

**Mikrolithographische Verfahren
auf der Basis von SU-8-Dicklack
zur Realisierung mikrooptischer Komponenten**

Der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Dortmund
zur Genehmigung eingereichte

Dissertation

zur Erlangung des Akademisches Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt
von

Won-Jong Kang

August 2005

**Microlithographic processes
based on SU-8 thick film resist
for the realization of microoptical components**

Dissertation

submitted for obtaining the degree of
Dr.-Ing.
(Doktor der Ingenieurwissenschaften)

in the
Department of Electrical Engineering and Information Technology
of the University of Dortmund

by

Won-Jong Kang

August 2005

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Mitarbeitern der Arbeitsgebietes Mikrostrukturtechnik und Lehrstuhls Hochfrequenztechnik meinen Dank für immerwährend konstruktive und hilfsbereite Gespräche sowie für tolle Arbeitsatmosphäre, zahlreiche Tips und Anregungen aussprechen.

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2001 bis 2005 am Arbeitsgebiet Mikrostruktutechnik der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik an der Universität Dortmund bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Neyer.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Neyer für die interessante Themenstellung und die fortwährende Unterstützung der vorliegenden Arbeit durch zahlreiche Anregungen sowie die hervorragenden Arbeitsbedingugen am seinem Arbeitsgebiet.

Herrn Stefan Kopetz, Erik Rabe, Oliver Kaiser, Matthias Maluk, Markus Fleger, Axel Rudzinski, Christian Otte, Sven Tombrink, Björn Hühn, Helmut Nolte und Ulrich Marggraf, danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung meiner Arbeit.

Weiterhin danke ich auch allen Miarbeitern des Lehrstuhls Hochfrequenztechnik für das fruchtbare Arbeitsklima und die gute Zusammenarbeit

Der mechanischen Werkstatt danke ich dafür, dass sie durch ihren Sachverstand zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Auszug

In letzter Zeit gewinnt die optische Verbindungstechnik auf Basis von polymeren Lichtwellenleitern an großer Bedeutung in elektrisch-optischen Leiterplatten. Hierbei spielt die Ein- und Auskopplung der Lichtsignale mittels eines Koppelementes wie z.B. eines 45° Spiegels für eine optische Übertragungsstrecke in der Leiterplatte eine wichtige Rolle. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit mikrolithographische Verfahren zur Herstellung von optischen 3D-Koppelementen vorgestellt, welche zur einfachen und kostengünstigen Massenproduktion führen können.

Als eine aussichtsreiche Technologie wird die Mikrolithographie auf der Basis von Negativ-Photoresist SU-8TM vorgestellt. Mit Hilfe von optischer Lithographie und Mikrofrästechnik werden Koppelemente, wie z.B. integrierte Mikrospiegel und Mikroprismen, angefertigt und ihre Funktion unter Beweis gestellt.

Neben Herstellungsverfahren für 3D-Koppelemente werden hier auch einige Methoden wie z.B. neuartige Belichtungstechniken und Soft-Abformung auf der Basis von Elastomer/Gießharz zur Vermeidung von bekannten SU-8-Problemen – der Hinterschneidung und der unkompletten Lackablösung nach der Galvanik – entwickelt und anschließend experimentell verifiziert.

Abstract

Recently, the optical interconnection based on polymeric optical waveguides has gained great interest in the field of electrical-optical PCB-board. Here, coupling of the optical signal in and out of the PCB-board using coupling elements like 45° -mirrors is very important for the success of the concept of the optical interconnection. Therefore, in this study microlithographic processes that are suitable for simple and mass production at low cost are presented to fabricate optical 3D coupling elements.

As a promising technology microlithography based on the negative tone photoresist SU-8TM has been introduced. By means of optical lithography and micromachining coupling elements like integrated micromirrors and microprisms have been fabricated and their function has been demonstrated.

In addition to the fabrication processes for 3D coupling elements, some methods, such as new exposure techniques and soft-replication based on elastomer/casting resin, have been developed to avoid the problems of the negatively sloped sidewall and incomplete stripping after electroplating found usually in SU-8 thick film technology.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Lichtleitung in optischen Komponenten	8
2.1	Optische Komponenten	8
2.1.1	Lichtausbreitung in Wellenleitern	8
2.1.2	Lichtumlenkung durch reflektierende Oberfläche	10
2.2	Dämpfungsmechanismen	13
3	Theoretische Untersuchungen zur Dickschicht-Mikrolithographie	17
3.1	Optische Lithographie	17
3.2	Maskenbelichtung	22
3.2.1	Intensitätsverteilung ohne Reflexion des Substrates	25
3.2.2	Intensitätsverteilung mit Reflexion vom Substrat	32
3.2.3	Belichtung auf Basis der intentionalen Reflexion	43
3.3	Laserdirektbelichtung	47
3.3.1	Gaußscher Strahl	48
3.3.2	Tiefenbedingte Intensitätsverteilung in Luft	52
3.3.3	Tiefenbedingte Intensitätsverteilung in einem Fotoresist	54
3.3.4	Einfluss des Strahlfokus auf das Profil	56
3.3.5	Belichtung auf Basis der verkleinerten Soll-Breite	61
4	Experimentelle Untersuchungen zur Dickschicht-Mikrolithographie	62
4.1	Mikrolithographie mit SU-8	62
4.1.1	Negativ-Fotoresist SU-8	62
4.1.2	SU-8-Prozess	63
4.2	Reflexionsbelichtung	67
4.3	Laserdirektbelichtungsmethode	74
4.3.1	Belichtung auf Basis des Strahlfokus	76
4.3.2	Belichtungsmethode durch Verkleinerung der Soll-Breite	78

5	Herstellung optischer 3D-Koppelemente auf Basis der Dickschicht-Mikrolithographie	80
5.1	Wellenleiter mit integrierten Mikrospiegeln	80
5.1.1	Resist-Vorform	81
5.1.2	Gießharz-Vorform	86
5.1.3	Nickel-Vorform als metallischer Formeinsatz	88
5.1.4	Koppelstelle mit integrierten Mikrospiegeln	89
5.2	Mikroprismen	90
5.2.1	Herstellung der Mikroprismen durch Mikrofrästechnik	91
5.2.2	Herstellung der Mikroprismen durch optische Lithographie	92
5.2.3	Koppelstelle mit Mikroprisma	95
6	Zusammenfassung und Ausblick	97
	Literatur	99
	<u>Anhang</u>	
	Hilfsverfahren zur Herstellung eines mikrostrukturierten Formeinsatzes	104
A.1	Mikrofrästechnik	104
A.2	Abformverfahren auf Basis von Elastomer/Gießharz	110
A.2.1	Soft-Abformung	113

Kapitel 1

Einleitung

Moderne Informationsmedien haben einen ständig steigenden Bedarf an Daten, die schnell und zuverlässig zur Verfügung stehen müssen. Die rasante Zunahme dieser Datenmengen macht den Einsatz von optischen Komponenten unerlässlich, da die elektrische Datenübertragung in absehbarer Zeit an ihre physikalischen Grenzen stoßen wird.

Um den höheren Übertragungsraten bei der elektrischen Datenübertragung gerecht zu werden, muss die Leistung von Übertragungssystemen ständig erhöht werden. Dies geschieht hauptsächlich durch die Steigerung der Taktrate von Prozessoren und Bussystemen. Dabei sind die Verbindungen der einzelnen Komponenten untereinander durch Leiterbahnen realisiert und bilden einen „Flaschenhals“, der den Datenfluss abbremsen kann. Diese elektrische Verbindungstechnik stößt mit steigender Taktfrequenz immer stärker an ihre physikalische Grenze, da sich elektrische Verluste und Störabstrahlungen immer stärker bemerkbar machen.

Mit den ständig wachsenden Datenmengen wird es somit bald unausweichlich sein, den elektrischen Engpass in der Verbindungstechnik durch optische Lösungen zu ersetzen. Die Übertragung der Informationen über optische Komponenten wie z.B. *Lichtwellenleiter* kann die auch künftig absehbar erforderlichen Datenraten mühelos erbringen, da die optische Übertragungstechnik ideale Voraussetzungen bietet: Die hohe Bandbreite und die geringe Störanfälligkeit im Vergleich zu den elektrischen Verbindungen.

Hier setzt die Entwicklung optischer Bussysteme auf Basis von Lichtwellenleitern, sog. „*Optical Backplanes*“, an. Diese ermöglichen eine optische Verbindung zwischen den Modulen innerhalb eines Systems. Da aber innerhalb eines Systems nicht alle Signale derart hohe Bandbreiten verlangen, z.B. einige Steuersignale, und auch eine elektrische Spannungsversorgung gewährleistet sein muss, ist eine kombinierte elektrisch-optische Multilayer-Platine eine sinnvolle Lösung.

Hierzu muss die Ein- und Auskopplung bei einer optischen Übertragungsstrecke mit einer Lichtquelle als Sender und einem Empfänger berücksichtigt werden. Es wurden bereits einige Koppeltechniken [05, 07] durch 90° -Bögen von Wellenleitungsmedien vorgestellt. Jedoch ist dieses Koppelkonzept nur bedingt anwendbar und weist auch einen prozesstechnischen Aufwand auf. Im Gegensatz dazu wurde zur 90° -Strahlungsumlenkung ein Koppellement mit einer reflektierenden Oberfläche, sog. „*45°-Spiegel*“, in der Literatur [46 – 51] konzipiert und demonstriert. Jedoch sind hier die Fertigungsverfahren der

45°-Spiegel meistens für die Massenproduktion nicht geeignet: Beispielsweise werden die fertigen Wellenleiter dadurch mit dem 45°-Spiegel versehen, dass sie durch ein V-förmiges Diamantsägeblatt mit 90°-Öffnungswinkel geschnitten werden [46] oder mit Hilfe von RIE (Reactive Ion Etching) geätzt werden [50]. Weiterhin wird als Verbindungselement zwischen Sender bzw. Empfänger und Wellenleitern ein Glasfaser-Stück eingesetzt [47], an dessen Ende eine 45°-Oberfläche zur 90°-Strahlungsumlenkung durch Laser-Cutting angefertigt und anschließend poliert wird. Hierbei ist immer eine präzise, zeitaufwendige und unwirtschaftliche Nachbehandlung erforderlich.

Es ist jedoch für eine zügige Verbreitung der optischen Übertragungstechnik notwendig, kostengünstige Herstellungsverfahren für die benötigten optischen Komponenten mit einfachen Materialien zur Verfügung zu haben. Dazu gehören Massenfabrikationsverfahren wie z.B. Replikationstechniken in Kunststoffen, die einige entscheidende Vorteile gegenüber anderen Technologien und Materialien besitzen. Die Komponenten sind identisch zu Tausenden herzustellen, ohne dass die einzelne Komponente einen zeit- und technisch aufwendigen Prozess durchläuft.

Hinsichtlich der kostengünstigen Massenfertigung werden hier zwei Koppelmethoden zur Ein- und Auskopplung durch die 90°-Strahlungsumlenkung konzipiert. In Abb.1-1 sind zwei Koppelkonzepte auf Basis der 90°-Strahlungsumlenkung mit Hilfe von Koppelementen in einer elektrisch-optischen Platine schematisch dargestellt: Abb.1-1(a) zeigt das Konzept des "45°-integrierten Mikrospiegels", wobei die Wellenleiterenden angeschrägt und verspiegelt sind. Abb.1-1(b) zeigt das Konzept des "45°-Mikroprisma", wobei die Mikroprismen als separate Bauelemente eingesetzt werden.

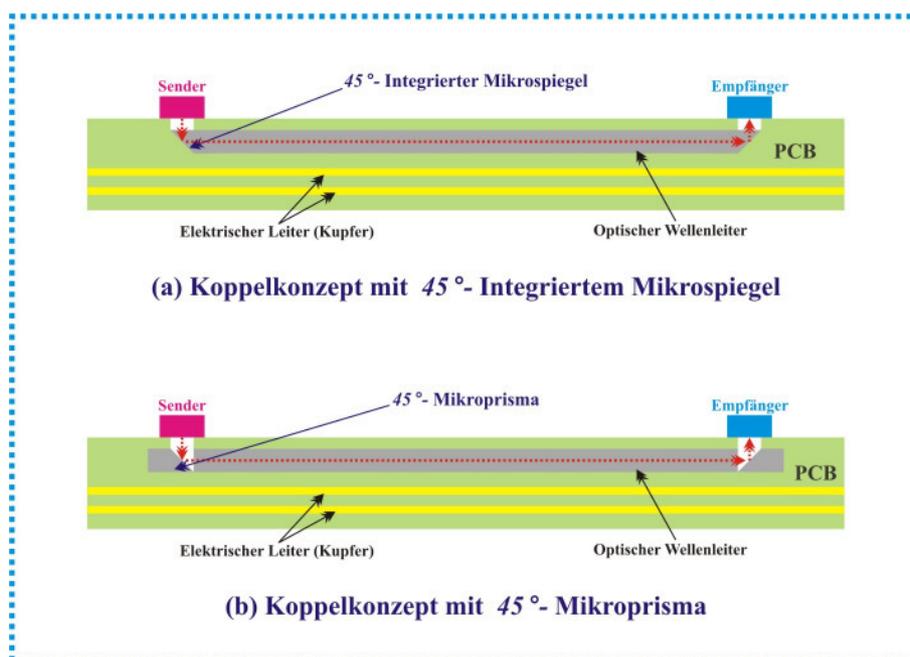


Abb.1-1 Koppelkonzepte durch 90°-Strahlungsumlenkung in einer elektrisch-optischen Platine (PCB: Printed Circuit Board)

Mittlerweile weisen abformtechnische Herstellungsverfahren von Lichtwellenleitern, die eine kostengünstige und etablierte Massenfertigung ermöglichen, eine gute Perspektive auf. Wenn ein Formeinsatz für Lichtwellenleiter mit einem Koppellement – 45°integriertem Mikrospiegel – versehen wird, dann lässt sich eine große Stückzahl von Wellenleitern mit 45°integrierten Mikrospiegeln als Koppellemente ohne zusätzliche Nachbehandlung gleichzeitig herstellen.

Demgegenüber bietet das alternative Koppelkonzept auf Basis des 45°Mikroprismas eine kostengünstige Herstellungsmöglichkeit. Durch eine separate Anfertigung des Mikroprismas, das später durch Pick-and-Place-Automaten einfach eingesetzt werden kann, vereinfacht sich die Prozessierung bei der Herstellung eines Formeinsatzes für Lichtwellenleiter.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Mikrostrukturtechniken auf Basis von Negativ-Fotoresist SU-8, welche eine kostengünstige und etablierte Massenproduktion von passiven optischen 3D-Koppelementen wie z.B. integrierten Mikrospiegeln und Mikroprismen ermöglichen. Dabei ist ein Schwerpunkt in dieser Arbeit die Entwicklung von mikrolithographischen Verfahren auf Basis des Negativ-Fotoresist SU-8.

Seit Beginn der 70er Jahre wird die optische Lithographie in der Halbleitertechnologie zur Herstellung von mikroelektronischen Bauelementen wie z.B. RAM (Random Access Memory) verwendet. Während sich die Auflösung der Struktur in der Mikroelektronik bei Schichtdicken von etwa 0.5 bis 1.0 μm in den Submikrometerbereich entwickelt, ist das Ziel in der Mikrostrukturtechnik, Strukturen herzustellen, deren Höhe von einigen Mikrometern bis hin zu einigen hundert Mikrometern oder mehr betragen.

Am Anfang der 80er Jahre wurde zur Fertigung der hochpräzisen Mikrostrukturen mit großen Strukturhöhen am Kernforschungszentrum in Karlsruhe (KfK) das LIGA-Verfahren in Abb.1-2 entwickelt [01]: **“LIGA“** beruht auf der Kombination von **L**ithographie mit **S**ynchrotronstrahlung, **G**alvanoformung und **A**bformung. Damit ist die Herstellung von Mikrostrukturen mit Strukturhöhen von mehreren hundert Mikrometern bei kleinsten lateralen Abmessungen möglich. Die Fertigungstoleranzen liegen im Mikrometerbereich.

Neben den Vorteilen – die vertikale Seitenwand und das sehr hohe Aspektverhältnis – zeigt das LIGA-Verfahren einige Nachteile: Die sehr teure Bestrahlungsquelle wie Synchrotronstrahlung und die aufwendige Maskenherstellung. Wegen solcher Nachteile kommt das LIGA-Verfahren nicht häufig oder nur strukturbedingt zum Einsatz.

Mit fortschreitender Entwicklung der Resistsysteme und der Belichtungsmethoden gewinnt die optische Lithographie in der Mikrostrukturtechnik an Bedeutung, da sie eine kostengünstige und etablierte Strukturierungsmethode darstellt. Diese weiteren Entwicklungen für die optische Lithographie ermöglichen die Realisierung von

Kapitel 1. Einleitung

Abformwerkzeugen, mit denen weitere Mikrostrukturen durch Heißpräge oder Spritzguß von thermoplastischen Kunststoffen zu erzeugen sind. Die Mikrostrukturen der Abformwerkzeuge sollten möglichst eine vertikale Seitenwand und ein hohes Aspektverhältnis aufweisen.

