabei sinnvoll. Eine definierte Kopplung von Licht in den Ring ist über einen MMI-Koppler möglich, wenn die Feldausbreitung durch Simulation genau genug vorhergesagt werden kann.

4.5 Organische DFB-Laser

Geprägte Gitter Die im Rahmen der Herstellung von organischen DFB-Lasern erzeugten Strukturen (s. 3.7) wurden am LTI auf ihre optischen Eigenschaften hin untersucht. Dabei ließ sich durch optisches Pumpen im Bereich des Gitters Lasertätigkeit nachweisen. Anschließend wurden die Proben im Bereich der Wellenleiter gepumpt und das Spektrum an der Stirnseite des Wellenleiters aufgenommen. Der Messplatz für die Charakterisierung der wellenleitergekoppelten Laser ist in Abb. 4.13 dargestellt und wird in [75, 90] ausführlich beschrieben. Als Pumplaser dient ein frequenzverdreifachter Nd:YLF-Laser (Newport Spectra-Physics Explorer; Pulslänge: 5 ns; Repitionsrate: 1 kHz). Der Anregespot kann über eine variable Schlitzeblende angepasst werden. Zur Fokussierung dient ein Mikroskopobjektiv (40x). Die Auskoppelfaser ist zur Analyse des Lichtes an ein Spektrometer (Jobin Yvon Triax 320 + Symphony-CCD) angeschlossen.

Bei den Versuchen ist es gelungen, Laserlicht vom Resonator direkt in den Wellenleiter einzukoppeln. Dies war sowohl bei monomodigen Wellenleitern mit einer Breite von 3 μm als auch bei multimodigen Wellenleitern mit einer Breite von 50 μm möglich. Abbildung 4.14 zeigt einen monomodigen Wellenleiter und das zugehörige Spektrum. Die in den

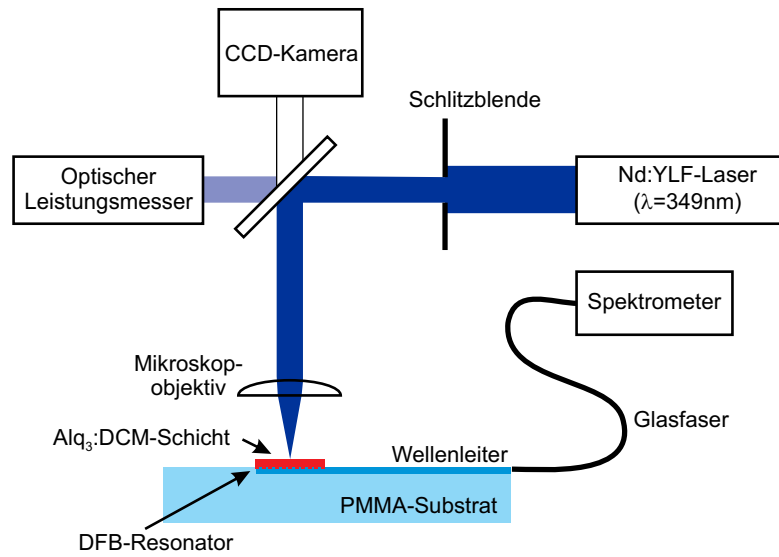


Abbildung 4.13: Schematische Darstellung des Messsystems zur Charakterisierung wellenleitergekoppelter Laser [75].

multimodigen Wellenleiter eingekoppelte Pulsleistung wurde mit $26 \mu\text{W}$ ermittelt und liegt damit 20-mal höher als in den eingangs erwähnten Versuchen zur Einkopplung von ASE in Wellenleiter [74]. Es ist zu erwarten, dass sich dieser Wert durch Optimierung des Gitterdesigns sowie der Abformung noch steigern lässt.

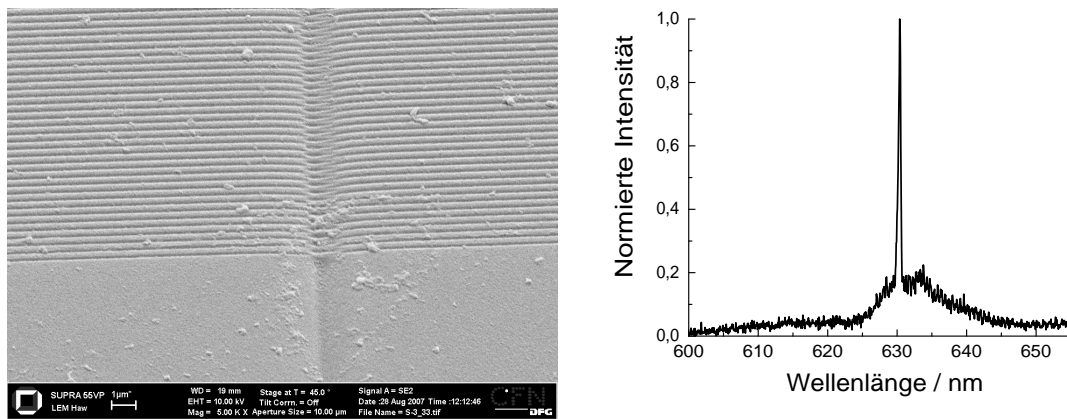


Abbildung 4.14: REM-Aufnahme und eingekoppeltes Spektrum eines monomodigen geprägten DFB-Lasers mit Wellenleiter.

Lithografisch hergestellte Gitter Zum Nachweis der Lasertätigkeit wurde auch bei den lithografisch hergestellten Gittern das Emissionsspektrum sowie die Laserschwelle direkt über dem Gitter gemessen. Die aufgenommenen Kennlinien sind in Abb. 4.15 dargestellt.

Aufgrund der Schmalbandigkeit des Peaks ist erkennbar, dass die hergestellten Gitter als Laserresonatoren wirken. Die im Spektrum auftretenden Nebenmaxima sind durch die Anregung höherer Resonatormoden bedingt.

Im Rahmen der Arbeit war es allerdings nicht mehr möglich, die Einkopplung des Spektrums in Wellenleiter zu untersuchen.

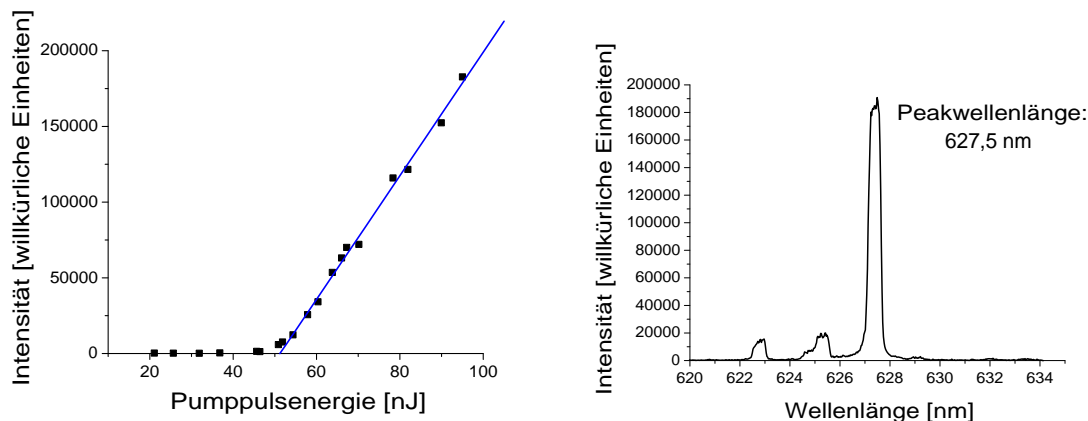


Abbildung 4.15: Laserschwelle und Laserspektrum eines lithografisch hergestellten DFB-Lasers.

4.6 Komponenten für die Biophotonik

Ein potenzielles Anwendungsgebiet für polymere Wellenleiter ist wie eingangs erwähnt die Biosensorik. Speziell die Untersuchung von Zellen „in vivo“ ist dabei von Bedeutung. Deshalb wurden in Kooperation mit der „University of California Santa Cruz“ (UCSC) Experimente zum Wachstum und zur Anregung von Zellen auf lithografisch hergestellten Rippenwellenleitern durchgeführt.

Auf Substraten mit lithografisch hergestellten Rippenwellenleitern wurden mit Fluoreszenzfarbstoff versetzte Gehirnzellen von Ratten (NeuroPure Day 18 Embryonic Sprague/Dawley Rat Hippocampal Cells) kultiviert. Dazu wurde zuvor ein Teflonring als Reservoir auf der Substratoberfläche befestigt, der zur Aufnahme der Zellen und der Nährlösung dient [91]. Zur Vorbereitung wurden die Substrate mit poly-L-Lysin behandelt. Die Zellen wurden getrennt und zusammen mit einer Nährlösung auf das Substrat aufgebracht. Anschließend wurden sie bei einer Temperatur von 37 °C bei einer Kohlendioxidkonzentration von 5% im Inkubator ausgelagert.

Nach zehn bis 14 Tagen sind die Zellen vollständig entwickelt und bilden Vernetzungen untereinander. In diesem Stadium wird der Fluoreszenzfarbstoff Fluo-4 aufgebracht. Der Farbstoff hat ein Maximum im Absorptionsspektrum bei 494 nm und emittiert grünes Licht der Wellenlänge 516 nm.

Abbildung 4.16 zeigt auf strukturierten Substraten wachsende Zellen. Das zur Anregung der Fluoreszenz dienende blaue Licht wurde dabei mit einem 495 nm-Tiefpassfilter ausgeblendet, so dass nur die fluoreszierenden Zellen sichtbar sind. Es ist eine gute Vernetzung der Zellen erkennbar, was ein Zeichen für die gute Kompatibilität mit dem verwendeten Substratmaterial ist. Nervenzellen gehören dabei zu den schwierig zu kultivierenden Zellarten, da sie sehr empfindlich auf Umwelteinflüsse reagieren. Deshalb kann man davon ausgehen, dass die Methode der Anregung auf andere Zelltypen übertragbar ist.

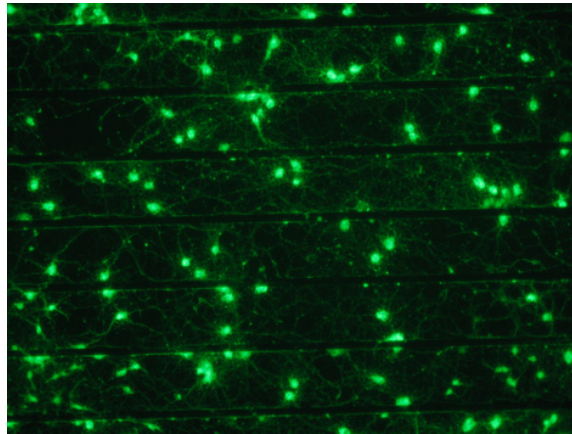


Abbildung 4.16: Nervenzellen auf einem PMMA-Substrat mit lithografisch strukturierten Wellenleitern.

In die Wellenleiter wurde über eine optische Faser Laserlicht der Wellenlänge 473 nm eingekoppelt. In Abbildung 4.17 ist erkennbar, dass die direkt am Wellenleiter haftenden Zellen angeregt werden und grünes Licht emittieren. Damit konnte gezeigt werden, dass die Einkopplung von Licht über das evaneszente Feld möglich ist. Durch die Nutzung von Wellenleitern können dabei ganz gezielt nur bestimmte Zellen angeregt werden. Tendenziell sind für diese Technologie Rippenwellenleiter planaren Wellenleitern überlegen, da sich ihr evaneszentes Feld nicht nur oberhalb sondern auch seitlich des Kerns nutzen lässt. Da die Wellenleiteroberfläche durch die DUV-Modifikation besonders gute Wachstumsbedingungen für Zellen bietet [92], ist es auch denkbar, selektive an Rippenwellenleitern Zellen wachsen zu lassen und diese durch Einkopplung in einzelne Wellenleiter auf einem Substrat zu adressieren.

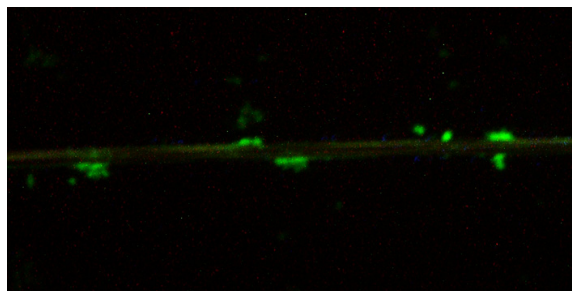


Abbildung 4.17: Fluoreszenz in angeregten Zellen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Alles Wissen und alles Vermehren unseres Wissens endet nicht mit einem Schlusspunkt, sondern mit einem Fragezeichen.