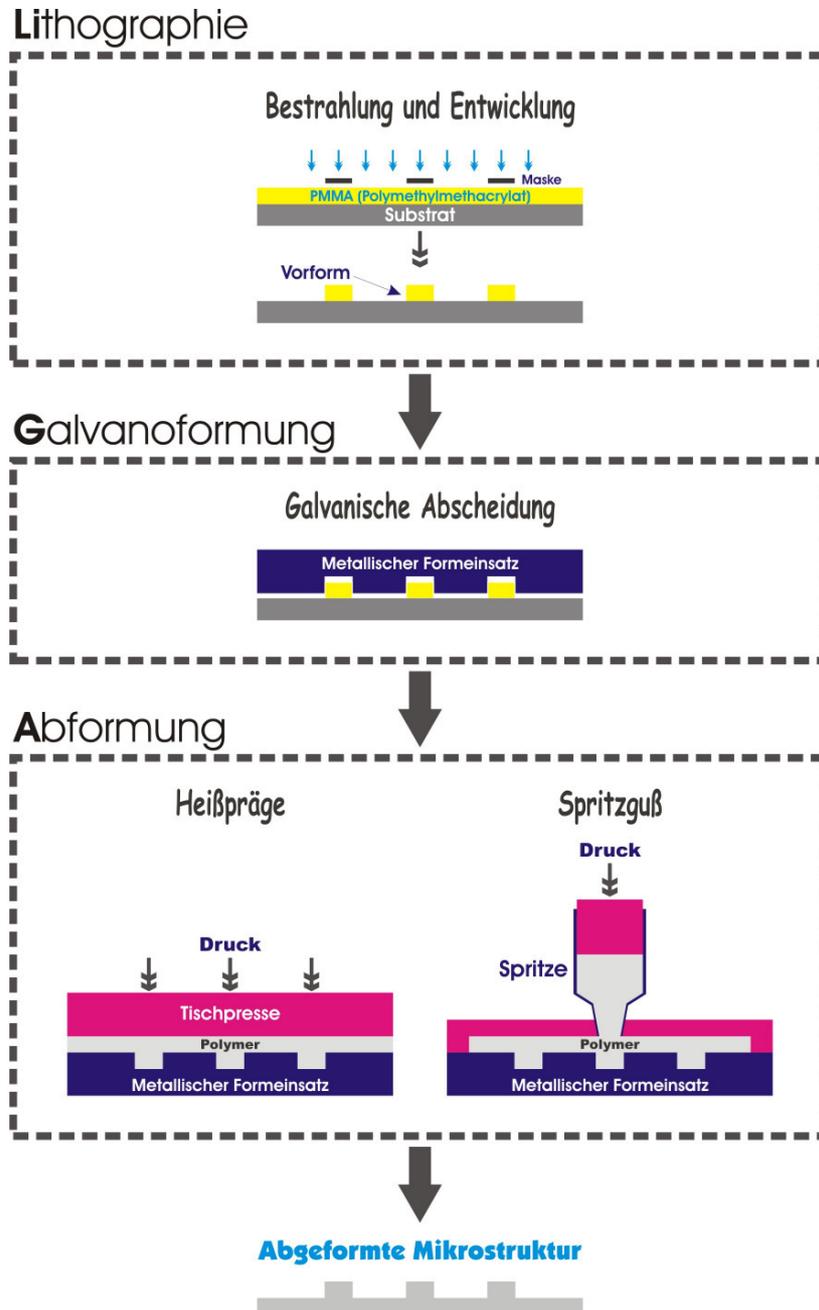


Abb.1-2 LIGA-Verfahren (Schematische Darstellung)

Gegenüber dem LIGA-Verfahren ist hier die optische Lithographie auf Basis von einem dickflüssigen Fotoresist – **Dicklacktechnik** – als eine sinnvolle kostengünstige Alternative zur Herstellung von Abformwerkzeugen für Mikrostrukturen vorstellbar. Die Dicklacktechnik wird oft **“UV-LIGA-Technik“** bezeichnet.

In den 90er Jahren erschien das neue Resistsystem – Negativ-Fotoresist **SU-8™**, das von der Firma IBM entwickelt wurde – als ein Durchbruch für Dicklacktechnik oder UV-LIGA-Technik. In diversen wissenschaftlichen Veröffentlichungen werden die potenziellen Möglichkeiten vorgestellt, die Mikrostrukturen auf Basis von SU-8 wie LIGA-Verfahren herzustellen.

Der Fotoresist SU-8 besteht aus in einem Lösungsmittel GBL (Gamma-Buthyloracton) gelöstem Epoxidharz und einem Photoiniatorsalz (Triäthylm-Sulfonium) [11], und zeichnet sich durch hohe Empfindlichkeit, hohe Transparenz und chemische Beständigkeit aus. Im Vergleich zu anderen Fotoresists weist der Resist SU-8 das relative hohe Aspektverhältnis und die bessere Oberflächenrauheit der Seitenwand auf.

Neben solchen ausgezeichneten Eigenschaften erscheinen bei der Dicklacktechnik auf Basis von SU-8 leider einige negative Aspekte: Die für Negativ-Fotoresists typische *Hinterschneidung* in Abb.1-3(a) aufgrund des Beugungseffekts an der Maskenkante und der optischen Dämpfung im Fotoresist sowie die *inkomplette Auflösung* des SU-8-Resists in Abb.1-3(b) nach der galvanischen Abscheidung. Besonders kann die Hinterschneidung bei einem späteren Prozess wie einem abformtechnischen Replikationsverfahren eine zerstörungsfreie Trennung einer erzeugten Mikrostruktur von einem Formeinsatz verhindern.

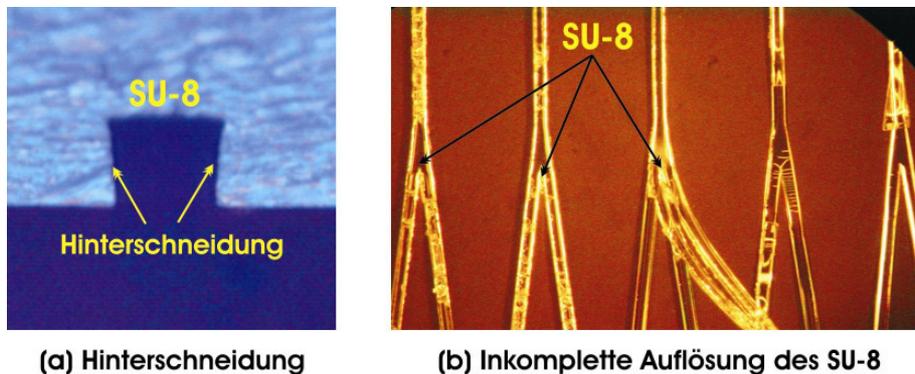


Abb.1-3 SU-8-Probleme: (a) Hinterschneidung und (b) Inkomplette Auflösung des SU-8

Zur Überwindung solcher Hindernisse werden die mikrolithographischen Verfahren auf Basis von SU-8 durch theoretische Überlegungen und experimentelle Versuche in dieser Arbeit untersucht und entwickelt, um die Möglichkeiten zur kostengünstigen Herstellung von Mikrokomponenten auf Basis von SU-8 weiter erschließen zu können.

Zur Vermeidung der Hinterschneidung werden zwei Belichtungsmethoden vorgestellt: Die *Reflexionsbelichtung* durch die Kompensierung des negativ auswirkenden Beugungseffekts mit Hilfe einer Reflexionsschicht unter dem Fotoresist und die *Laserdirektbelichtung* mit optimierter Fokussierung des Lasers.

Kapitel 1. Einleitung

Neben der optischen Lithographie ist heutzutage auch die Mikrofrästechnik als eine mechanische Mikrofertigung zur 3D-Strukturierung struktur- oder/und zielbedingt einsetzbar, da Mikrofertigungsmaschinen wie z.B. Mikrofräsmaschinen in der Lage sind, Bauteile mit Maß- und Formgenauigkeiten im Mikrometerbereich zerspanend zu bearbeiten. Zur Anfertigung einer 3D-Mikrokomponente wie z.B. eines integrierten Mikrospiegels oder eines Mikroprismas wird eine Mikrofrästechnik, die auf der Oberflächenstrukturierung eines Substrates durch Präzisionszerspanung mit *profilierten Mikrowerkzeugen* beruht, verwendet.

Schließlich werden zwei vorgestellte Koppelkonzepte durch 90°-Strahlungsumlenkung auf Basis von integrierten Mikrospiegeln (Abb.1-4) und Mikroprismen (Abb.1-5) demonstriert, welche mit Hilfe von entwickelten mikrolithographischen Verfahren realisiert werden.

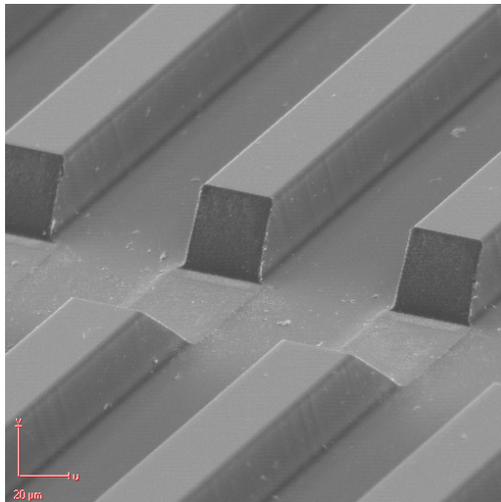


Abb.1-4 SU-8-Vorform für Multimode-Wellenleiter mit 45°-integrierten Mikrospiegeln

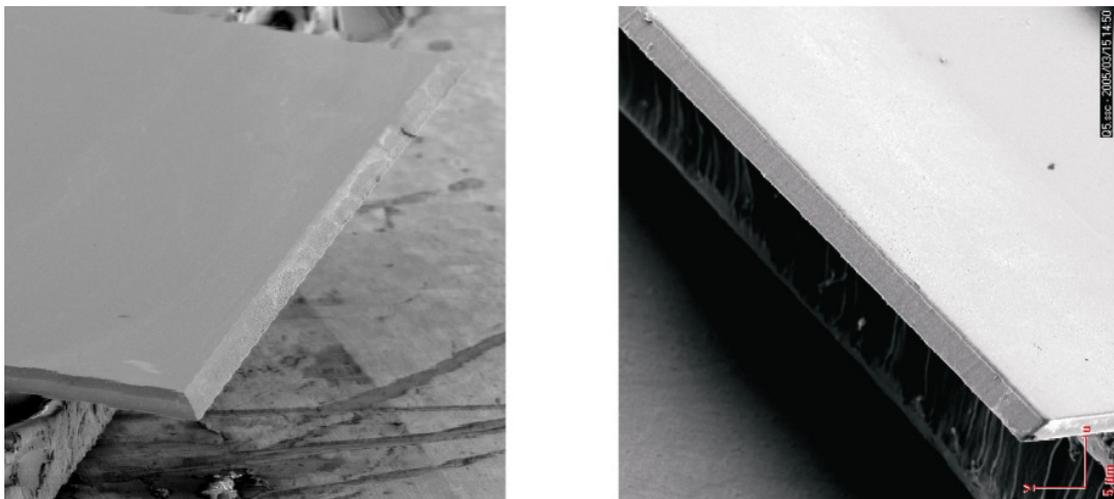


Abb.1-5 45°-Mikroprisma aus SU-8 (links: Mikrofrästechnik, rechts: optische Lithographie)

Kapitel 1. Einleitung

Im Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen der Lichtwellenleitung in optischen Komponenten und die Mechanismen der optischen Dämpfungen kurz erläutert.

Im Kapitel 3 wird zunächst auf Grundlegendes zur optischen Lithographie eingegangen. Anschließend wird ein Abschätzungsmodell zur Berechnung von belichteten Resistprofilen beschrieben. Damit werden zwei Belichtungsmethoden, die *Reflexions-* und die *Laserdirektbelichtung*, zur Vermeidung der Hinterschneidung vorgestellt.

Im Kapitel 4 wird untersucht, ob die experimentellen Ergebnisse der im Kapitel 3 berechneten Tendenz auf Basis des Abschätzungsmodells entsprechen.

Im Kapitel 5 wird auf die Anwendungen von vorgestellten mikrolithographischen Verfahren zur Realisierung der zwei Koppelkonzepte in Abb.1-1 – *45°integrierte Mikrospiegel* und *45°Mikroprisma* – eingegangen.

Schließlich fasst Kapitel 6 die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Vorhaben.

Kapitel 2

Lichtleitung in optischen Komponenten

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen beschrieben, welche ein Verständnis der Lichtleitung in optischen Komponenten ermöglichen. Dabei werden die grundlegenden Mechanismen der Lichtausbreitung mit den Prinzipien der Strahl-optik erklärt. Anschließend wird auf Dämpfungsmechanismen in optischen Komponenten eingegangen.

2.1 Optische Komponenten

Zuerst werden die Grundlagen der Lichtausbreitung in polymeren Wellenleitern kurz erläutert. Im Anschluss wird ein optisches Koppel-element, wie z.B. ein 45° -integrierter *Mikrospiegel*, beschrieben, das mit einer reflektierenden Oberfläche versehen ist.

2.1.1 Lichtausbreitung in Wellenleitern

Wenn sich Licht in einem optischen Medium mit Brechzahl n_2 ausbreitet und mit dem Einstrahlwinkel θ_e auf die Grenzfläche zu einem Medium mit Brechzahl n_1 trifft, dann wird ein Teil des Lichtes an dieser Grenzfläche mit Winkel θ_r relativ zum Einfallslot reflektiert (Abb.2-1). Für die Winkel gilt:

$$\theta_e = \theta_r$$

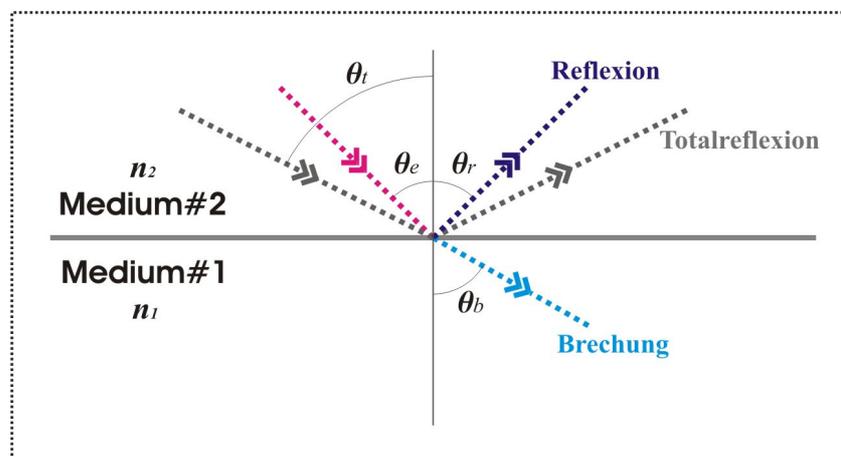


Abb.2-1 Brechung und Reflexion am Übergang von zwei optischen Medien

Kapitel 2. Lichtleitung in optischen Komponenten

Der restliche Teil des Lichtes geht in das Medium n_1 über, wobei es sich unter dem Winkel θ_b fortbewegt, der über das *Snelliussche Brechnugsgesetz*

$$n_2 \sin \theta_e = n_1 \sin \theta_b \quad (2-1)$$

zu ermitteln ist.

Für den Fall, dass $n_2 > n_1$ ist, gibt es einen Einstrahlwinkel θ_t mit

$$\sin \theta_t = \frac{n_1}{n_2}$$

für den der Reflexionsfaktor $r = 1$ wird. Bei Winkeln, die größer als dieser so genannte *Totalreflexionswinkel* θ_t sind, wird der Reflexionsfaktor komplexwertig, wobei sein Betrag gleich 1 bleibt. Das heißt, für den Winkel größer als der Totalreflexionswinkel wird die komplette Strahlung reflektiert, es tritt aber an der Grenzfläche ein Phasensprung auf.

Ein Wellenleiter besteht im einfachsten Fall aus einem Kern, der von einem Material mit niedrigerer Brechzahl umgeben ist. Das Kernmaterial hat dabei meist ein rechteckiges oder ein rundes Profil wie z.B. bei Fasern.

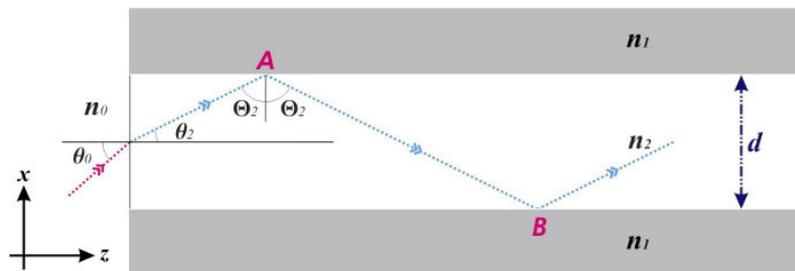


Abb.2-2 Zickzack-Reflexion in einem Filmwellenleiter

In Abb.2-2 ist der Weg eines Lichtstrahls durch einen Wellenleiter gezeigt. Es bewegt sich in einem Zickzack-Kurs, der durch wiederholte Totalreflexion an den Grenzflächen zustande kommt.