(Hermann Hesse)

5.1 Zusammenfassung der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wurden monomodige Rippenwellenleiter und darauf basierende Bauelemente aus PMMA hergestellt. Dazu wurde das LIGA-Verfahren angewendet, wobei mehrere Prozessschritte an die Anwendung angepasst und weiterentwickelt wurden. Schwerpunkte waren dabei:

- Anpassung der Resisttechnik für die Herstellung von Masterstrukturen durch UV-Lithografie sowie durch Röntgenlithografie.
- Herstellung von Formeinsätzen mit geringer Dicke und geringer Strukturhöhe (Shim-Formeinsätze).
- Zuverlässige Fixierung der Shim-Formeinsätze in den vorhandenen Heißpräganlagen.
- Ermittlung der Parameter für das Vakuumheißprägen zur Abformung photonischer Strukturen.
- Optimierung des Vereinzelungsprozesses.
- Prozessentwicklung für die Herstellung von DFB-Lasergittern durch Heißprägen und durch DUV-Lithografie.

Für die UV-Lithografie wurden die Negativ-Fotoresiste SU-8 und AR-N 4400 untersucht. Aufgrund der schlechten Entfernbarkeit von SU-8 wurde der Prozess für die Verwendung von AR-N 4400 optimiert. Auf Basis dieses Resistes wurden durch galvanische Abscheidung Shim-Formeinsätze hergestellt. Dazu mussten die Startschicht und das Strukturdesign so angepasst werden, dass es nicht zu einer Bildung von Lunkern kam, die Strukturen aber trotzdem vollständig überwachsen konnten. Die UV-lithografisch strukturierte Fläche betrug 89 mm im Durchmesser.

Es hat sich dabei gezeigt, dass mit UV-Lithografie die Herstellung von Formeinsätzen für die geraden Wellenleiter und für stark gekoppelte Ringresonatoren ausreicht. Die

Auflösung ist aber für feine Strukturen wie Y-Koppler oder MMI-Koppler unzureichend. Deshalb wurde als Alternative die Resiststrukturierung mittels Röntgenlithografie optimiert und erstmalig am IMT Shim-Formeinsätze durch Mikrostrukturierung von PMMA mit Röntgenstrahlung hergestellt.

Für die Fixierung der Shims wurde die Methode des Heißklebens ausgewählt. Um eine reproduzierbare Haftung der Shim-Formeinsätze auf einer Grundplatte zu erreichen, wurden verschiedene Einflüsse auf die Festigkeit der Verbindung durch Zugversuche untersucht. Es konnte dabei gezeigt werden, dass für die Haftung nicht allein die Rauheit der Oberfläche verantwortlich ist, sondern die Oberflächenenergie eine entscheidende Rolle spielt. Ein Maß dafür ist beispielsweise der Kontaktwinkel zwischen der Metalloberfläche und Wasser. Die Benetzbarkeit lässt sich wirksam durch eine Behandlung der Oberfläche im Sauerstoffplasma erhöhen. Im Rahmen der Arbeit wurden für die Vorbehandlung der Oberflächen sowie für den Klebeprozess Parameter gefunden, die eine sichere und reproduzierbare Fixierung der Shim-Formeinsätze in den Heißprägeanlagen ermöglichen.

Mit den fixierten Formeinsätzen wurde der Abformungsprozess für die photonischen Bauelemente optimiert. Zur Abformung wurde PMMA verwendet. Die Prägeparameter sind dabei stark von Layout und der verwendeten Anlage abhängig. Trotz des zunehmenden Einflusses der Restschichtdicke auf Grund der geringen Strukturhöhe konnten komplexe Rippenstrukturen mit hoher Strukturtreue abgeformt werden. Die an den Strukturen festgestellten Defekte lassen sich zum größten Teil auf Defekte im Formeinsatz zurückführen. Diese können durch Fehler im Resist oder bei Stegen unter 2 μm Breite durch zu geringe Stabilität des Nickel-Formeinsatzes bedingt sein.

Das Vereinzeln der Strukturen durch Sägen stellte eine besondere Herausforderung dar. Durch Minimierung der thermischen und mechanischen Belastung konnte der Prozess soweit optimiert werden, dass sich freistehende Rippen bis zu einem Aspektverhältnis von 3,5 durchtrennen ließen und gleichzeitig eine geringe Rauheit der Stirnseiten die Einkopplung von Licht ermöglichte.

Die so hergestellten Strukturen konnten durch DUV-induzierte Brechzahlmodifikation als passive optische Komponenten genutzt werden. Bei der Charakterisierung durch Nahfeldmessungen zeigte sich, dass die Modencharakteristik deutlich von dem in der Simulation abgeschätzten Verhalten abwich. So war die Grenzbreite der Rippen für monomodige Lichtleitung deutlich in Richtung niedrigerer Werte verschoben und schwankte zudem je nach verwendeter Probe. Durch Vergleichsmessungen mit direktlithografisch hergestellten Rippenstrukturen konnte gezeigt werden, dass der Prägeprozess einen signifikanten Einfluss auf die Modenausbreitung im Rippenwellenleiter hat. Ursache dafür ist vermutlich eine lokale Erhöhung der Brechzahl durch Verdichtung der Moleküle. Weiterhin wurden zur Charakterisierung die Dämpfung der Wellenleiter durch Cut-Back-Messung ermittelt. Die ermittelte Dämpfung lag im Durchschnitt bei 1,6 dB/cm.

Als Alternative Prägetechnik konnte in der Arbeit gezeigt werden, dass die direktlithographische Strukturierung von PMMA mit anschließender DUV-Brechzahlmodifikation ebenfalls Möglichkeit bietet, lichtleitende Rippenstrukturen zu erzeugen. Bei den untersuchten Strukturen konnte monomodige Lichtleitung für infrarotes Licht ($\lambda=1550\text{ nm}$) bei

Strukturbreiten von 7,5 bis 15 μm und für sichtbares Licht ($\lambda=635\text{ nm}$) bei Strukturbreiten von 5 μm nachgewiesen werden. Bei der lithografischen Strukturierung kommt es im Gegensatz zum Prägen nicht zu einer Verformung des Substrates, was nachfolgende Prozesse deutlich erleichtert. Es ist zu erwarten, dass dieses Herstellungsverfahren ähnlich reproduzierbare Ergebnisse liefert wie sie bereits bei der Herstellung von planaren Wellenleiter erreicht wurden [71].

Neben der Herstellung passiver optischer Strukturen war die Prozessentwicklung für die Integration von DFB-Lasern auf PMMA-Substraten ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit. In Kooperation mit dem Lichttechnischen Institut der Universität Karlsruhe wurden dabei Gitterstrukturen mit Linienbreiten von 100 nm hergestellt, galvanisch umkopiert und abgeformt. Nach dem Aufbringen des organischen laseraktiven Materials $\text{Alq}_3\text{:DCM}$ konnte Lasertätigkeit angeregt werden. In weiterführenden Experimenten konnte die Leistung des Lasers in einen durch DUV-Bestrahlung definierten planaren Wellenleiter eingekoppelt und an der Stirnfläche des Substrates nachgewiesen werden.