Der Wellencharakter wird nun dadurch berücksichtigt, dass jeder Lichtstrahl mit der Trajektorie der Äquiphasenflächen einer lokalen, ebenen elektromagnetischen Welle identifiziert wird. Verlustfreie Lichtausbreitung in z -Richtung ist dann gegeben, wenn sich in x -Richtung (transversal zur Ausbreitungsrichtung z) eine konstruktive Überlagerung der hin- und herlaufenden Wellen ergibt (transversale Resonanz). Konstruktive Überlagerung

bedeutet, dass die Welle nach zwei Reflexionen konstruktiv mit sich selbst interferieren muss, d.h. die Phasendrehung, welche die Welle durch zwei Reflexionen und durch das Durchlaufen der Strecke AB in Abb.2-2 erfährt, ein Vielfaches von 2π sein muss.

Aus dem Winkelintervall $0 < \theta_2 < 90^\circ$ θ_t sind dadurch nur noch diskrete Winkel erlaubt. Diese sind im Wellenbild den so genannten *Moden* zugeordnet. Die *Grundmode* entspricht einer Strahlbahn nahezu parallel zur Wellenleiterachse. Mit steigender Modenordnung steigt auch der Winkel des Strahls zur Achse bis schließlich der *Grenzwinkel* $\theta_2 = 90^\circ$ θ_t erreicht ist.

Eine charakterisierte Größe für einen Wellenleiter ist die *numerische Apertur NA*. Sie gibt den maximalen Winkel an, unter dem ein Lichtstrahl in einen Wellenleiter eingekoppelt werden kann, so dass er geführt wird. Wenn der Winkel $\Theta_2 = \theta_t$ gesetzt wird, dann lässt sich mit dem Snelliusschen Brechungsgesetz und der Totalreflexionsbedingung für NA folgender Zusammenhang ableiten:

$$NA = n_0 \sin \theta_0 = \sqrt{n_2^2 - n_1^2} \quad (2-2)$$

2.1.2 Lichtumlenkung durch reflektierende Oberfläche

Eine optische Übertragungsstrecke besteht aus einer Lichtquelle als Sender wie z.B. einer Laserdiode, einem Lichtwellenleiter und einem Empfänger wie z.B. einer Photodiode. In der in Abb.2-3 skizzierten Anordnung wird die Ein- und Auskopplung durch die 90° Strahlungsumlenkung mit Hilfe eines optischen Kopelementes (45° Mikrospiegel) dargestellt, das mit einer reflektierenden Oberfläche versehen ist.

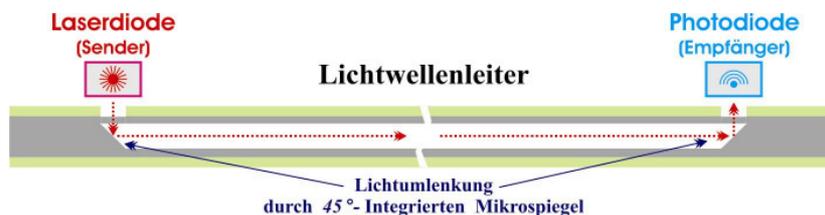


Abb.2-3 Schema einer optischen Übertragungsanordnung

Der 45° -Mikrospiegel, der das angeschrägte Ende des Lichtwellenleiters darstellt, erhält eine Reflexionsschicht, die aus einer dünnen Metallschicht besteht. Diese Metallisierung des Mikrospiegels ist immer erforderlich, da für Strahlen, die unter einem großen Winkel auf den 45° -integrierte Mikrospiegel treffen, die Bedingung der Totalreflexion nicht mehr erfüllt ist. Dies wird im Folgenden betrachtet.

Kapitel 2. Lichtleitung in optischen Komponenten

Für den Grenzwinkel θ_g (in Abb.2-4) der Totalreflexion an der Grenzschicht in einem Multimode-Wellenleiter zwischen n_2 und n_1 mit $n_2 > n_1$ gilt:

$$\theta_g = \cos^{-1} \left\langle \frac{n_1}{n_2} \right\rangle \quad (2-3)$$

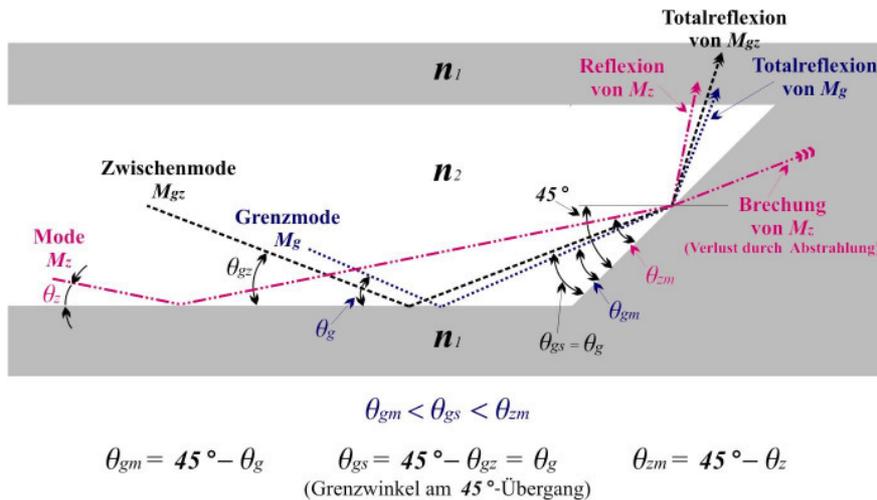


Abb.2-4 Totalreflexion an einer 45°-reflektierenden Oberfläche ohne Reflexionsschicht

Wie bereits in Abb.2-4 dargestellt, können sich die verschiedenen Moden wie z.B. Grenzmode M_g , Zwischenmode M_{gz} und Mode M_z , die unter dem Grenzwinkel θ_g liegen, durch die Totalreflexion im Wellenleiter ausbreiten.

Auf den 45°-Übergang ohne Reflexionsschicht zur 90°-Strahlungsumlenkung können jedoch nur die Moden wie z.B. M_{gz} und M_g durch die Totalreflexion weiter geleitet werden, da die Auftreffwinkel θ_{gm} und θ_{gs} für M_g und M_{gz} auf den 45°-Übergang unter dem Grenzwinkel θ_{gs} liegen. Aufgrund keiner Erfüllung der Bedingung der Totalreflexion ($\theta_{zm} > \theta_{gs}$) auf dem 45°-Übergang erfahren die Moden unter dem Winkel θ_{gz} wie z.B. M_z teils die Reflexion und teils die Brechung. Dabei werden die unter θ_{gz} liegenden Moden durch die Brechung als Verlust ins Mantelmaterial zum Teil abgestrahlt.

Aus diesem Grund muss die Oberfläche des 45°-Übergangs metallisiert werden, damit dort modenunabhängig die spiegelnde Reflexion stattfinden kann.

In Abb.2-5 ist die Reflektivität R verschiedener Metalle in Abhängigkeit der Wellenlänge gezeigt. Allerdings ist die Reflektivität von der Schichtdicke d und vom Auftreffwinkel θ (θ_{gm} , θ_{gs} und θ_{zm} in Abb.2-4) abhängig. Daher soll bei der Wahl nach einem geeigneten Metall als Reflexionsschicht von einer nicht mehr transparenten, *ausreichend dicken*

Kapitel 2. Lichtleitung in optischen Komponenten

Metallschicht ausgegangen werden.

Als eine Reflexionsschicht für die Oberfläche des 45° -Übergangs können hier verschiedene Metalle wie z.B. Silber und Gold zum Einsatz kommen. Die Wahl des Materials ist besonders von der Reflektivität R im benötigten Wellenlängenbereich von $650 - 850 \text{ nm}$ für die optische Übertragung abhängig.

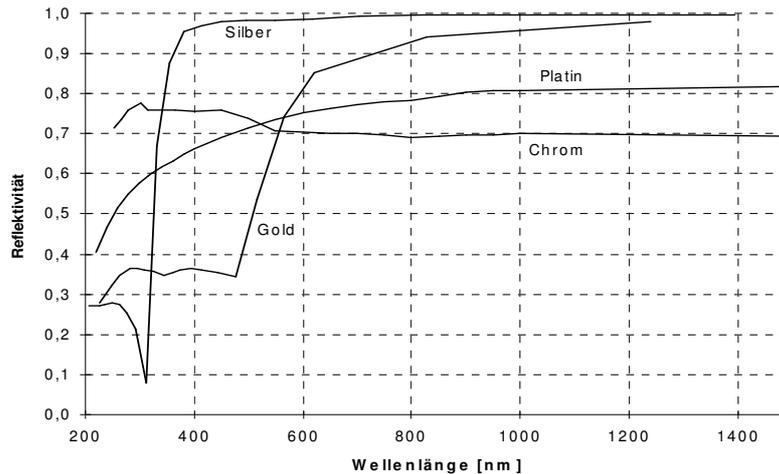


Abb.2-5 Reflektivität verschiedener Metalle [07]

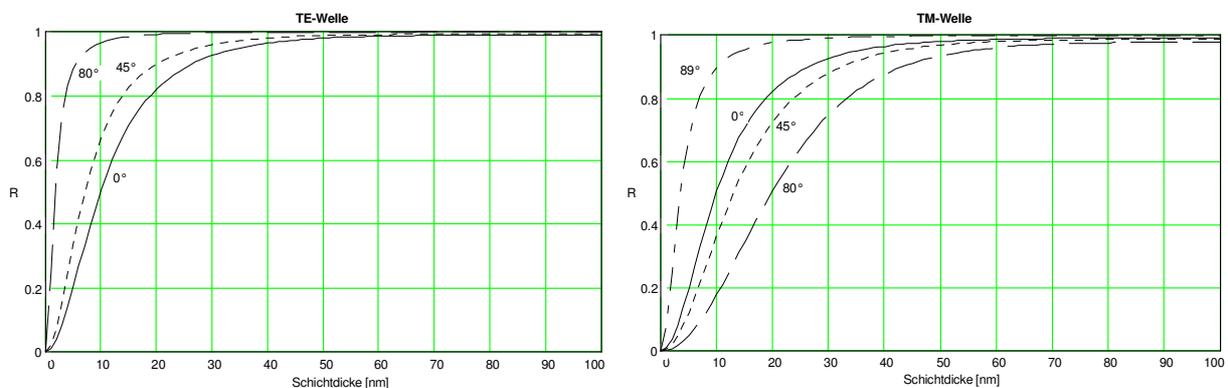


Abb.2-6 Reflektivität R in Abhängigkeit der Schichtdicke d und des Auftreffwinkels θ (Silberschicht, $\lambda = 650 \text{ nm}$) [07]

In [07] wurde Silber als eine Reflexionsschicht verwendet, da Silber eine Reflektivität von $R \approx 1.0$ für den interessanten Wellenlängenbereich bieten kann: Als Fazit kann hier festgestellt werden, dass die Schichtdicke des Silbers für eine Reflektivität R von mindestens 0.98 über 100 nm liegen sollte (Abb.2-6). Dies gilt natürlich nur für die ideal plane Oberfläche des 45° -Übergangs; bei Oberflächenrauheiten entstehen erhebliche Streuverluste als ein Dämpfungsmechanismus.

2.2 Dämpfungsmechanismen

Hier werden die Dämpfungsmechanismen in optischen Komponenten kurz beschrieben. Sie lassen sich in *materialspezifische Absorptions- und Streuverluste*, *Koppelverluste* an der Verbindungsstelle zweier optischer Komponenten und *oberflächenbedingte Streuverluste* unterteilen [07, 44, 52].

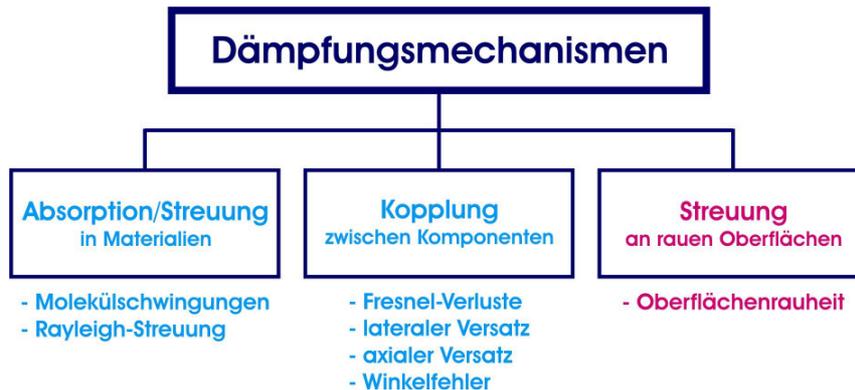


Abb.2-7 Dämpfungsmechanismen in optischen Komponenten

Die Absorption entsteht bei der Wellenausbreitung im Material durch die *Anregung von Molekülschwingungen*. Die *Rayleigh-Streuung* wird durch mikroskopische Schwankungen des Brechungsindex hervorgerufen. Die Dämpfung durch die Kopplung an der Verbindungsstelle zweier optischer Komponenten entsteht durch *lateralen und axialen Versatz*, *Fresnel-Verluste* und *Winkelfehler*. Jedoch haben die Vorformherstellungsverfahren keinen Einfluss auf diese beiden Dämpfungen. Im Gegensatz dazu werden bei optischen Komponenten, die durch Abformung hergestellt werden, die oberflächenbedingten Streuverluste von dem Verfahren der Vorformherstellung beeinflusst.

Dämpfung durch Streuung an rauen Oberflächen

Die oberflächenbedingten Streuverluste sind ein wesentlicher Dämpfungsmechanismus. Sie treten besonders an rauen Oberflächen (Rauheit) der Grenzflächen auf (Abb.2-8).



Abb.2-8 Lichtstreuung an rauen Oberflächen (Rauheit)

Kapitel 2. Lichtleitung in optischen Komponenten

Wie in Abb.2-8 gezeigt, kann eine Vielzahl von reflektierten Strahlen (gestreuten Strahlen) an rauen Oberflächen angeregt werden. Jeder reflektierte Strahl verursacht beim Auftreffen auf eine weitere Grenzfläche wiederum eine Vielzahl von gestreuten Strahlen.

Die Rauheit stellt eine Störung für die Grenzfläche dar. Die durch die oberflächenbedingte Streuung entstehende Dämpfung α_R wird in [53] angegeben als:

$$\alpha_R \propto \frac{\sigma^2}{\lambda^2} \quad (2-4)$$

Dabei steigt die Dämpfung α_R mit zunehmender *Rautiefe* σ und abnehmender Wellenlänge λ an.

Charakterisierung einer Oberfläche

In Abb.2-9 ist ein Ordnungssystem für Gestaltabweichungen [54] nach **DIN 4760** zur Erfassung des Begriffs der "*Rauheit*" einer Oberfläche gezeigt. Die unterschiedlichen Ordnungen sind auf die Entstehungsursache der Störungen zurückzuführen. Der wesentliche Unterschied zwischen den sich überlagernden Gestaltabweichungen – *Formabweichungen*, *Welligkeit* und *Rauheit*, d.h. Gestaltabweichungen 1. bis 4. Ordnung – liegt in ihrer horizontalen Merkmalsausprägung.

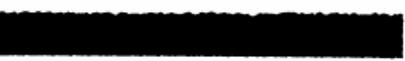
Gestaltabweichung (als Profilschnitt überhöht dargestellt)	Beispiele für die Art der Abweichung	Beispiele für die Entstehungsursache
1. Ordnung: Formabweichungen 	Geradheits-, Ebenheits-, Rundheits-Abweichung, u. a.	Fehler in den Führungen der Werkzeugmaschine, Durchbiegung der Maschine oder des Werkstückes, falsche Einspannung des Werkstückes, Härteverzug, Verschleiß
2. Ordnung: Welligkeit 	Wellen (siehe DIN 4761)	außermittige Einspannung, Form- oder Laufabweichungen eines Fräasers, Schwingungen der Werkzeugmaschine oder des Werkzeuges
3. Ordnung: Rauheit 	Rillen (siehe DIN 4761)	Form der Werkzeugschneide, Vorschub oder Zustellung des Werkzeuges
4. Ordnung: Rauheit 	Riefen Schuppen Kuppen (siehe DIN 4761)	Vorgang der Spanbildung (Reißspan, Scherspan, Aufbauschnide), Werkstoffverformung beim Strahlen, Knospenbildung bei galvanischer Behandlung
5. Ordnung: Rauheit Anmerkung: nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar	Gefügestruktur	Kristallisationsvorgänge, Veränderung der Oberfläche durch chemische Einwirkung (z. B. Beizen), Korrosionsvorgänge
6. Ordnung: Anmerkung: nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar	Gitteraufbau des Werkstoffes	

Abb.2-9 Ordnungssystem für Gestaltabweichungen [54]

Die Formabweichung ist langwellig und erstreckt sich oftmals in einem Zug über die gesamte Funktionsfläche. Der Abstand von Welle zu Welle der Welligkeit ist größer als der Abstand von Rille zu Rille der Rauheit. Die vertikale Abweichung kann sich dagegen in der gleichen Größenordnung bewegen, d.h. Formabweichungen und Rauheit können gleich groß sein. In Abb.2-10 ist beispielsweise das in der Regel gemeinsame Auftreten der Formabweichungen 1. bis 4. Ordnung gezeigt.

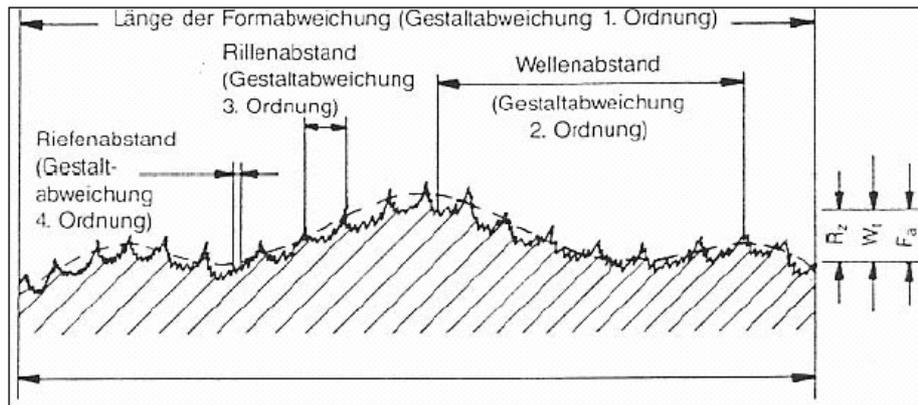


Abb.2-10 Unterscheidung der Gestaltabweichungen 1. bis 4. Ordnung [54]

Rauheitskenngrößen machen eine eindeutige Aussage über mittlere Rauheit. Da diese genormt sind, machen sie Messungen vergleichbar. Die wichtigsten Kennwerte sind R_a , R_z und R_{max} mit einer unterschiedlichen Aussagefähigkeit. Zur Aufnahme wird ein optisches Messgerät benutzt, welches das Profil $f(x)$ der Oberfläche entlang einer Strecke l bestimmt.

Arithmetischer Mittenrauwert R_a

R_a ist ein "Universalwert", der arithmetischer Mittelwert der Beträge aller Profilwerte des Rauheitsprofils ist. R_a berechnet sich nach:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx$$

Gemittelte Rautiefe R_z und Maximale Rautiefe R_{max}

Zur Bestimmung der Werte wird die Messstrecke l in fünf gleich lange Abschnitte unterteilt, welche mit dem Index $i = 1...5$ gekennzeichnet werden. Die Z_i beschreiben dann die Höhendifferenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Punkt auf dem i -ten Fünftel der Messstrecke l (Abb.2-11).

Kapitel 2. Lichtleitung in optischen Komponenten

Der R_z -Wert beschreibt den Mittelwert aus den Z_i und R_{max} die größte Höhendifferenz auf der gesamten Messstrecke l . Diese Werte sind also gut zur Erkennung von "Ausreißern" im Rauheitsprofil geeignet. R_z und R_{max} berechnen sich nach:

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Z_i$$

$$R_{max} = \max \{Z_i\}$$

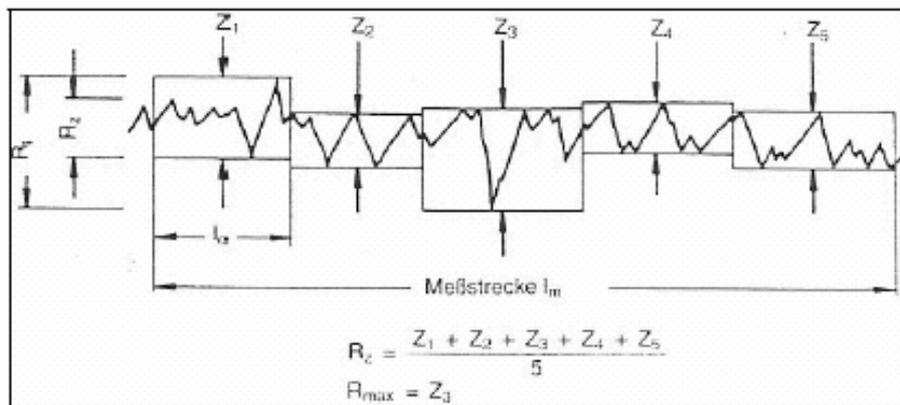


Abb.2-11 Bestimmung von R_z und R_{max} an einem Profilverlauf [54]

Quadratischer Mittenrauwert R_q

R_q liegt nach [54] etwa 25 % über dem R_a -Wert und enthält keine zusätzlichen Informationen. R_q berechnet sich nach:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l f^2(x) dx}$$

Kapitel 3

Theoretische Untersuchungen zur Dickschicht-Mikrolithographie

Dieses Kapitel befasst sich mit der optischen Lithographie in der SU-8-Dicklacktechnik, die heutzutage zur Herstellung von Mikrostrukturen oder Mikrokomponenten zum Einsatz kommen. Mit Hilfe der Lithographie auf Basis von UV-Licht (optische Lithographie) ist es möglich, die Strukturen herzustellen, deren kritische Dimensionen im Mikrometerbereich liegen.

Neben ausgezeichneten Eigenschaften zeigt der Fotoresist SU-8 ein Problem: Die für Negativ-Fotoresist typische Hinterschneidung in Abb.1-3(a). Dieses Problem tritt häufig auf, so dass sich der SU-8 nur eingeschränkt nutzen lässt. Aus diesem Grund wird zur Betrachtung der belichteten Resistprofile ein Abschätzungsmodell auf Basis der Intensitätsverteilung vorgestellt. Durch die Abschätzung mit Hilfe dieses Modells werden zwei Belichtungsmethoden, die *Reflexions-* und die *Laserdirektbelichtung*, zur Vermeidung der Hinterschneidung entwickelt. Mit Hilfe dieses Modells sind die Profile der belichteten Resistprofile nicht exakt vorherzusagen, jedoch ist eine Tendenz in Abhängigkeit von Parametern wie der Belichtungs-dosis, des Abstandes zwischen Maske und Resistoberfläche, oder des Reflexionsgrads näherungsweise zu bestimmen.

3.1 Optische Lithographie

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der optischen Lithographie beschrieben. Die optische Lithographie lässt sich in Belichtungsverfahren unterteilen: das eine ist die "*Maskenbelichtung*" durch eine Abbildung mit Hilfe einer Maske und das andere die "*Laserdirektbelichtung*", wobei der Fotoresist mittels eines UV-Lasers ohne Maske punktuell direkt belichtet wird.

Zur Herstellung von Mikrostrukturen ist die optische Lithographie der entscheidende Einzelprozess. Man spricht von einem Schlüsselprozess, da er in der Produktion von Mikrostrukturen immer wieder gebraucht wird. Bei der optischen Lithographie werden die Mikrostrukturen z.B. durch Abbildung einer Maske in den photoempfindlichen Resist (Fotoresist) erzeugt. Ein grober Ablauf der optischen Lithographie (Maskenbelichtung) ist in Abb.3-1 schematisch dargestellt.

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

Ausgangspunkt ist ein Träger (Substrat) mit ebener Oberfläche – vorzugsweise Si-Wafer oder Glas mit minimaler Rauheit – auf den im ersten Arbeitsschritt ein Fotoresist aufgebracht wird. Dies geschieht durch das so genannte Aufschleudern (Spin-Coating), was die Herstellung einer sehr homogenen Fotoresistschicht ermöglicht. Im folgenden Arbeitsschritt werden mit einer Maske bestimmte Bereiche der Resistoberfläche abgedeckt. Bei der anschließenden Belichtung des Resists mit UV-Licht werden somit nur definierte Bereiche des Resists belichtet. Diese verändern unter Einfluss des Lichtes ihre chemischen Eigenschaften – *Auflösung des Inhibitors im Positiv-Fotoresist* oder *Quervernetzungen im Negativ-Fotoresist*.

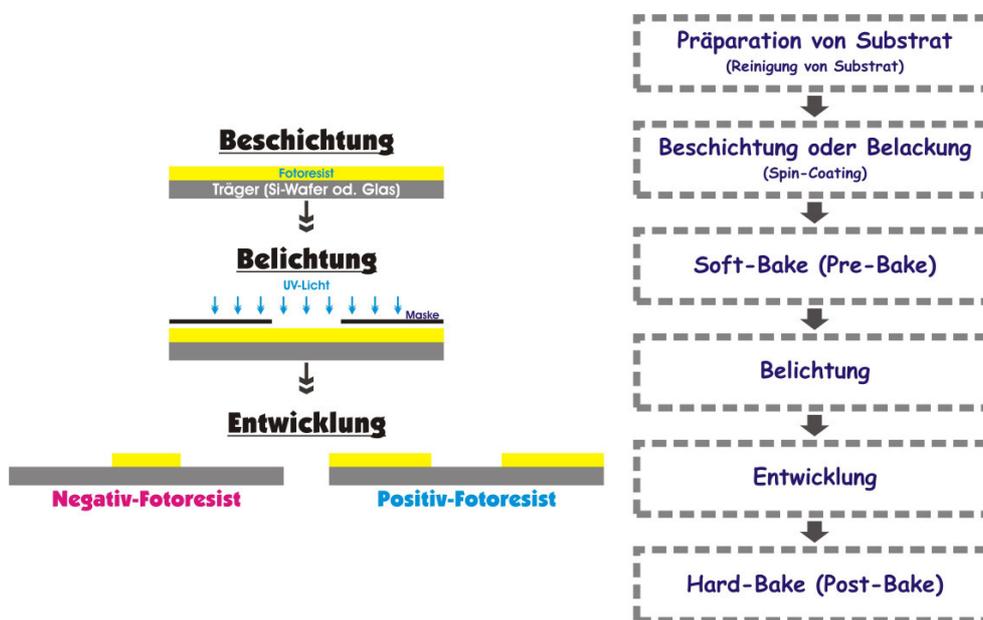


Abb.3-1 Grober Ablauf einer optischen Lithographie (Maskenbelichtung)

Es gibt Positiv- und Negativ-Fotoresist (Abb.3-1). Der Unterschied zwischen dem Positiv- und Negativ-Fotoresist liegt in dem Verhalten des Resists bei der Entwicklung. Bei dem Negativ-Fotoresist werden die Moleküle durch die Belichtung (UV-Licht) miteinander vernetzt und dadurch bei der anschließenden Entwicklung unlöslich. Dabei entsteht dann ein negatives Abbild der Maske im Resist. Bei dem Positiv-Fotoresist führt eine fotochemische Reaktion des Inhibitors zur Bildung von Säuren, die später mit Entwicklerlaugen löslich sind. Dadurch entsteht ein positives Abbild der Maske im Resist.

Bei so genannten *Negativ-Fotoresists* bleiben die belichteten Bereiche des Resists stehen, bei *Positiv-Fotoresist* werden die belichteten Bereiche herausgelöst. Auf diese Weise werden die zweidimensionalen Strukturen der Maske in ein dreidimensionales Relief im Resist übertragen, dessen Höhe durch die Dicke der Fotoresistschicht bestimmt ist.

Substrat

Ein Substrat bei der optischen Lithographie ist z.B. ein Si-Wafer oder Glas. Es ist aber auch möglich, Metalle oder Kunststoffe zu verwenden. Das Substratmaterial muss derartig gewählt werden, dass es nicht durch die Lithographiechemikalien gelöst werden kann. Es muss außerdem eine gute Haftung des Fotoresists gewährleisten.

Fotoresist

Der Fotoresist wird verwendet, um die gewünschten Strukturen auf das Substrat zu übertragen. Es wird durch verschiedene Methoden wie z.B. Spin-Coating auf das Substrat aufgebracht und durch spezifische Temperung (Soft-Bake) gehärtet. Durch die Bestrahlung mit UV-Licht ist es möglich, den Fotoresist zu belichten. Dadurch werden die gewünschten Strukturen bei entsprechender Maskierung in den Fotoresist übertragen. An heutige Fotoresists wird eine Vielzahl von Anforderungen gestellt. Dazu gehören z.B. ein hohes Auflösungsvermögen, große Lichtempfindlichkeit, gute Haftung, große Widerstandsfähigkeit beim Ätzen und gute Entfernbareit nach den Prozessschritten. Außerdem muss der Resist frei von Verunreinigungen sein, um Fehler bei der Beschichtung oder Belichtung zu vermeiden. Daher ist für hochauflösende Photolithographie ein Reinraum unerlässlich.

Belackung (Beschichtung)

Die Belackung dient dazu, das vorbehandelte Substrat mit einer gleichmäßigen Fotoresistschicht zu überziehen. Es gibt unterschiedliche Methoden der Belackung. Die gebräuchlichste Methode ist das sogenannte „Spin-Coating“, das Aufschleudern des Fotoresists auf einer Resistschleuder (Spin-Coater). Durch Spin-Coating, die sich durch einfache Handhabung und gute Homogenität der Schichtdicke auszeichnet, erfolgt das Aufbringen des Fotoresistschicht auf den Wafer. Der zähflüssige Fotoresist wird auf den Wafer aufgegossen, der sich während des Schleudervorgangs aufgrund der Fliehkraft verteilt. Die erwünschte Schichtdicke ist von der Umdrehungszahl (Umdrehungsgeschwindigkeit), der Umdrehungszeit, und der Viskosität des Fotoresists abhängig. In Abb.3-2 ist die Oberfläche eines mit dem Fotoresist SU-8-50 beschichteten Wafers exemplarisch dargestellt, wobei die Schichtdicke ca. $70.0 \mu\text{m}$ beträgt. Wie in Abb.3-2(a) gezeigt, besitzt die belackte Oberfläche (3D-Profil) in der Mitte vom Wafer eine kleine Welligkeit in radialer Richtung. Diese Welligkeit schwankt zwischen ca. $\pm 2.0 \mu\text{m}$ (2D-Profil, Linie). In Abb.3-2(b) ist das 3D-Profil der Randwulst, die am Randbereich des belackten Wafers nach Spin-Coating entsteht, exemplarisch gezeigt. Wie schon erwähnt, ist diese Randwulst von der Schichtdicke abhängig. Hier liegt die Randwulst etwa $20.0 - 30.0 \mu\text{m}$ höher als die Resistoberfläche.

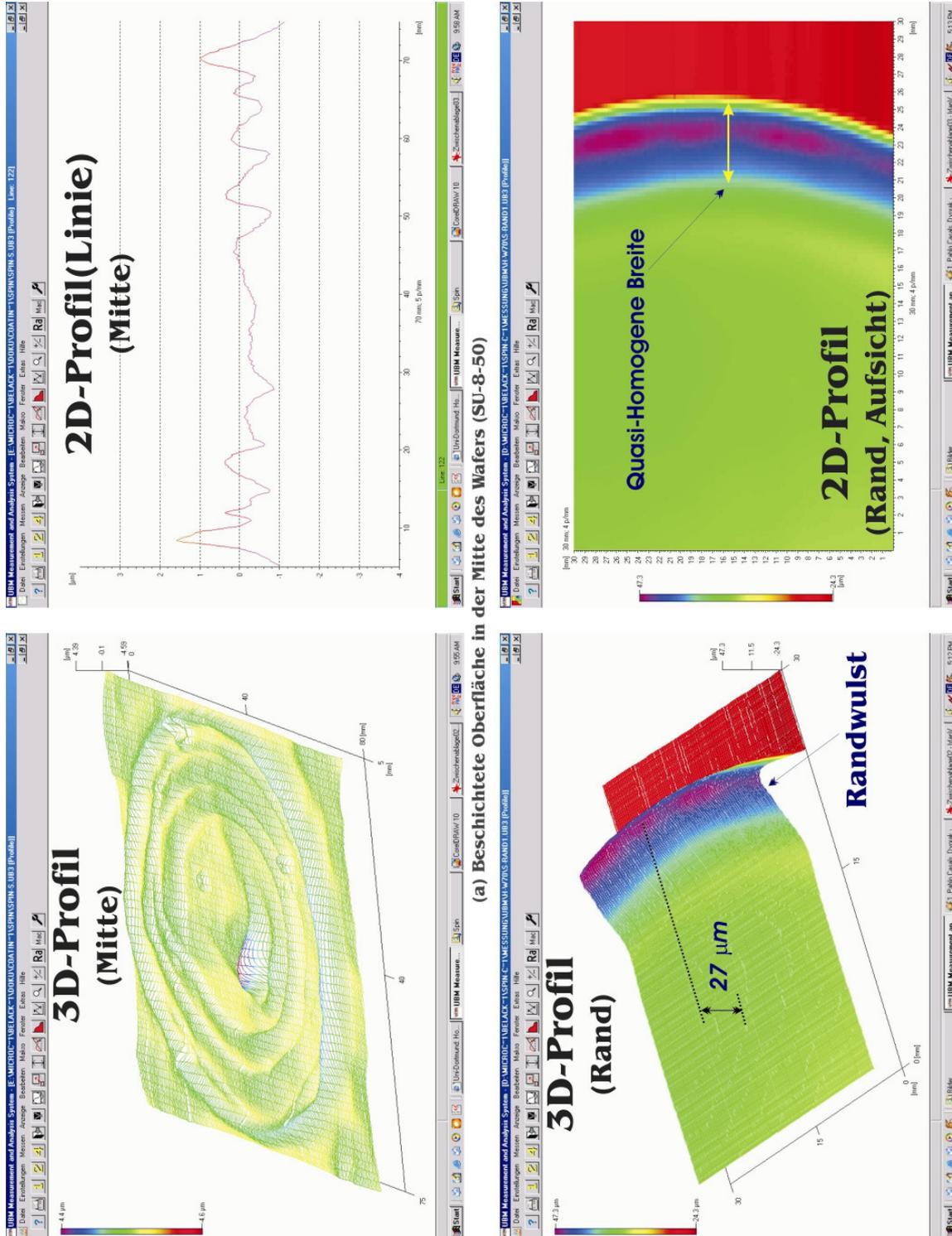


Abb.3-2 Beschichteter Wafer mit SU-8-50 durch Spin-Coating

Belichtung

Die Aufgabe der Belichtung ist die Übertragung der gewünschten Strukturen von der Maske in den strahlungsempfindlichen Fotoresist auf dem Substrat. Einzelheiten zum Belichtungsprozess werden im folgenden Abschnitt (Kapitel 3.2) erläutert.