Problematisch bei der Herstellung der integrierten DFB-Laser ist die Verformung des Substrates sowie das Schrumpfen des Polymers durch das Prägen. Dadurch lassen sich nachfolgende Prozesse wie z.B. optische Lithografie oder Bonden nur noch schwer durchführen, eine Integration mit Standard-MEMS-Technologien ist damit nicht gegeben. Als Alternative wurde die Herstellung von DFB-Lasern dritter Ordnung durch DUV-Lithografie untersucht. Auf DUV-belichteten und entwickelten PMMA-Substraten konnte nach Aufdampfen von $\text{Alq}_3\text{:DCM}$ ebenfalls Lasertätigkeit nachgewiesen werden.

5.2 Folgerungen

Mit den erarbeiteten Prozessen konnten erfolgreich Rippenstrukturen in PMMA hergestellt werden. Bei der Charakterisierung der Wellenleiter zeigte sich, dass das Herstellungsverfahren und dabei speziell das Prägen einen entscheidenden Einfluss auf die optischen Eigenschaften der Komponenten hat.

Eine genaue Untersuchung der für die Veränderung entscheidenden Prägeparameter ist aufgrund der Vielzahl der Einflussgrößen extrem aufwändig und konnte im Rahmen der Arbeit nicht vollständig realisiert werden. Selbst bei Kenntnis der Zusammenhänge ist es aber nicht möglich, die Ergebnisse präzise vorherzusagen. Dies liegt einerseits daran, dass die Parameter stark vom Layout abhängig sind und nicht absolut festgelegt werden können. Zum anderen ist die Reproduzierbarkeit bei den verwendeten Anlagen nicht gegeben, da die Stabilität von Heiz- und Kühlrate nur eingeschränkt gewährleistet ist [46]. Dies ist unter anderem dadurch bedingt, dass die Temperatur des Kühlmittelvorlaufs nicht konstant gehalten werden kann.

Ein weiterer kritischer Punkt ist die Schwankung der Qualität der Einkopplung. Durch die Optimierung der Sägeparameter können zwar mittlerweile die geprägten Strukturen zerstörungsfrei getrennt werden. Die Oberflächenqualität der Sägekante schwankt dennoch in einem Bereich, der die Dämpfung und damit die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems immer noch signifikant beeinflusst.

Aus den geschilderten Zusammenhängen kann gefolgert werden, dass eine Herstellung von monomodigen Wellenleitern durch die Kombination von Heißprägen und DUV-Brechzahlmodifikation für den NIR-Wellenlängenbereich prinzipiell möglich ist. Aufgrund der Erkenntnisse lässt sich aber feststellen, dass mit den genutzten Prozessen und Anlagen die Strukturen nicht mit reproduzierbaren optischen Eigenschaften hergestellt werden können. Deshalb ist das Verfahren unter den gegebenen Randbedingungen für die Herstellung von MMI-Kopplern und Resonatoren ungeeignet, da diese nur geringe Toleranzen gegenüber Schwankungen der optischen Eigenschaften besitzen.

Trotz dieser Einschränkungen bei monomodigen Wellenleiterstrukturen im NIR-Wellenlängenbereich kann der untersuchte Prozess auf Grund der durchgeführten Verbesserungen für eine Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden. Die Nutzung zur Herstellung von Rippenwellenleitern ist möglich, wenn stark führende multimodige Wellenleiter benötigt werden. Abgesehen von der Abformung passiver photonischer Strukturen kann der Prozess auch für fluidische Strukturen oder die Kombination aus fluidischen und optischen Strukturen angewendet werden. Durch den Einsatz von röntgenlithografisch strukturierten Shim-Formeinsätzen ist es möglich, Strukturen mit geringer Strukturhöhe bei gleichzeitig hohem Aspektverhältnis zu realisieren. Auch die Abformung von Sub- μm -Strukturen auf relativ großen Flächen ist möglich. Ein realisiertes Beispiel dafür ist die Herstellung von integrierten DFB-Lasern erster Ordnung.

Für die Herstellung von Komponenten für sichtbares Licht bietet eine direktlithografische Strukturierung eine Alternative zum Prägen, da hier geringere Strukturhöhen für die Lichtführung ausreichend sind.

5.3 Ausblick

Da die Verwendung von PMMA für die optische Datenübertragung aufgrund der relativ hohen Dämpfung und geringen thermischen Beständigkeit wenig wahrscheinlich ist, kommen für die Rippenwellenleiter eher Anwendungen im Bereich des sichtbaren Lichtes in Frage. Ein großes Potenzial bietet hier die Bioanalytik und dabei speziell das Monitoring lebender Zellen.

Unabhängig davon kann die entwickelte Technologie der Strukturierung und Abformung von Nickel-Shim-Formeinsätzen für eine Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden. Auf UV-Lithografie basierende Formeinsätze bilden dabei beispielsweise für einfache fluidische Systeme eine Alternative zur relativ aufwendigen mikromechanischen Bearbeitung. Bei höheren Anforderungen an die Strukturgenauigkeit und die Seitenwandqualität der Strukturen bietet die erarbeitete Strukturierung von Shim-Formeinsätzen durch Röntgenlithografie neue Möglichkeiten. Unter anderem lassen sich auf diese Weise Submikrometerstrukturen mit hohen Aspektverhältnissen abformen.

Mit den in der Arbeit vorgestellten Verfahren lassen sich weiterhin perspektivisch neuartige integrierte Analysesysteme („Lab-on-a-chip“) mit bio-fluidisch-photonischen Komponenten aufbauen. Besonders interessant ist dabei die gezeigte Integration von organischen

Lasern und Photodetektoren mit Kanälen und photonischen Strukturen auf demselben Substrat. Das Material PMMA bietet dafür aufgrund seiner geringen Materialkosten, guten Prozessierbarkeit und der Möglichkeit zur UV-induzierten Brechzahländerung eine gute Basis.