Temperung (Soft- und Hard-Bake)

Um das belackte Substrat weiterverarbeiten zu können, ist es erforderlich, die Struktur des Fotoresists zu verändern. Dies geschieht durch Temperaturprozesse, auch Bake genannt. Es gibt mehrere Bakes, die jeweils eine unterschiedliche Aufgabe haben. Diese können in einem Ofen oder auf einer Hot-Plate erfolgen.

Das *Soft-Bake (Pre-Bake)* erfolgt direkt nach der Belackung. Durch dieses Bake findet ein physikalischer Umwandlungsprozess des Fotoresist statt. Die zuvor flüssige Resistschicht geht in eine feste Resistschicht über. Dabei verbleibt ein Rest Lösungsmittel im Resist. Die Menge des verbleibenden Lösungsmittels beeinflusst die Löslichkeit des später belichteten Fotoresists. Durch eine geeignete Wahl der Temperatur und der Dauer erreicht man die optimale Löslichkeit bei der späteren Entwicklung. Das *Hard-Bake (Post-Bake)* erfolgt nach der Entwicklung. Es soll der Fotoresist vor dem folgenden Prozess wie z.B. Ätzen stabilisieren. Dieser Prozess sollte kurz vor dem Ätzen durchgeführt werden. Der Nachteil bei diesem Bake ist, dass Kanten teils abgerundet werden oder Strukturen verschwimmen können. Je höher die Temperatur eingestellt wird, desto größer ist die Gefahr des Abrundens. Bei der dicken Fotoresistschicht steigt die Problematik des Verschimmens. Daher muss je nach Fotoresist und benötigter Auflösung abgewogen werden, ob dieses Hard-Bake durchgeführt werden muss oder ausgelassen werden kann.

Entwicklung

Nach der Belichtung muss der Fotoresist entwickelt werden. Dies sollte bei einer konstanten Raumtemperatur von $20 - 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ geschehen, um die besten Ergebnisse zu erreichen. Das Kritische bei der Entwicklung ist die Entwicklungsdauer. Zu kurze Zeiten führen dazu, dass das Fotoresist stellenweise nicht durchentwickelt ist. Demgegenüber findet bei zu langen Zeiten eine Überentwicklung statt.

Für die Entwicklung gibt es zwei Möglichkeiten; die Sprüh- und die Tauchentwicklung. Außerdem sollte der Entwickler regelmäßig nach wenigen Entwicklungen ausgetauscht werden, da sich sonst die Entwicklungszeit wegen der Reinheit des abgenutzten Entwicklers stark erhöht und somit die ermittelten Parameter nicht mehr anwendbar sind.

3.2 Maskenbelichtung

Durch die Belichtung werden die Absorberstrukturen der Maske auf die Resistoberfläche und anschließend in die Tiefe des Fotoresists übertragen.

Die Abbildungsgenauigkeit der lateralen Abmessungen sowohl auf der Oberfläche als auch in der Tiefe des Fotoresists wird durch den *Beugungseffekt – Fresnel-Beugung* – des Lichts um so mehr beeinflusst [08, 10, 12], je größer die Schichtdicke ist. Um die photoaktiven Komponenten mit dem Licht in eine Reaktion zu bringen, ist eine bestimmte Energie notwendig, wodurch die Löslichkeit des Fotoresists verändert wird. Der Resist muss transparent genug sein, damit das Licht die gesamte Schichtdicke des Fotoresists durchdringen kann.

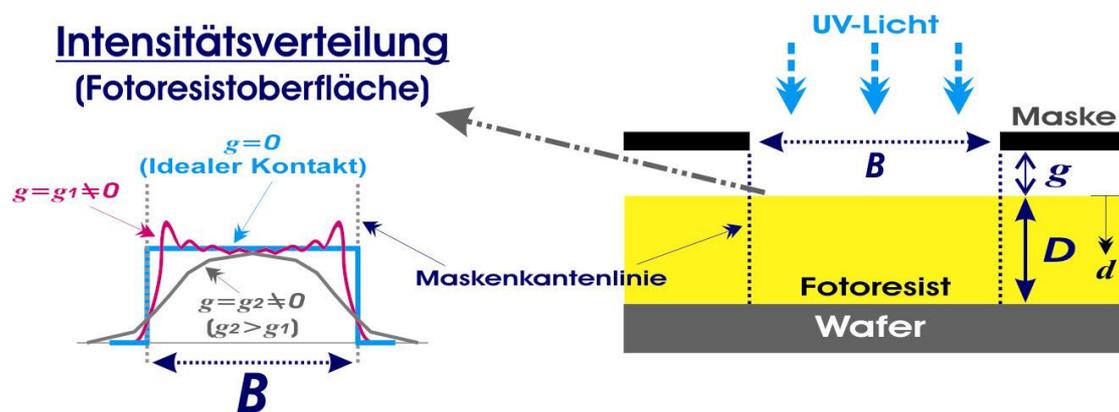


Abb.3-3 Intensitätsverteilung auf der Resistoberfläche in Abhängigkeit von g

In Abb.3-3 ist die Intensitätsverteilung [08, 43] auf der Resistoberfläche in Abhängigkeit von dem Abstand g zwischen der Maske und der Resistoberfläche schematisch dargestellt. Mit steigendem Abstand g breitet sich die Intensitätsverteilung in die lateralen Richtungen – unter die Maske bzw. Überschreitung der Maskenkantenlinie – aus. Außerdem kann die Intensitätsverteilung auch von anderen Faktoren wie z.B. verwendete Belichtungsanlage und Wellenlänge beeinflusst werden. Im Realfall jedoch ist ein idealer Kontakt ($g = 0$) nicht machbar, da der belackte Wafer eine Welligkeit (Abb.3-2(a)) aufweist oder/und unerwünschte Partikel zwischen der Maske und der Resistoberfläche nicht vermeidbar sind.

Während des Belichtungsvorgangs ist die *Dämpfung* [08, 12] der Intensität längs der Tiefe bei einer dicken Resistenschicht neben dem Beugungseffekt noch ein entscheidender Faktor: Im Idealfall soll die Intensität über die gesamte Schichtdicke gleichmäßig sein. Im Realfall herrscht jedoch wegen der Dämpfung eine abfallende Intensität, die von dem Resistensystem abhängt.

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

Im Folgenden wird ein Abschätzungsmodell vorgestellt, womit das Profil der belichteten Resiststruktur *näherungsweise* zu bestimmen ist: Dieses Modell basiert auf dem "Aerial Image Threshold Model" [55, 56, 57, 65], durch welches sich das belichtete Profil einer dünnen Fotoresistschicht auf Basis der Intensitätsverteilung näherungsweise einfach und schnell abschätzen lässt. Wenn das "Threshold Model" für den dicken Fotoresist wie z.B. SU-8 modifiziert wird, dann kann damit ein erzeugtes Resistprofil näherungsweise beschrieben werden.

In Abb.3-4 ist eine Intensitätsverteilung bei einer beliebigen Tiefe d im durch eine Maske belichteten Resist schematisch dargestellt. Hierbei wird zur Abgrenzung zwischen einer *Reaktionszone* und einer *Nicht-Reaktionszone* im Fotoresist eine *Kriteriumslinie* oder ein *Kriteriumsfaktor* k eingeführt. Hier bedeutet die Reaktion *Vernetzung* beim Negativ-Fotoresist und *Auflösung des Inhibitors* beim Positiv-Fotoresist.

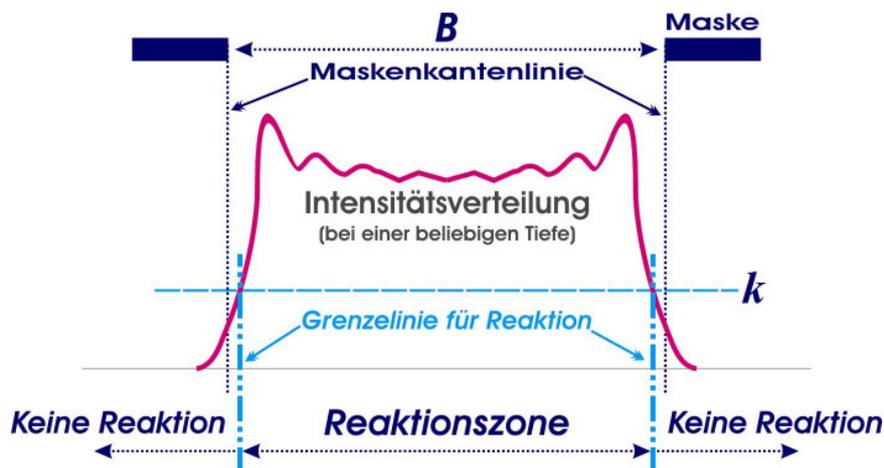


Abb.3-4 Reaktionszone und Nicht-Reaktionszone in Abhängigkeit von k

Mit Hilfe der Kriteriumslinie k kann die Abgrenzung – Reaktionszone und Nicht-Reaktionszone – bei einer beliebigen Tiefe im belichteten Fotoresist möglich sein; in der Zone, deren Intensitätsverteilung oberhalb von k liegt, findet die Reaktion statt und keine Reaktion in der unterhalb von k liegenden Zone. Dadurch kann die Breite der Reaktionszone bestimmt werden. Jedoch kann diese Breite wegen tiefenbedingter unterschiedlicher Intensitätsverteilung über die gesamte Schichtdicke nicht gleichmäßig sein. Auf diese Weise – auf Basis dieser tiefenbedingten unterschiedlichen Breiten – kann das Profil der belichteten Resiststruktur näherungsweise abgeschätzt werden.

Tiefenbedingt ändert sich die Intensitätsverteilung im dicken Fotoresist aufgrund der Beugung und der Dämpfung: Die laterale Ausbreitung der Intensitätsverteilung aufgrund der Beugung und die abfallende Intensitätsstärke aufgrund der Dämpfung [08, 10, 12, 43].

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

In Abb.3-5 ist die Erscheinung der schrägen Seitenwand auf Basis der tiefenbedingten unterschiedlichen Breite der Reaktionszone schematisch dargestellt, wobei der Wert von k unabhängig von der Tiefe d als konstant angenommen wird. Für einen Positiv-Fotoresist wird der belichtete Bereich, d.h. die *Reaktionszone*, bei der Entwicklung abgelöst, so dass die schräge Seitenwand erscheint (Abb.3-5 unten rechts). Im Gegensatz dazu entsteht bei einem Negativ-Fotoresist nach der Entwicklung ein unerwünschter Effekt – *Hinterschneidung*.

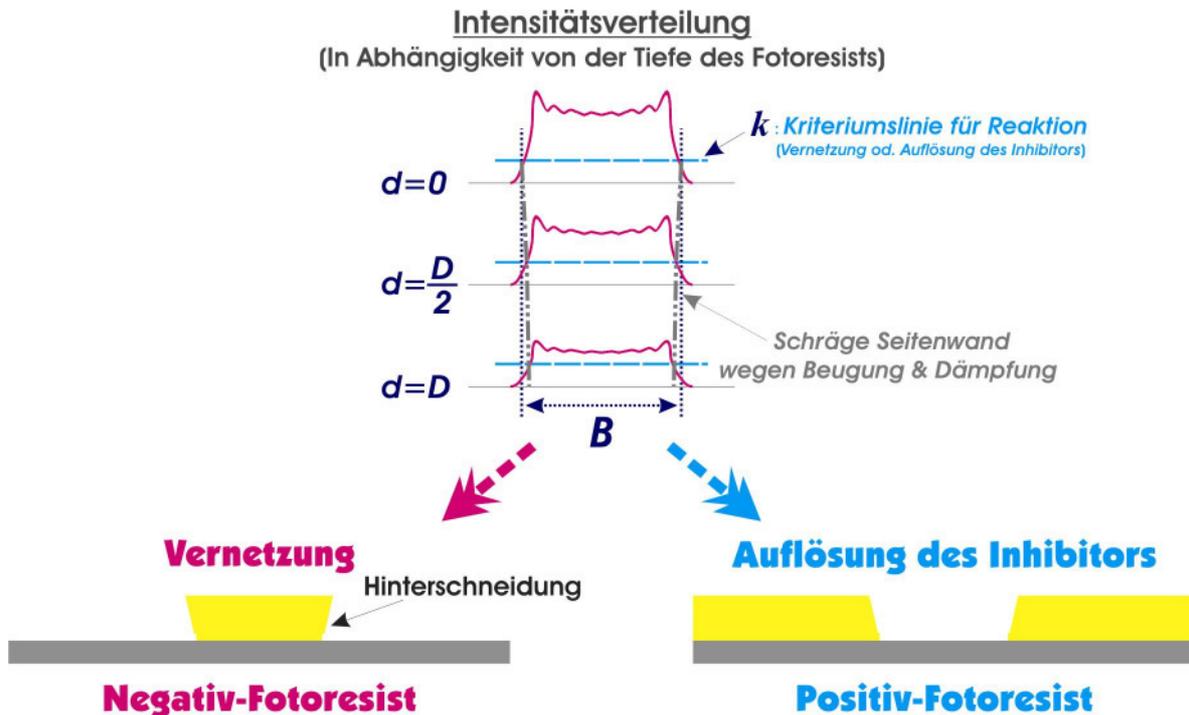


Abb.3-5 Erscheinung der schrägen Seitenwand bei Negativ- bzw. Positiv-Fotoresist

Die Kriteriumslinie k bezieht sich auf eine Energie, die für den Belichtungsvorgang eingeführt wird. Die eingesetzte Energie (Intensität $I_0 \times$ Belichtungszeit t_e) kann für die Reaktion nicht vollständig genutzt werden, sondern geht teils durch *Verlustmechanismen* wie z.B. Reflexionen an der Resistoberfläche und unnützliche Intensitätsverteilung unter der Maske aufgrund der Beugung über die gesamte Schichtdicke verloren.

Um die Reaktion auslösen zu können, ist eine *reaktive Energie* E_R nötig. Die *reaktive Energie* E_R muss bis zur Waferoberfläche ($d = D$, in Abb.3-5) gewährleistet sein, so dass die Reaktion über die gesamte Schichtdicke stattfinden kann. E_R ist abhängig von Resistsystemen. Dann ist bei einer Schichtdicke D eines Fotoresist ein Zusammenhang zwischen k , I_0 und t_e herzuleiten. Dieser Zusammenhang ist wie folgt zu definieren:

$$E_R = k T_m I_0 t_e \quad (3-1)$$

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

Dabei ist k der dimensionslose Kriteriumsfaktor oder die Kriteriumslinie und liegt zwischen $0 < k < 1$. T_m ist die Transmission der Maske, I_0 die Intensität von einer Belichtungsanlage und t_e die Belichtungszeit.

Wenn die *reaktive Energie* E_R als eine Konstante materialbedingt angenommen wird, dann ist die Gleichung Gl.3-1 wie folgt umzuformen:

$$k = \frac{E_R}{I_{oi} t_e} \quad \text{mit } I_{oi} = T_m I_0 \quad (3-2)$$

Dabei kann die Intensität I_{oi} als eine Konstante betrachtet werden, da die Intensität I_0 generell einen fixierten Wert beträgt, der von einer Belichtungsanlage abhängig ist. Dann kann der Kriteriumsfaktor k nur allein durch die Belichtungszeit t_e kontrolliert werden; bei einer langen Belichtungszeit wird k kleiner, bei einer kurzen Belichtungszeit k größer. Das Profil der belichteten Resiststruktur ist allein durch die Belichtungszeit t_e zu bestimmen.

3.2.1 Intensitätsverteilung ohne Reflexion des Substrates

Das Phänomen der Beugung des Lichtes und damit des Abfalls der Intensität längs der Tiefe des Resists ist unausweichlich. Im Folgenden wird die durch Belichtung tiefenbedingte Intensitätsverteilung durch ein mathematisches Modell beschrieben, das auf der Fresnel-Beugung und der Dämpfung im Fotoresist beruht.

In Abb.3-6 ist eine Konfiguration der Maskenbelichtung schematisch dargestellt, um zuerst die Intensitätsverteilung auf Basis der Fresnel-Beugung an der Maskenkante zu betrachten.

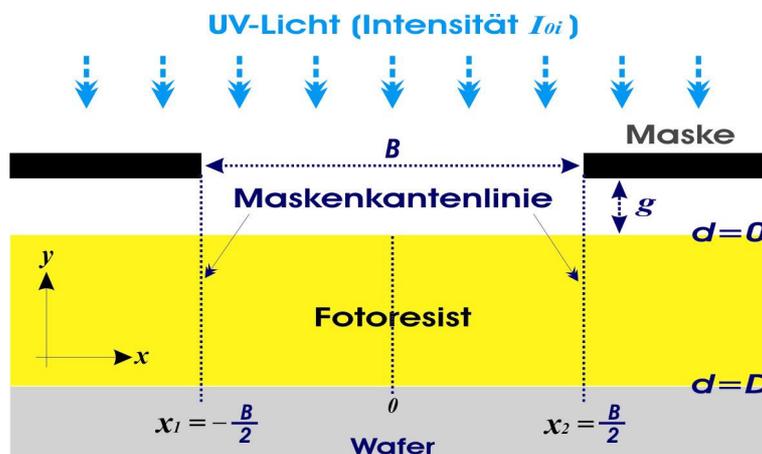


Abb.3-6 Schematische Darstellung einer Maskenbelichtung

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

Die horizontale Intensitätsverteilung $I_i(x, d)$ auf Basis der Fresnel-Beugung am schmalen und langen Spalt kann wie folgt beschrieben werden [02, 03, 08]:

$$I_i(x, d) = \frac{I_{oi}}{2} \left\{ [C(u_2) - C(u_1)]^2 + [S(u_2) - S(u_1)]^2 \right\} \quad (3-3)$$

Dabei ist I_{oi} die Intensität des einfallenden UV-Lichtes und $C(u)$ und $S(u)$ die *Fresnel-Integrale* und sind wie folgt definiert:

$$C(u) = \int_0^u \cos\left(\frac{\pi}{2} w^2\right) dw \quad (3-4)$$

$$S(u) = \int_0^u \sin\left(\frac{\pi}{2} w^2\right) dw \quad (3-5)$$

Hierbei ist u die *Fresnel-Nummer*, wie folgt gegeben:

$$u_1 = x_1 \sqrt{\frac{2}{\lambda(g+d)}} \quad (3-6)$$

$$u_2 = x_2 \sqrt{\frac{2}{\lambda(g+d)}} \quad (3-7)$$

Dabei sind x_1 und x_2 jeweils der horizontale Abstand von der Mitte des Spaltes bis zur Maskenkantenlinie in negative und positive Richtung, g ist der Abstand zwischen der Maske und der Resistoberfläche, d ist der vertikale Abstand (die Tiefe) von der Resistoberfläche bis zur Waferoberfläche und λ ist die Wellenlänge des einfallenden UV-Lichtes.

In Abb.3-7 sind gemäß Gl.3-3 die normierten Intensitätsverteilungen $I_{iN}(x, d) = I_i(x, d)/I_{oi}$ auf der Resistoberfläche ($d = 0 \mu m$) in Abhängigkeit von g ($4 \mu m$, $50 \mu m$ und $200 \mu m$) gezeigt, wobei die Wellenlänge λ $365 nm$ ist und die Öffnungsbreite B $70 \mu m$ beträgt: Mit dem steigenden Abstand g ist die laterale Ausbreitung der Intensitätsverteilung unter die Maske deutlich erkennbar wie schon erwähnt.

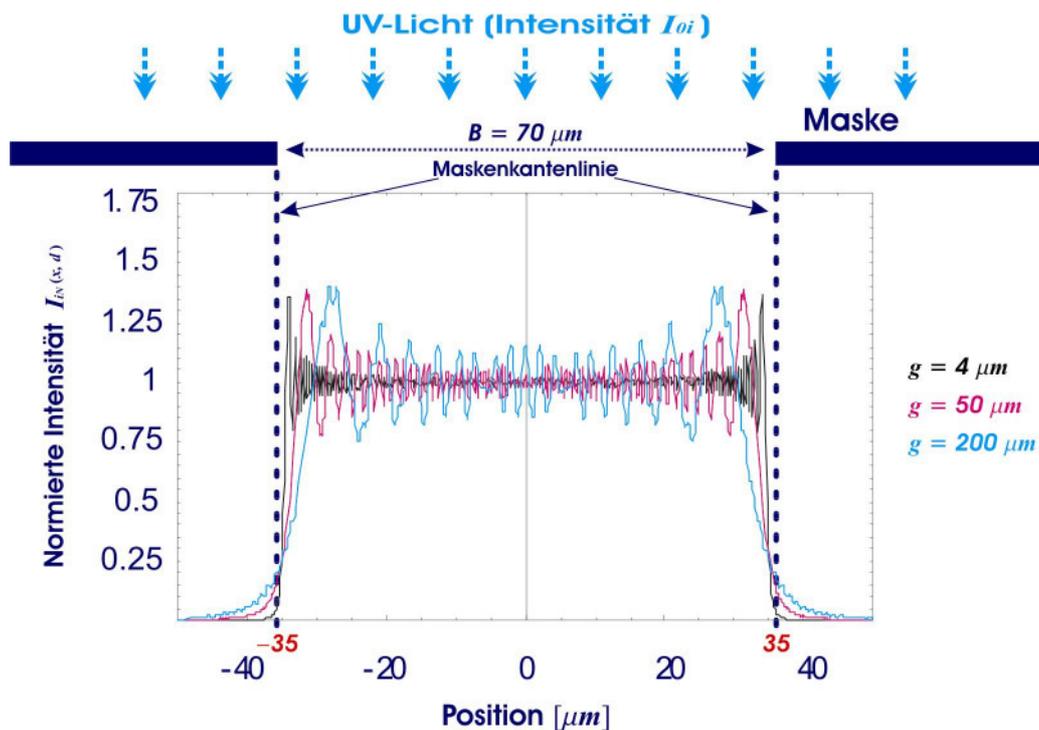


Abb.3-7 $I_{iN}(x, d)$ in Abhängigkeit von g bei $d = 0 \mu m$ (Resistoberfläche)

Neben dem Beugungseffekt spielt auch die Dämpfung (Transmission) noch eine wichtige Rolle für die Intensitätsverteilung in Abhängigkeit der Tiefe d bei einem konstanten Abstand g . In [08] wurde die Transmission von SU-8 in Abhängigkeit von Schichtdicken durch Experimente untersucht; das Ergebnis ist in Abb.3-8 gezeigt, und die mathematische Formulierung ist dann durch

$$\alpha(d) = 1 - 0.0655376833 \cdot d^{0.4033291104} \quad (3-8)$$

gegeben, wobei d der Abstand (die Tiefe) von der Resistoberfläche in μm ist.

Dann ist die Intensitätsverteilung $I_i(x, d)$ bei einem konstanten Abstand g in Bezug auf Gleichungen Gl.3-3 (Beugungseffekt) und Gl.3-8 (Transmission) wie folgt umzuschreiben:

$$I_i(x, d) = \alpha(d) \frac{I_{oi}}{2} \left\{ [C(u_2) - C(u_1)]^2 + [S(u_2) - S(u_1)]^2 \right\} \quad (3-9)$$

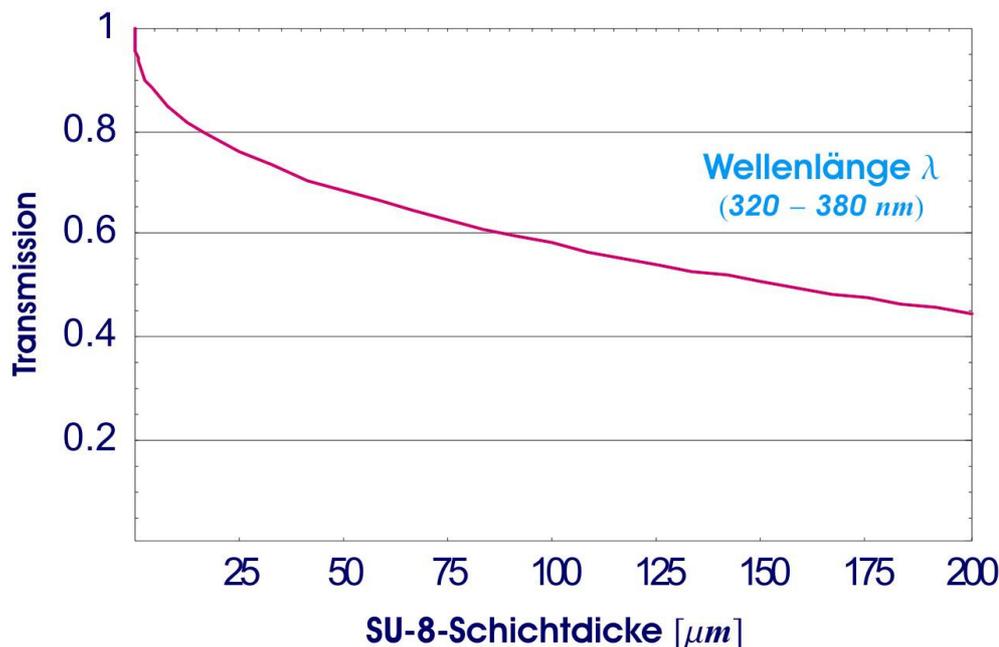


Abb.3-8 Transmission ($\lambda = 320 - 380 \text{ nm}$) von SU-8 in Abhängigkeit von Schichtdicken [08]

In Abb.3-9 sind gemäß Gl.3-9 die normierten Intensitätsverteilungen $I_{iN}(x, d) = I_i(x, d)/I_{0i}$ bei $g = 4 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit der Tiefe d von der Resistoberfläche (Tiefe $D = 70 \mu\text{m}$) dargestellt, wobei die Wellenlänge λ 365 nm ist und die Öffnungsbreite B $70 \mu\text{m}$ beträgt. Mit der steigenden Tiefe d sind sowohl die abfallende Intensität aufgrund der Dämpfung und auch die laterale Ausbreitung wegen der Beugung sicher erkennbar.

Wie schon in Abb.3-9 gezeigt, wird die Kriteriumslinie k – hier beispielsweise $k = 0.2$ angenommen – auf jede normierte Intensitätsverteilung $I_{iN}(x, d)$ eingetragen, um auf Basis von k das Profil der belichteten Resiststruktur näherungsweise bestimmen zu können. Jede Tiefe hat eine eigene Breite für die Reaktionszone wie W_{00} bei $d = 0 \mu\text{m}$ in Abb.3-9(a). Wenn diese Breite W längs der Tiefe verbindet wird, kann das Profil in Abhängigkeit von k – oder der Belichtungszeit t_e – abgeschätzt werden.

In Abb.3-10 sind alle (acht Bilder in Abb.3-9) normierten Intensitätsverteilungen $I_{iN}(x, d)$ übereinander gelegt, um sie besser miteinander zu vergleichen. In Abb.3-10(unten) ist auch eine Vergrößerung von $I_{iN}(x, d)$ im näheren Bereich der Maskenkantenlinie dargestellt; das Profil der belichteten Resiststruktur kann wegen der symmetrischen Verteilung von $I_{iN}(x, d)$ durch die Betrachtung einer Kantenseite abgeschätzt und von $I_{iN}(x, d)$ in diesem Bereich beeinflusst werden.

Einfallende Intensität in Abhängigkeit von d

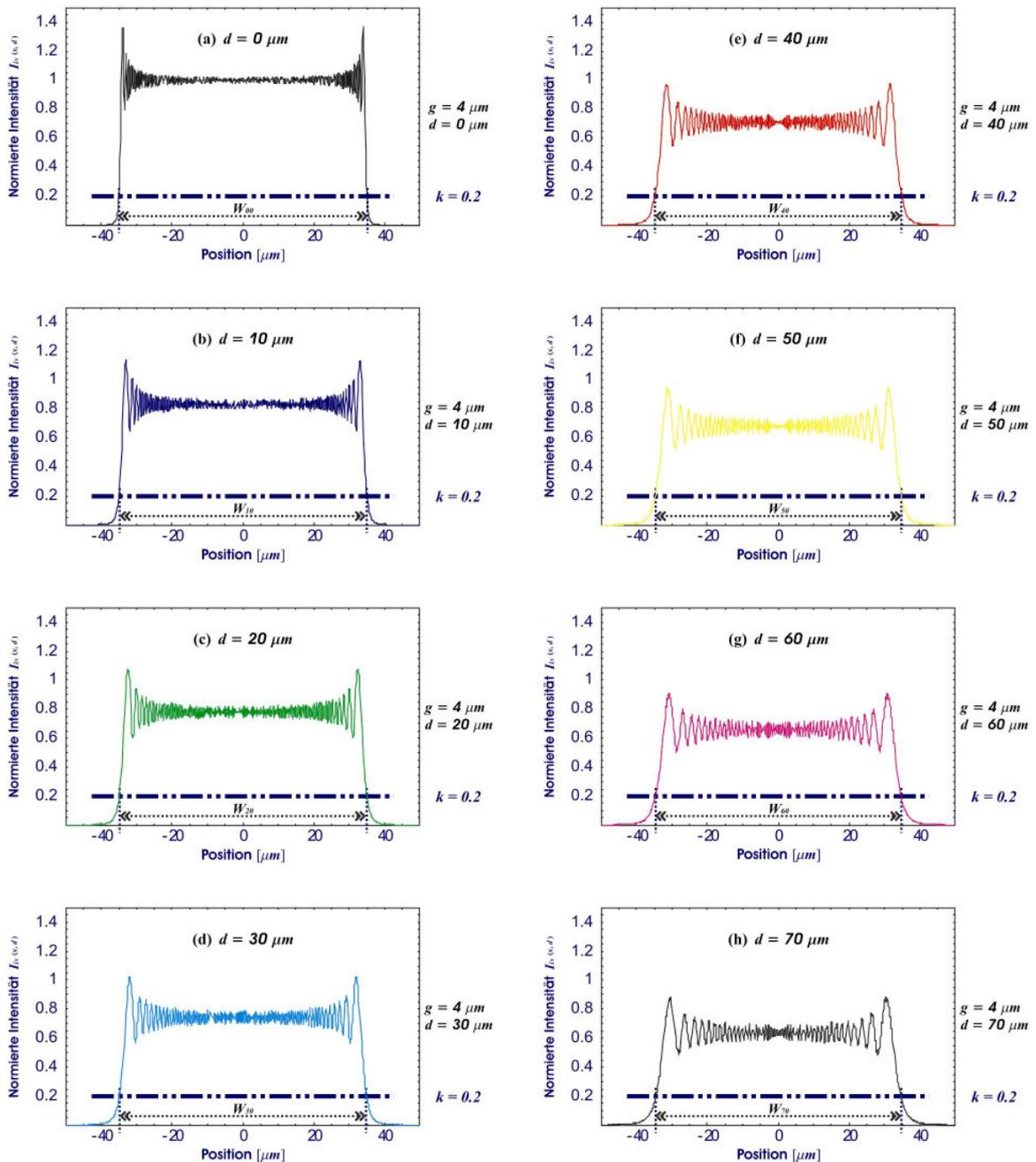


Abb.3-9 Einfallende $I_{IN}(x, d)$ in Abhängigkeit von d bei $g = 4 \mu\text{m}$

Wenn eine Kriteriumslinie k bezüglich $I_{IN}(x, d)$ in Abb.3-10(unten) eingetragen wird, sind die Werte der Position in Abhängigkeit von d der Abszisse ablesbar: Bei $k = 0.2$ ist die Differenz zwischen dem Wert bei $d = 0 \mu\text{m}$ und dem bei $d = 70 \mu\text{m}$ (etwa $0.5 \mu\text{m}$) kleiner als die Differenz bei $k = 0.5$ (etwa $2.0 \mu\text{m}$), d.h., das Profil bei $k = 0.2$ neigt zu einer geringere Hinterschneidung als das bei $k = 0.5$.

Wie bereits erwähnt, bezieht sich k auf eine genutzte Energie für die Reaktion, d.h., bei

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

einem kleinen k (einer langen Belichtungszeit t_e) wird eine große Menge der eingesetzten Energie genutzt (z.B. *Überdosis*) und bei einem großen k (einer kurzen t_e) eine geringe Menge (z.B. *Unterdosis*).