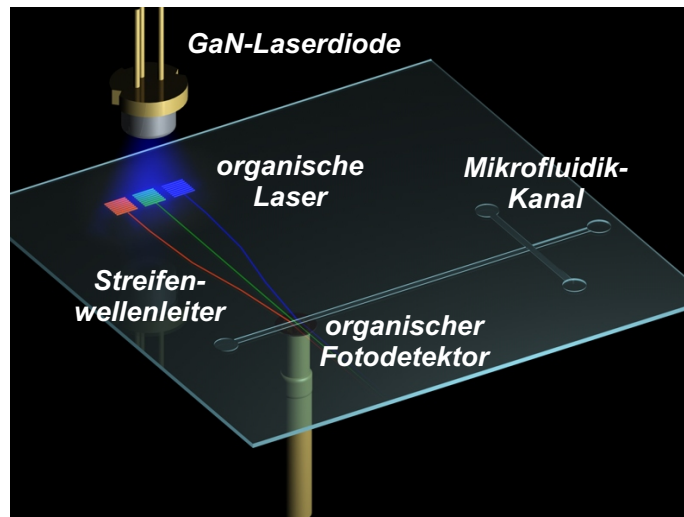


Abbildung 5.1: Schema eines Lab-on-a-Chip-Systems mit organischen Lichtquellen, Detektoren sowie fluidischen Kanälen [75].

Literaturverzeichnis

- [1] WICHT, Henning: NEXUS Market Analysis for MEMS and Microsystems III, 2005-2009. 2006. – Forschungsbericht
- [2] MILLER, S.E.: Integrated Optics: An Introduction. In: *The Bell System Technical Journal* 48 (1969), S. 2059–2069
- [3] MÄRZ, K.: Planare optische Schaltungen. In: VOGES, E. (Hrsg.) ; PETERMANN, K. (Hrsg.): *Optische Kommunikationstechnik - Handbuch für Wissenschaft und Industrie*. Berlin : Springer Verlag, 2002
- [4] ELDADA, Louay: Optical communication components. In: *Review of Scientific Instruments* 75 (2004), Nr. 3, S. 575–593
- [5] CROSS, Graham H.: Polymers in Telecommunication Devices. In: *Rapra Review Report* 13 (2002), Nr. 9
- [6] ELDADA, Louay: Advances in telecom and datacom optical components. In: *Optical Engineering* 40 (2001), Nr. 7, S. 1165–1178
- [7] ZHOU, Ming: Low-loss polymeric materials for passive waveguide components in fiber optical telecommunication. In: *Optical Engineering* 41 (2002), Nr. 7, S. 1631–1643
- [8] ELDADA, Louay ; SHACKLETTE, Lawrence W.: Advances in Polymer Integrated Optics. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 6 (2000), Nr. 1, S. 54–68
- [9] MA, H. ; JEN, A. K. Y. ; DALTON, L. R.: Polymer-Based Optical Waveguides: Materials, Processing, and Devices. In: *Advanced Materials* 14 (2002), Nr. 19, S. 1339–1365
- [10] ROSSI, Markus ; RUDMANN, Hartmut ; MARTY, Brigitte ; MACIOSSEK, Andreas: Wafer-scale micro-optics replication technology. In: *Lithographic and Micromachining Techniques for Optical Component Fabrication II* Bd. 5183. San Diego, CA, USA : SPIE, 2003, S. 148–154

- [11] PASSARO, V. M. N. ; DELL'OLIO, F. ; CASAMASSIMA, B. ; DE LEONARDIS, F.: Guided-wave optical biosensors. In: *Sensors* 7 (2007), Nr. 4, S. 508–536
- [12] POTYRAILO, R. A. ; HOBBS, S. E. ; HIEFTJE, G. M.: Optical waveguide sensors in analytical chemistry: today's instrumentation, applications and trends for future development. In: *Fresenius Journal of Analytical Chemistry* 362 (1998), Nr. 4, S. 349–373
- [13] BECKER, Holger ; LOCASCIO, Laurie E.: Polymer microfluidic devices. In: *Talanta* 56 (2002), Nr. 2, S. 267–287
- [14] FIORINI, G. S. ; CHIU, D. T.: Disposable microfluidic devices: fabrication, function, and application. In: *Biotechniques* 38 (2005), Nr. 3, S. 429–446
- [15] MCCORMICK, R.M. ; NELSON, R.J. ; ALONSOAMIGO, M.G. ; BENVENU, J. ; HOOPER, H.H.: Microchannel electrophoretic separations of DNA in injection-molded plastic substrates. In: *Analytical Chemistry* 69 (1997), Nr. 14, S. 2626–2630
- [16] ROETTING, O. ; ROPKE, W. ; BECKER, H. ; GARTNER, C.: Polymer microfabrication technologies. In: *Microsystem Technologies* 8 (2002), Nr. 1, S. 32–36
- [17] LEE, Gwo-Bin ; CHEN, Shu-Hui ; HUANG, Guan-Ruey ; SUNG, Wang-Chou ; LIN, Yen-Heng: Microfabricated plastic chips by hot embossing methods and their applications for DNA separation and detection. In: *Sensors and Actuators B: Chemical* 75 (2001), Nr. 1-2, S. 142–148
- [18] KRICKA, L. J. ; FORTINA, P. ; PANARO, N. J. ; WILDING, P. ; ALONSO-AMIGO, G. ; BECKER, H.: Fabrication of plastic microchips by hot embossing. In: *Lab on a Chip* 2 (2002), Nr. 1, S. 1–4
- [19] GERLACH, A. ; KNEBEL, G. ; GUBER, A. E. ; HECKELE, M. ; HERRMANN, D. ; MUSLIJA, A. ; SCHALLER, T.: High-density plastic microfluidic platforms for capillary electrophoresis separation and high-throughput screening. In: *Sensors and Materials* 14 (2002), Nr. 3, S. 119–128
- [20] SIA, Samuel K. ; WHITESIDES, George M.: Microfluidic devices fabricated in Poly(dimethylsiloxane) for biological studies. In: *Electrophoresis* 24 (2003), Nr. 21, S. 3563–3576
- [21] FLACHSBART, B. R. ; WONG, K. ; IANNAONE, J. M. ; ABANTE, E. N. ; VLACH, R. L. ; RAUCHFUSS, P. A. ; BOHN, P. W. ; SWEEDLER, J. V. ; SHANNON, M. A.: Design and fabrication of a multilayered polymer microfluidic chip with nanofluidic interconnects via adhesive contact printing. In: *Lab on a Chip* 6 (2006), Nr. 5, S. 667–674