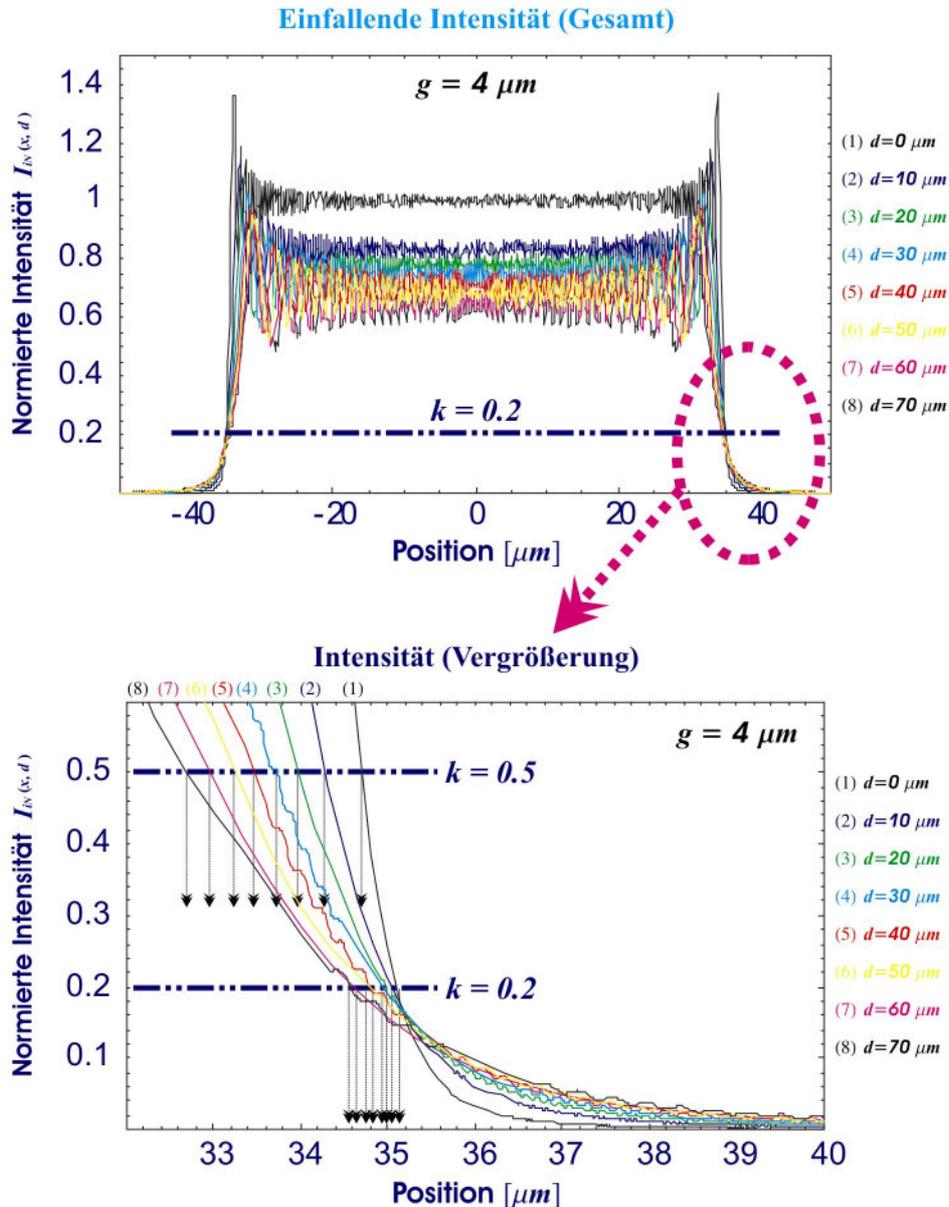


Abb.3-10 Abschätzung des Profils auf Basis von einfallender $I_{iN}(x, d)$

Auf diese Weise sind in Abb.3-11 die berechneten Profile in Abhängigkeit von k bei $g = 4 \mu\text{m}$ dargestellt. Mit steigendem k (hier ab $k = 0.2$) bei einer konstanten Intensität I_{0i} neigt das abgeschätzte Profil zu der stärker werdenden Hinterschneidung. Im Gegensatz dazu weist es ab unter $k = 0.1$ keine Hinterschneidung auf, jedoch ist hier die Verbreiterung der belichteten Resiststruktur durch die Belichtung unter die Maske erkennbar, wobei die Maskenkantenlinie in der Position von $35 \mu\text{m}$ liegt.

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

In Abb.3-12 sind auch die berechneten Profile in Abhängigkeit von g (Abstand zwischen Maske und Resistoberfläche) bei $k = 0.2$ exemplarisch dargestellt. Es ist zu erwarten, dass mit steigendem Abstand g die Hinterschneidung durch die laterale Ausbreitung und den Abfall der Intensität stärker wird.

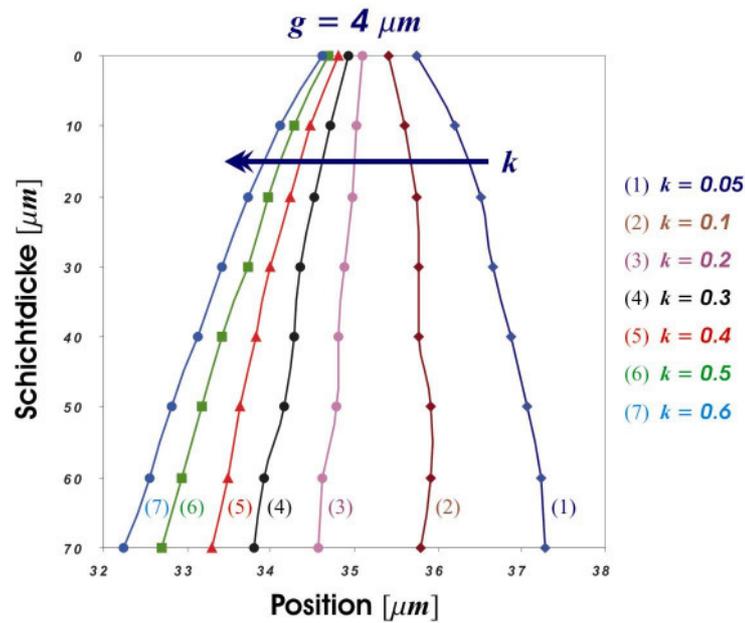


Abb.3-11 Berechnete Profile in Abhängigkeit von k (Kriteriumsfaktor) bei $g = 4 \mu\text{m}$

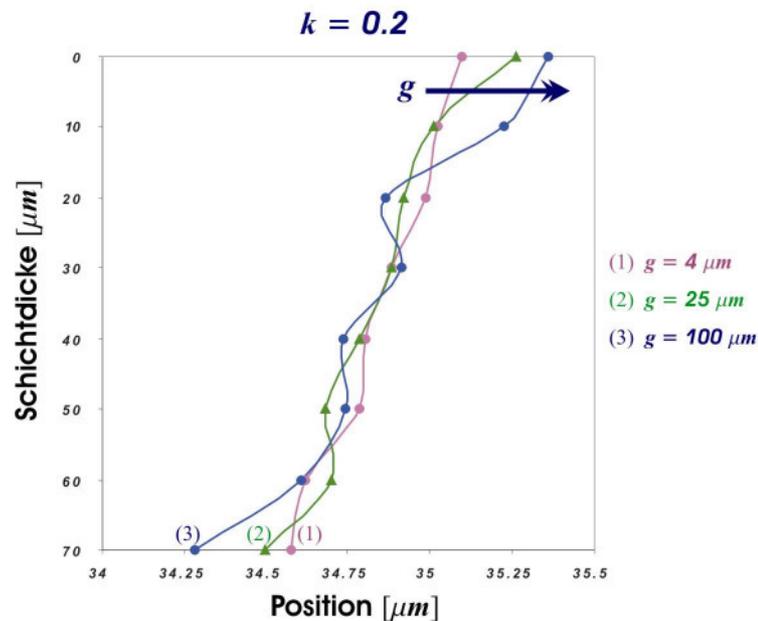


Abb.3-12 Berechnete Profile in Abhängigkeit von g (Abstand zwischen Maske und Oberfläche) bei $k = 0.2$

3.2.2 Intensitätsverteilung mit Reflexion vom Substrat

Im vorherigen Abschnitt wird die Änderung des Profils nur durch die Betrachtung der einfallenden Intensitätsverteilung $I_i(x, d)$ ohne Berücksichtigung der Reflexion an der Waferoberfläche (Resist-Unterseite) dargestellt. Hier wird die *interferierende Intensitätsverteilung* $I(x, d)$ auf Basis der einfallenden $I_i(x, d)$ und der reflektierenden $I_r(x, d)$ zur Abschätzung des Profils betrachtet.

Das Licht hat als elektromagnetische Erscheinung vektoriellen Charakter, denn elektrische und magnetische Felder sind Vektorfelder. Das Verständnis dieser Tatsache ist für ein intuitives Begreifen der Interferenz sehr wichtig. In vielen Situationen sind optische Systeme so aufgebaut, dass die Vektornatur des Lichtes nur von geringer Bedeutung ist [02]. In Übereinstimmung mit dem Superpositionsprinzip ist die elektrische Feldstärke \mathbf{E} an einem Punkt im Raum gegeben durch die einzelnen Komponenten $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_3, \dots$ verschiedener beitragender Quellen.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 + \dots$$

Die optische Schwingung oder das Lichtfeld \mathbf{E} variiert über der Zeit mit einer extrem großen Frequenz ($\sim 10^{15}$ Hz), was die Feldstärke selbst zu einer für die direkte Messung ungeeigneten Größe macht. Beim Licht können wegen der hohen Frequenzen, denen weder das Auge noch Instrumente folgen können, nur die Intensitäten I gemessen werden, d.h. die Zeitmittelwerte der auf eine Flächeneinheit treffenden Lichtleistungen.

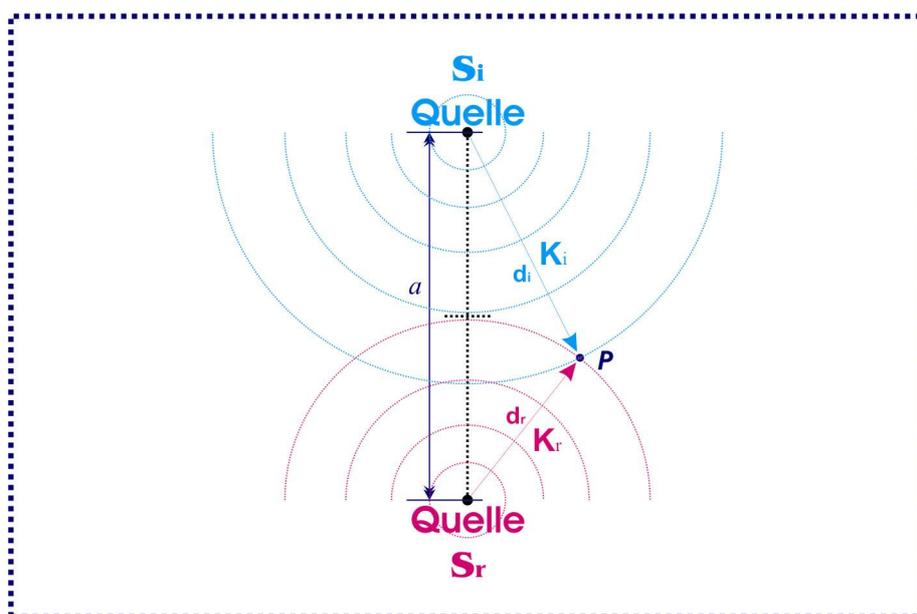


Abb.3-13 Interferenz zweier Wellenzüge

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

Aus Gründen der Einfachheit soll zunächst die Interferenzerscheinung betrachtet werden, die bei der Überlagerung zweier Lichtwellen entsteht, die von zwei punktförmigen Quellen S_i und S_r ausgehen, wie in Abb.3-13 dargestellt. Die beiden Quellen sollen monochromatische Wellen derselben Frequenz in einem homogenen Medium ausstrahlen. Die elektrischen Feldstärken \mathbf{E}_i , \mathbf{E}_r der Wellen sollen gleich polarisiert sein. Ferner wird der Abstand a als groß gegen die Wellenlänge λ angenommen. Für die Feldstärken im Beobachtungspunkt P gilt dann [02, 04]:

$$\mathbf{E}_i(d_i, t) = \mathbf{E}_{0i} \cos(\mathbf{K}_i \cdot \mathbf{d}_i - \omega t + \delta_i) \quad (3-10)$$

$$\mathbf{E}_r(d_r, t) = \mathbf{E}_{0r} \cos(\mathbf{K}_r \cdot \mathbf{d}_r - \omega t + \delta_r) \quad (3-11)$$

Dabei bedeuten \mathbf{E}_{0i} und \mathbf{E}_{0r} die beiden Amplituden, \mathbf{K}_i und \mathbf{K}_r die beiden Wellenvektoren, \mathbf{d}_i und \mathbf{d}_r die beiden Ortsvektoren und δ_i und δ_r die Phasenkonstanten.

Im Beobachtungspunkt P kann durch Addition der Einzelfeldstärken – gemäß Superpositionsprinzips – die Gesamtfeldstärke \mathbf{E} gewonnen werden:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_i + \mathbf{E}_r$$

Die Intensität I ist der zeitliche Mittelwert des Quadrats der elektrischen Feldstärke, wobei der zeitliche Mittelwert einer Funktion $f(t)$ in einem Intervall T gegeben ist durch [02]

$$\langle f(t) \rangle_T = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(\tau) d\tau \quad (3-12)$$

Damit ist die Intensität I im Beobachtungspunkt P gegeben durch

$$I = \langle \mathbf{E}^2 \rangle_T = \langle \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \rangle_T$$

nun mit

$$\mathbf{E}^2 = \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} = (\mathbf{E}_i + \mathbf{E}_r) \cdot (\mathbf{E}_i + \mathbf{E}_r)$$

und daher

$$\mathbf{E}^2 = \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} = \mathbf{E}_i^2 + \mathbf{E}_r^2 + 2\mathbf{E}_i \cdot \mathbf{E}_r \quad (3-13)$$

Wird der zeitliche Mittelwert von beiden Seiten gebildet, so ergibt sich für die Intensität I

$$I = I_i + I_r + I_{ir} \quad (3-14)$$

wobei

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

$$I_i = \langle \mathbf{E}_i^2 \rangle_T \quad (3-15)$$

$$I_r = \langle \mathbf{E}_r^2 \rangle_T \quad (3-16)$$

und

$$I_{ir} = 2\langle \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{E}_r \rangle_T \quad (3-17)$$

ist. Der letzte Ausdruck wird als *Interferenzterm* bezeichnet. Um diesen auszuwerten, bildet man

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{E}_r &= \mathbf{E}_{0i} \cdot \mathbf{E}_{0r} [\cos(\mathbf{K}_i \cdot \mathbf{d}_i + \delta_i) \cos \omega t + \sin(\mathbf{K}_i \cdot \mathbf{d}_i + \delta_i) \sin \omega t] \\ &\times [\cos(\mathbf{K}_r \cdot \mathbf{d}_r + \delta_r) \cos \omega t + \sin(\mathbf{K}_r \cdot \mathbf{d}_r + \delta_r) \sin \omega t] \end{aligned} \quad (3-18)$$

In Gl.3-12 beträgt die Periode v der harmonischen Funktion $2\pi/\omega$, und hier $T \gg v$. Der Koeffizient $1/T$ vor dem Integral hat dann den dominierenden Effekt. Ausmultiplizieren und Mittelung von Gl.3-18 liefert

$$\langle \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{E}_r \rangle_T = \frac{1}{2} \mathbf{E}_{0i} \cdot \mathbf{E}_{0r} \cos(\mathbf{K}_i \cdot \mathbf{d}_i + \delta_i - \mathbf{K}_r \cdot \mathbf{d}_r - \delta_r)$$

wobei $\langle \cos^2 \omega t \rangle_T = 1/2$, $\langle \sin^2 \omega t \rangle_T = 1/2$ und $\langle \cos \omega t \sin \omega t \rangle_T = 0$ ist. Der Interferenzterm wird dann zu

$$I_{ir} = \mathbf{E}_{0i} \cdot \mathbf{E}_{0r} \cos \phi \quad (3-19)$$

mit $\phi = (\mathbf{K}_i \cdot \mathbf{d}_i + \delta_i - \mathbf{K}_r \cdot \mathbf{d}_r - \delta_r)$ als *Phasendifferenz*, die sich aus der kombinierten Weglänge und dem Anfangsunterschied der Phasenwinkel ergibt.

Im allgemeinen ist \mathbf{E}_{0i} parallel zu \mathbf{E}_{0r} [02]. Unter diesen Bedingungen ist dann die Intensität des Interferenzterms I_{ir} in der skalaren Behandlung gegeben durch

$$I_{ir} = E_{0i} E_{0r} \cos \phi$$

Etwas zweckmäßiger lässt sich dieser Ausdruck formulieren, wenn berücksichtigt wird, dass

$$I_i = \langle \mathbf{E}_i^2 \rangle_T = \frac{1}{2} E_{0i}^2 \quad \text{und} \quad I_r = \langle \mathbf{E}_r^2 \rangle_T = \frac{1}{2} E_{0r}^2$$

sind. Der Interferenzterm wird dann zu

$$I_{ir} = 2\sqrt{I_i I_r} \cos \phi$$

und für die Gesamtintensität im Beobachtungspunkt P ergibt sich

$$I = I_i + I_r + 2\sqrt{I_i I_r} \cos \phi \quad (3-20)$$

In verschiedenen Punkten des Raumes kann die Intensität I in Abhängigkeit vom Wert von I_{ir} (also in Abhängigkeit von ϕ) größer, kleiner oder gleich $I_i + I_r$ sein. Die Gleichung Gl.3-20 gilt gleichfalls für *Kugelwellen*, die von S_i und S_r emittiert werden [02].