-
- [22] PSALTIS, D. ; QUAKE, S. R. ; YANG, C. H.: Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics. In: *Nature* 442 (2006), Nr. 7101, S. 381–386
- [23] MONAT, C. ; DOMACHUK, P. ; EGGLETON, B. J.: Integrated optofluidics: A new river of light. In: *Nature Photonics* 1 (2007), Nr. 2, S. 106–114
- [24] HENZI, Patric: *UV-induzierte Herstellung monomodiger Wellenleiter in Polymeren*, Universität Karlsruhe, Doktorarbeit, 2004
- [25] ALBATAL, Safwan: *Herstellung von geprägten Polymer-Wellenleitern für die optische Nachrichtentechnik*, Universität Karlsruhe, Doktorarbeit, 2003
- [26] EBELING, Karl J.: *Integrierte Optoelektronik*. 1. Auflage. Berlin : Springer Verlag, 1989
- [27] UNGER, H.-G.: *Optische Nachrichtentechnik, Teil 1: Optische Wellenleiter*. Heidelberg : Dr. Alfred Hüthig Verlag, 1992
- [28] BHATTACHARYA, Pallab: *Semiconductor optoelectronic devices*. 2nd Edition. Upper Saddle River, NJ, USA : Prentice-Hall, 1997
- [29] WOGGON, T.: *Lasertätigkeit in organischen Photonischen Kristallen mit Defektmoden*, Universität Karlsruhe, Diplomarbeit, 2006
- [30] SOLDANO, L. B. ; PENNINGS, E. C. M.: Optical Multimode Interference Devices Based on Self-Imaging - Principles and Applications. In: *Journal of Lightwave Technology* 13 (1995), Nr. 4, S. 615–627
- [31] GLASER, Wolfgang: *Photonik für Ingenieure*. Berlin : Verlag Technik, 1997
- [32] RABUS, Dominik G.: *Integrated Ring Resonators: The Compendium*. Berlin : Springer Verlag, 2007 (Springer Series in Optical Sciences, Vol. 127)
- [33] SAMUEL, I. D. W. ; TURNBULL, G. A.: Organic Semiconductor Lasers. In: *Chemical Reviews* 107 (2007), Nr. 4, S. 1272–1295
- [34] KOZLOV, V. G. ; BULOVIC, V. ; BURROWS, P. E. ; BALDO, M. ; KHALFIN, V. B. ; PARTHASARATHY, G. ; FORREST, S. R. ; YOU, Y. ; THOMPSON, M. E.: Study of lasing action based on Forster energy transfer in optically pumped organic semiconductor thin films. In: *Journal of Applied Physics* 84 (1998), Nr. 8, S. 4096–4108
- [35] STROISCH, Marc: *Organische Halbleiterlaser auf Basis photonischer Kristalle*, Universität Karlsruhe, Doktorarbeit, 2007
- [36] FÖRSTER, Theodor: Zwischenmolekulare Energiewanderung und Fluoreszenz. In: *Annalen der Physik* 437 (1948), Nr. 1, S. 55–75

- [37] CASPERSON, L.: Threshold characteristics of mirrorless lasers. In: *Journal of Applied Physics* 48 (1977), S. 256–264
- [38] BERG, S. A. d. ; BEZEMER, R. H. V. ; SCHOO, H. F. M. ; HOOFT, G. W. ; ELIEL, E. R.: From amplified spontaneous emission to laser oscillation: dynamics in a short cavity polymer laser. In: *Optics Letters* 24 (1999), Nr. 24, S. 1847–1849
- [39] KRANZELBINDER, G. ; LEISING, G.: Organic solid-state lasers. In: *Reports on Progress in Physics* 63 (2000), Nr. 5, S. 729–762
- [40] BECKER, E. W. ; EHRFELD, W. ; HAGMANN, P. ; MANER, A. ; MUNCHMEYER, D.: Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofforming, and plastic moulding (LIGA process). In: *Microelectronic Engineering* 4 (1986), Nr. 1, S. 35–56
- [41] CAMPBELL, Stephen A.: *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*. New York : Oxford University Press, 1998
- [42] SCHANZ, G. ; BADE, K.: Microelectroforming of Metals. In: *Microengineering of Metals and Ceramics, Part II: Special Replication Techniques, Automation, and Properties*. Weinheim : Wiley-VCH, 2005, S. 395–421
- [43] KANANI, Nasser: *Galvanotechnik*. 1. Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 2000
- [44] HANEMANN, T ; HECKELE, M. ; PIOTTER, V.: Current Status of Micromoulding Technology. In: *Polymer News* 25 (2000), S. 224–229
- [45] MICHEL, A. ; RUPRECHT, R. ; HARMENING, M. ; BACHER, W.: Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern. Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1993. – KfK Bericht 5171
- [46] WORGULL, Matthias ; HECKELE, Mathias ; SCHOMBURG, Werner K.: Analyse des Mikroheiprageverfahrens. Forschungszentrum Karlsruhe, 2003. – Wissenschaftliche Berichte FZKA 6922
- [47] BISCHOF, C. ; POSSART, W.: *Adhasion - Theoretische und experimentelle Grundlagen*. 1. Auflage. Berlin : Akademie-Verlag, 1982
- [48] HABENICHT, Gerd: *Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1986
- [49] BISCHOF, C. ; BAUER, A. ; POSSART, W. ; KAPELLE, R. ; SCHULZE, R. D.: Zur Adhasion in Metall-Polymer-Grenzschichten und ihrer praktischen Nutzung. In: *Acta Polymerica* 40 (1989), Nr. 3, S. 214–221

- [50] KOPETZ, S. ; RABE, E. ; KANG, W. J. ; NEYER, A.: Polysiloxane optical waveguide layer integrated in printed circuit board. In: *Electronics Letters* 40 (2004), Nr. 11, S. 668–669
- [51] ELDADA, L. ; XU, C. Z. ; STENGEL, K. M. T. ; SHACKLETTE, L. W. ; YARDLEY, J. T.: Laser-fabricated low-loss single-mode raised-rib waveguiding devices in polymers. In: *Journal of Lightwave Technology* 14 (1996), Nr. 7, S. 1704–1713
- [52] JÖHNCK, Matthias: *Polyacrylate und Polylactone für Anwendungen in einmodigen, integriert optischen, passiven Wellenleitern*, Universität Dortmund, Doktorarbeit, 2000
- [53] CHANDROSS, E. A. ; PRYDE, C. A. ; TOMLINSON, W. J. ; WEBER, H. P.: Photolocking-A new technique for fabricating optical waveguide circuits. In: *Applied Physics Letters* 24 (1974), Nr. 2, S. 72–74
- [54] CHOI, J. O. ; MOORE, J. A. ; CORELLI, J. C. ; SILVERMAN, J. P. ; BAKHRU, H.: Degradation of poly(methylmethacrylate) by deep ultraviolet, x-ray, electron beam, and proton beam irradiations. In: *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures* 6 (1988), Nr. 6, S. 2286–2289
- [55] SCHOESSER, Alexander ; TSCHUDI, Theo T. ; FRANK, Werner F. ; POZZI, Fabio: Spectroscopic study of surface effects in polymer waveguides generated by ionizing radiation related to guiding properties. In: LESSARD, Roger A. (Hrsg.): *Photopolymer Device Physics, Chemistry, and Applications III* Bd. 2851. Denver, CO, USA : SPIE, 1996, S. 73–81
- [56] MENZ, Wolfgang ; MOHR, Jürgen ; PAUL, Oliver: *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*. 3. Auflage. Weinheim : Wiley-VCH, 2005
- [57] ALLRESIST GMBH: *Produktbeschreibung*. <http://www.allresist.de/wDeutsch/produkte/Photoresists/0110.php> , Jul 2007
- [58] REZNIKOVA, E. F. ; MOHR, J. ; HEIN, H.: Deep photo-lithography characterization of SU-8 resist layers. In: *Microsystem Technologies* 11 (2005), Nr. 4 - 5, S. 282–291
- [59] DENTINGER, Paul M. ; CLIFT, W. M. ; GOODS, Steven H.: Removal of SU-8 photoresist for thick film applications. In: *Microelectronic Engineering* 61-62 (2002), S. 993–1000
- [60] MAPPES, Timo ; ACHENBACH, Sven ; MOHR, Jürgen: Hochoflösende Röntgenlithografie zur Herstellung polymerer Submikrometerstrukturen mit großem Aspektverhältnis. Forschungszentrum Karlsruhe, 2006. – Wissenschaftliche Berichte FZKA 7215
- [61] GLASHAUSER, W. ; GHICA, G.: *Verfahren für die spannungsfreie Entwicklung von bestrahlten Polymethylmetacrylatschichten*. Patent DE3039110A1, 1980

- [62] LÜKER, Arne: *Herstellung von Locharrayfiltern mit Strukturbreiten im Submikrometerbereich für das nahe Infrarot durch Elektronenstrahlolithographie und Galvanik auf Silizium*, FH Münster, Diplomarbeit, 2003
- [63] MCNEELY, Michael L. ; REES, Herbert: *Method for producing injection molded and centrally apertured disc records*. United States Patent 4085178, 1978
- [64] LICHTINGER, Peter ; RINGELSTETTER, Gabriel: *Injection molding assembly for producing disk-shaped information carriers and sleeve for the axial retention and radial centering of a matrix*. United States Patent 5092759, 1992
- [65] LINDEN, Christoph: *Erarbeitung von Konzepten für Fügeverfahren zwischen Shim-Formeinsätzen und massiven Trägerplatten*, Diplomarbeit, 2004
- [66] FALTER, Jens: *Erarbeitung von Konzepten für die kraftschlüssige Verbindung zwischen Shim-Formeinsatz und massiven Trägerplatten*. 2003. – Praxissemesterbericht
- [67] HEIN, Herbert: *Persönliche Mitteilung*. 2005
- [68] BISCHOF, C.: ND-Plasmatechnik im Umfeld der Haftungsproblematik bei Metall-Polymer-Verbunden. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 24 (1993), Nr. 2, S. 33–41
- [69] BOTH, A. ; BACHER, W. ; HECKELE, M. ; MÜLLER, K.D. ; RUPRECHT, R. ; STROHRMANN, M.: Fabrication of LIGA-acceleration sensors by aligned molding. In: *Microsystem Technologies* 2 (1996), S. 104–108
- [70] ICHIHASHI, Yasuhisa ; HENZI, Patric ; BRUENDEL, Mathias ; RABUS, Dominik G. ; MOHR, Juergen: Influence of Exposure Spectra on Optical Properties of Alicyclic Methacrylate Copolymer Waveguides Fabricated by Deep UV Exposure. In: *Japanese Journal of Applied Physics* 45 (2006), Nr. 8 B, S. 6654–6657
- [71] HENZI, Patric ; RABUS, Dominik G. ; WALLRABE, Ulrike ; MOHR, Juergen: Fabrication of photonic integrated circuits by DUV-induced modification of polymers. In: *Integrated Optics and Photonic Integrated Circuits* Bd. 5451. Strasbourg, France : SPIE, 2004, S. 24–31
- [72] BEITZ, Wolfgang (Hrsg.) ; KÜTTNER, Karl-Heinz (Hrsg.): *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*. 17. Auflage. Berlin : Springer Verlag, 1990
- [73] RABUS, Dominik G. ; BRUENDEL, Mathias ; ICHIHASHI, Yasuhisa ; WELLE, Alexander ; SEGER, R. A. ; ISAACSON, Michael: A Bio-Fluidic-Photonic Platform Based on Deep UV Modification of Polymers. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 13 (2007), Nr. 2, S. 214–222

-
- [74] PUNKE, M. ; MOZER, S. ; STROISCH, M. ; HEINRICH, M. P. ; LEMMER, U. ; HENZI, P. ; RABUS, D. G.: Coupling of Organic Semiconductor Amplified Spontaneous Emission Into Polymeric Single-Mode Waveguides Patterned by Deep-UV Irradiation. In: *IEEE Photonics Technology Letters* 19 (2007), S. 61–63
- [75] PUNKE, Martin: *Organische Halbleiterbauelemente für mikrooptische Systeme*, Universität Karlsruhe, Doktorarbeit, 2007
- [76] HEINRICH, Mattias P.: *Ankopplung organischer Laser an Polymerwellenleiter*, Universität Karlsruhe, Bachelorarbeit, 2006
- [77] WORGULL, M. ; HECKELE, M.: New aspects of simulation in hot embossing. In: *Microsystem Technologies* 10 (2004), Nr. 5, S. 432–437
- [78] GIL, D. ; BRUNNER, T. A. ; FONSECA, C. ; SEONG, N. ; STREEFKERK, B. ; WAGNER, C. ; STAVENGA, M.: Immersion lithography: New opportunities for semiconductor manufacturing. In: *Journal of Vacuum Science and Technology B* 22 (2004), Nr. 6, S. 3431–3438
- [79] RIECHEL, S. ; LEMMER, U. ; FELDMANN, J. ; BERLEB, S. ; MUCKL, A. G. ; BRUTTING, W. ; GOMBERT, A. ; WITTEW, V.: Very compact tunable solid-state laser utilizing a thin-film organic semiconductor. In: *Optics Letters* 26 (2001), Nr. 9, S. 593–595
- [80] BUBACK, M. ; VOEGELE, H. P.: *FT-NIR atlas*. New York : VHC Publishers, 1993
- [81] MÜLLER, L.: *Polymere für in Abformtechnik hergestellte integriert-optische Lichtleiter*, Universität Dortmund, Doktorarbeit, 2000
- [82] UNGER, H.-G.: *Optische Nachrichtentechnik, Teil 2: Komponenten, Messtechnik*. Heidelberg : Dr. Alfred Hüthig Verlag, 1993
- [83] WHITE, J. M. ; HEIDRICH, P. F.: Optical waveguide refractive index profiles determined from measurement of mode indices: a simple analysis. In: *Applied Optics* 15 (1976), Nr. 1, S. 151
- [84] HOLLENBACH, Uwe: *Persönliche Mitteilung*. 2007
- [85] HOLLENBACH, Uwe ; BOEHM, Hans-Jürgen ; MOHR, Juergen ; ROSS, Ludwig ; SAMIEC, Dirk: UV Light Induced Single Mode Waveguides in Polymer for Visible Range Applications. In: *ECIO 2007*. Copenhagen, 2007, S. ThD3
- [86] KLIPSTEIN, D.L.: The Contributions of Edsel Murphy to the Understanding of the Behavior of Inanimate Objects. In: *EEE Magazine* 15 (1967), Nr. 8, S. 91–92

- [87] MANDISLOH, Kristin: *Polymere mikrofluidische Systeme mit integrierten Wellenleitern*, Universität Karlsruhe, Doktorarbeit, 2008
- [88] ICHIHASHI, Yasuhisa: *UV-induzierte Brechzahländerung zur Herstellung von Wellenleitern und Integration von Siliziumphotodioden.*, Universität Karlsruhe, Doktorarbeit, 2007
- [89] WORGULL, Matthias: *Persönliche Mitteilung.* 2007
- [90] PUNKE, Martin ; MOZER, Steffen ; STROISCH, Marc ; GERKEN, Martina ; BASTIAN, Georg ; LEMMER, Uli ; RABUS, Dominik G. ; HENZI, Patric: Organic semiconductor devices for micro-optical applications. In: *Micro-Optics, VCSELs, and Photonic Interconnects II: Fabrication, Packaging, and Integration* Bd. 6185. Strasbourg, France : SPIE, 2006, S. 618505–13
- [91] SEGER, R. A. ; RABUS, Dominik G. ; ICHIHASHI, Yasuhisa ; BRUENDEL, Mathias ; HIEB, Jeremy ; ISAACSON, Michael S.: Monitoring Fluorescence in Cultured Neural Networks using Polymer Waveguide Excitation. In: *LEOS Summer Topical Meetings, 2007 Digest of the IEEE*, 2007, S. 113–114
- [92] WELLE, A. ; GOTTWALD, E.: UV-based patterning of polymeric substrates for cell culture applications. In: *Biomedical Microdevices* 4 (2002), Nr. 1, S. 33–41

Danksagung

In den zurück liegenden drei Jahren hatte ich die Gelegenheit, mit sehr vielen kompetenten und hilfsbereiten Menschen zusammen zu arbeiten, die maßgeblich zum Erfolg meiner Arbeit beteiligt waren. Ihnen möchte ich an dieser Stelle danken. Mein erster Dank gilt meinen Doktorvater Prof. Volker Saile für das entgegengebrachte Vertrauen und die Möglichkeit zur Bearbeitung dieses Themas. Weiterhin danke ich Dominik Rabus und Matthias Worgull für die exzellente Betreuung und die vielen Anregungen sowie den Funktionsbereichsleitern Optik und Technologie, Herrn Dr. Mohr und Herrn Dr. Heckeke, für die organisatorische Unterstützung.

Ingenieurwissenschaftliche Arbeiten erfordern oft ein hohes Maß an interdisziplinärer und internationaler Zusammenarbeit. Ich war deshalb auf die Hilfe vieler Personen angewiesen. Dafür danke ich Patric Henzi, Herbert Hein, Barbara Matthis, Martin Börner, Hans Biedermann, Michael Hartmann, Uwe Hollenbach, Hans-Jürgen Böhm, Klaus Feit, Martin Punke, Thomas Woggon und Adam Seger stellvertretend für viele andere Mitarbeiter des IMT, des LTI und der UC Santa Cruz für die wertvollen Anregungen und mindestens genauso wertvolle praktische Hilfe.

Und nicht zuletzt waren an den Ergebnissen auch Sebastian Norajitra, Rui Santana, Matthias Paul Heinrich, Andreas Pütz und Michael Schwarz beteiligt, deren Studien-, Bachelor- oder Diplomarbeiten bzw. Praktika ich die Freude hatte zu betreuen.

Neben der fachlichen Zusammenarbeit hat der kollegiale Umgang und den Zusammenhalt auch über die Arbeitszeit hinaus mit zur notwendigen Motivation beigetragen. Hier danke ich vor allem den Doktoranden des IMT im Allgemeinen und meinen Bürokollegen Wonhee, Holger und Jeanine im Speziellen.

Abschließend möchte ich meinen Freunden und besonders meiner Familie danken, die mich immer auf meinem Weg begleitet und unterstützt haben.

Im Rahmen der Arbeit wurde eine Technologie zur Herstellung von stark führenden photonischen Komponenten aus Poly(methylmethacrylat) (PMMA) erarbeitet. Als Strukturierungsprozess wurde das Heißprägen eingesetzt, die die Erzeugung einer wellenleitenden Kernschicht erfolgte durch UV-induzierte Brechzahlmodifikation. Eine Besonderheit stellte die Verwendung von Shim-Formeinsätzen zur Abformung dar, deren Herstellung auf Basis von Röntgen- und UV-Lithografie ein Schwerpunkt der Arbeit war.

Auf Basis des entwickelten Herstellungsverfahrens wurden gerade Rippenwellenleiter, multimodige Interferenzkoppler sowie Ringresonatoren realisiert und charakterisiert. Es konnte die prinzipielle Eignung des Prozesses für die Erzeugung monomodiger Strukturen für den nahen Infrarotbereich nachgewiesen werden. Die gewonnenen Erkenntnisse dienten weiterhin der Verbesserung des verwendeten Simulationsmodelles. Es wurde in der Arbeit eine Abhängigkeit der optischen Eigenschaften der Rippenwellenleiter vom Strukturierungsprozess experimentell nachgewiesen.

Einen weiteren Schwerpunkt bildete die Herstellung von Bragg-Resonatoren auf PMMA-Substraten zur Herstellung von organischen DFB-Lasern. Sowohl heißgeprägte als auch lithografisch strukturierte Gitter zeigten nach Aufdampfen des aktiven Materials ALQ3:DCM Laserverhalten. Auf heißgeprägten Gittern basierende DFB-Laser konnten zudem in auf demselben Substrat strukturierte polymere Wellenleiter eingekoppelt werden.