Ist der Abstand a zwischen beiden Quellen S_i und S_r im Vergleich zu der Wellenlänge λ groß, dann hat die Kosinusfunktion $\cos \phi$ – die Intensität des Interferenzterms I_{ir} – sehr viele Maxima und Minima, die einander über einem großen Raumbereich zu 0 ausmitteln [02]. Damit ist die Gesamtintensität I im Beobachtungspunkt P näherungsweise wiederum wie folgt umzuformulieren:

$$I \cong I_i + I_r \quad (3-21)$$

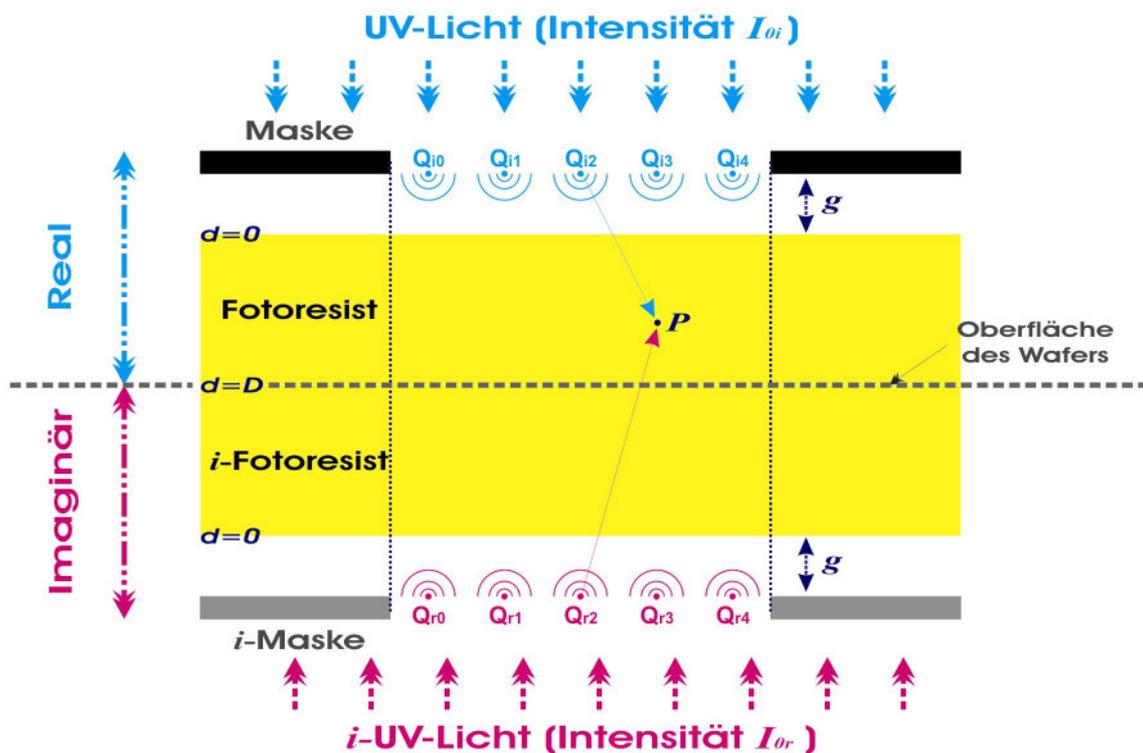


Abb.3-14 Schematische Darstellung einer Maskenbelichtung mit zwei Quellen

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

Um die interferierende Intensitätsverteilung $I(x, d)$ auf Basis der einfallenden Intensität und der reflektierenden zu beschreiben, wird zweckmäßig durch die Spiegelung in Bezug auf die Waferoberfläche eine Belichtungsanordnung mit zwei Masken und zwei Quellen eingeführt, wie in Abb.3-14 schematisch dargestellt: **UV-Licht** mit I_{oi} (einfallende Intensität), das von oben nach unten emittiert wird, ist eine reale Quelle von einer Belichtungsanlage, und **i-UV-Licht** mit I_{or} (reflektierende Intensität), das von unten nach oben emittiert wird, ist eine gespiegelte und imaginäre Quelle.

Wie schon in Abb.3-14 dargestellt, kann gemäß *Fresnel-Huygens-Prinzip* [02, 05] die zu der Maskenöffnung gelangten Wellenfront von der primären Quelle (UV-Licht oder i-UV-Licht) als Quellen für sekundäre Elementarkugelwellen z.B. \mathbf{Q}_{i0} und \mathbf{Q}_{r0} betrachtet werden.

Wenn der Abstand $2(D + g)$ zwischen beiden Quellen wie z.B. \mathbf{Q}_{i2} und \mathbf{Q}_{r2} in Abb.3-14 größer als die verwendete Wellenlänge λ ist, dann gilt für die Gesamtintensität I im Punkt P innerhalb des Resists die Gleichung Gl.3-21, d.h. die Interferenz zwischen \mathbf{Q}_{i2} und \mathbf{Q}_{r2} oder UV-Licht und i-UV-Licht könnte kaum stattfinden. Hierbei muss jedoch nur die *Interferenz* zwischen $\mathbf{Q}_{i0}, \mathbf{Q}_{i1}, \mathbf{Q}_{i2}, \mathbf{Q}_{i3}$ und \mathbf{Q}_{i4} bzw. zwischen $\mathbf{Q}_{r0}, \mathbf{Q}_{r1}, \mathbf{Q}_{r2}, \mathbf{Q}_{r3}$ und \mathbf{Q}_{r4} berücksichtigt werden.

Auf diese Weise kann die horizontale Intensitätsverteilung mathematisch beschrieben werden. Diese Beschreibung entspricht also der horizontalen Intensitätsverteilung auf Basis der Fresnel-Beugung in Gl.3-3, da zwischen Interferenz und Beugung kein prinzipieller physikalischer Unterschied besteht [02]. Damit kann dann unter Berücksichtigung der Dämpfung Gl.3-8 im Resist die horizontale Intensitätsverteilung $I(x, d)$ in Abb.3-14 wie folgt beschrieben werden:

$$I(x, d) \cong I_i(x, d) + I_r(x, d) \quad (3-22)$$

wobei

$$I_i(x, d) = \alpha(d) \frac{I_{oi}}{2} \left\{ [C(u_2) - C(u_1)]^2 + [S(u_2) - S(u_1)]^2 \right\} \quad (3-23)$$

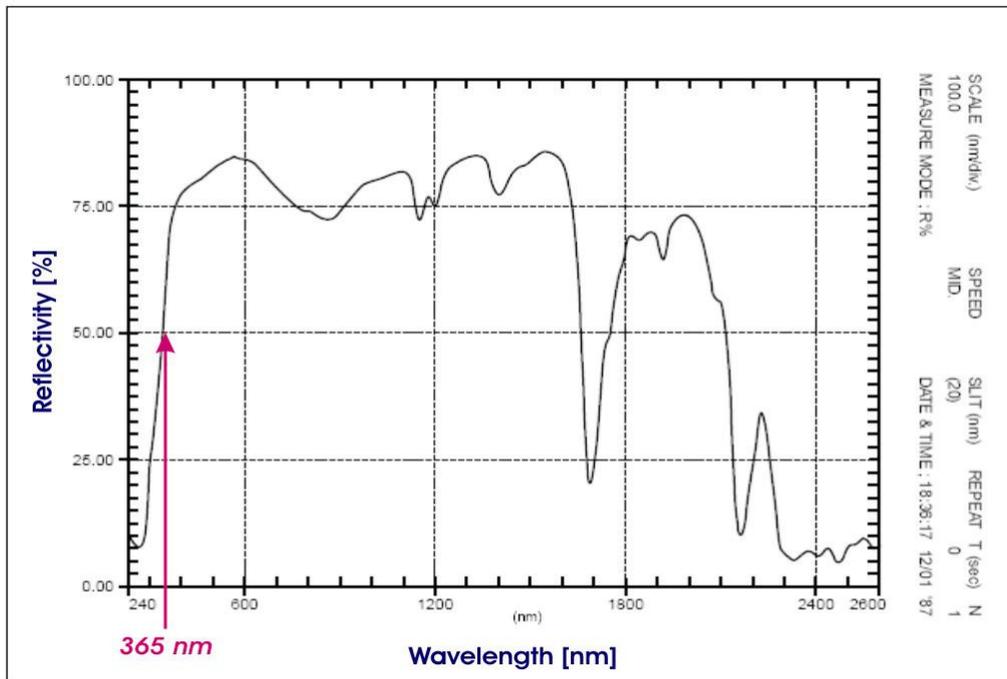
$$I_r(x, d) = \alpha(d) \frac{I_{or}}{2} \left\{ [C(u_2) - C(u_1)]^2 + [S(u_2) - S(u_1)]^2 \right\} \quad (3-24)$$

ist. Hierbei ist die Quelle i-UV-Licht mit I_{or} eine imaginäre Quelle. Daher muss der Ausdruck der Gleichung Gl.3-24 als die reflektierende Intensität in Bezug auf die einfallende Intensität umformuliert werden. Dann ist $I_r(x, d)$ wie folgt gegeben:

$$I_r(x, d) = \alpha(2D - d) \frac{R\alpha(D)I_{oi}}{2} \left\{ [C(u_2) - C(u_1)]^2 + [S(u_2) - S(u_1)]^2 \right\} \quad (3-25)$$

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

Dabei ist D die Schichtdicke des Fotoresists, R der Reflexionsgrad der Oberfläche des Wafers und I_{oi} die einfallende Intensität.



Reflection spectrum of a silicon wafer

Abb.3-15 Reflexionsgrad in Abhängigkeit von Wellenlänge für Si-Wafer [15]

In Abb.3-15 ist der Reflexionsgrad R der Oberfläche des Si-Wafers in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ gezeigt [15]. Hiermit kann der Wert von R bei der Wellenlänge $\lambda = 365 \text{ nm}$ abgelesen werden. Dabei beträgt R ca. 0.5 .

Bei der Betrachtung der reflektierenden Wellen (oder Intensität) an der Waferoberfläche wird eine *spiegelnde Reflexion* zweckmäßig angenommen. In Wirklichkeit muss jedoch eine dreidimensionale *diffuse Reflexion* aufgrund des Oberflächenprofils des Wafers stattfinden. Dies kann vermutlich dazu führen, dass sich die Intensitätsverteilung im näheren Bereich an der Waferoberfläche unter die Maske stärker ausbreiten kann als die idealisierte Betrachtung.

Dann ist gemäß Gl.3-22, Gl.3-23 und Gl.3-25 die *interferierende Intensitätsverteilung* $I(x, d)$ bei einer Maskenbelichtung wie folgt zu formulieren:

$$I(x, d) \cong \left\{ \alpha(d) \frac{I_{oi}}{2} + \alpha(2D-d) \frac{R\alpha(D)I_{oi}}{2} \right\} \left\{ [C(u_2) - C(u_1)]^2 + [S(u_2) - S(u_1)]^2 \right\} \quad (3-26)$$

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

Gemäß Gl.3-26 sind die normierten Intensitätsverteilungen $I_N(x, d) = I(x, d)/I_{0i}$ auf der Resistoberfläche ($d = 0 \mu\text{m}$) in Abhängigkeit des Abstandes g ($4 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$ und $200 \mu\text{m}$) in Abb.3-16 gezeigt, wobei die Wellenlänge λ 365 nm ist und die Öffnungsbreite B $70 \mu\text{m}$ beträgt: Mit steigendem g ist die laterale Ausbreitung der Intensitätsverteilung unter die Maske ähnlich wie Abb.3-7 (ohne Reflexion) auch hier erkennbar.

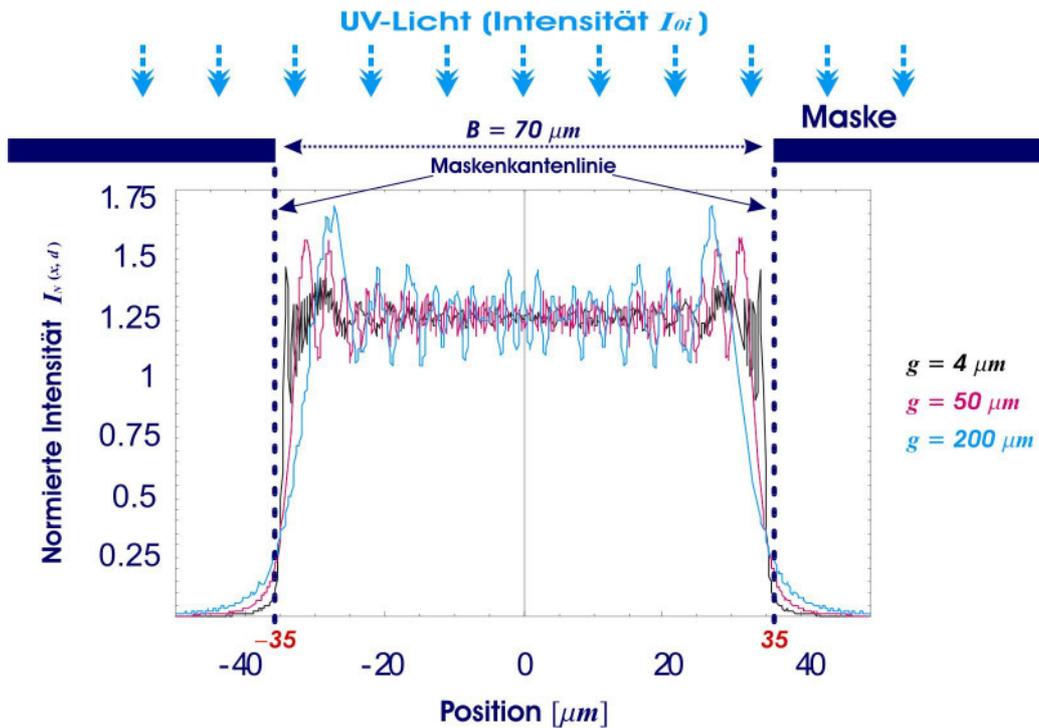


Abb.3-16 $I_N(x, d) = I_{iN}(x, d) + I_{rN}(x, d)$ in Abhängigkeit von g bei $d = 0 \mu\text{m}$ (Resistoberfläche)

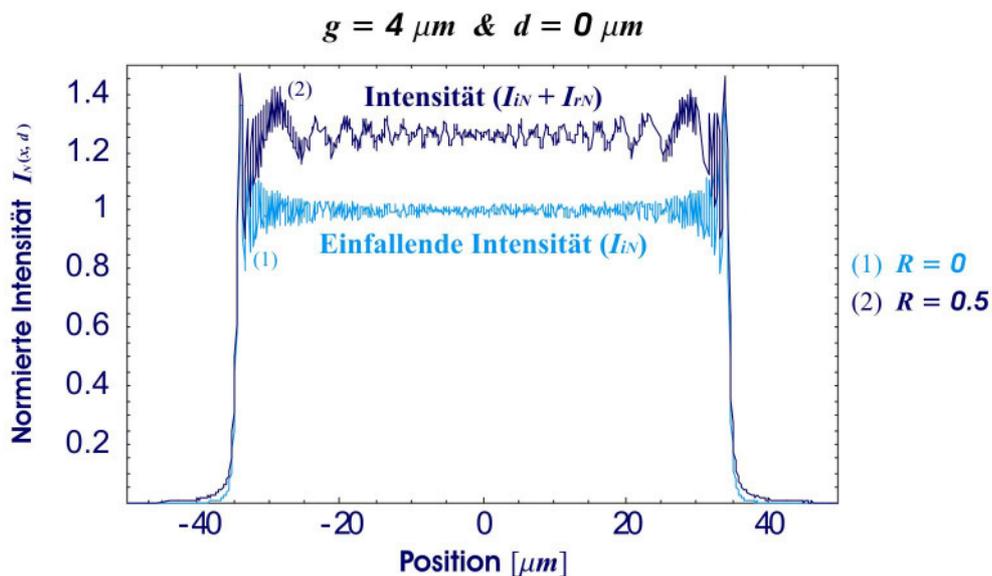


Abb.3-17 $I_N(x, d)$ und $I_{iN}(x, d)$ bei $g = 4 \mu\text{m}$ und $d = 0 \mu\text{m}$ (Resistoberfläche)

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

In Abb.3-17 sind die normierte Intensitätsverteilung mit Reflexion und die ohne Reflexion bei $g = 4 \mu\text{m}$ und $d = 0 \mu\text{m}$ zum Vergleich gezeigt. Bei $R = 0.5$ sind die deutlich erhöhte Intensitätsverteilung und die größere laterale Ausbreitung unter die Maske bemerkbar.

Reflektierende Intensität in Abhängigkeit von d

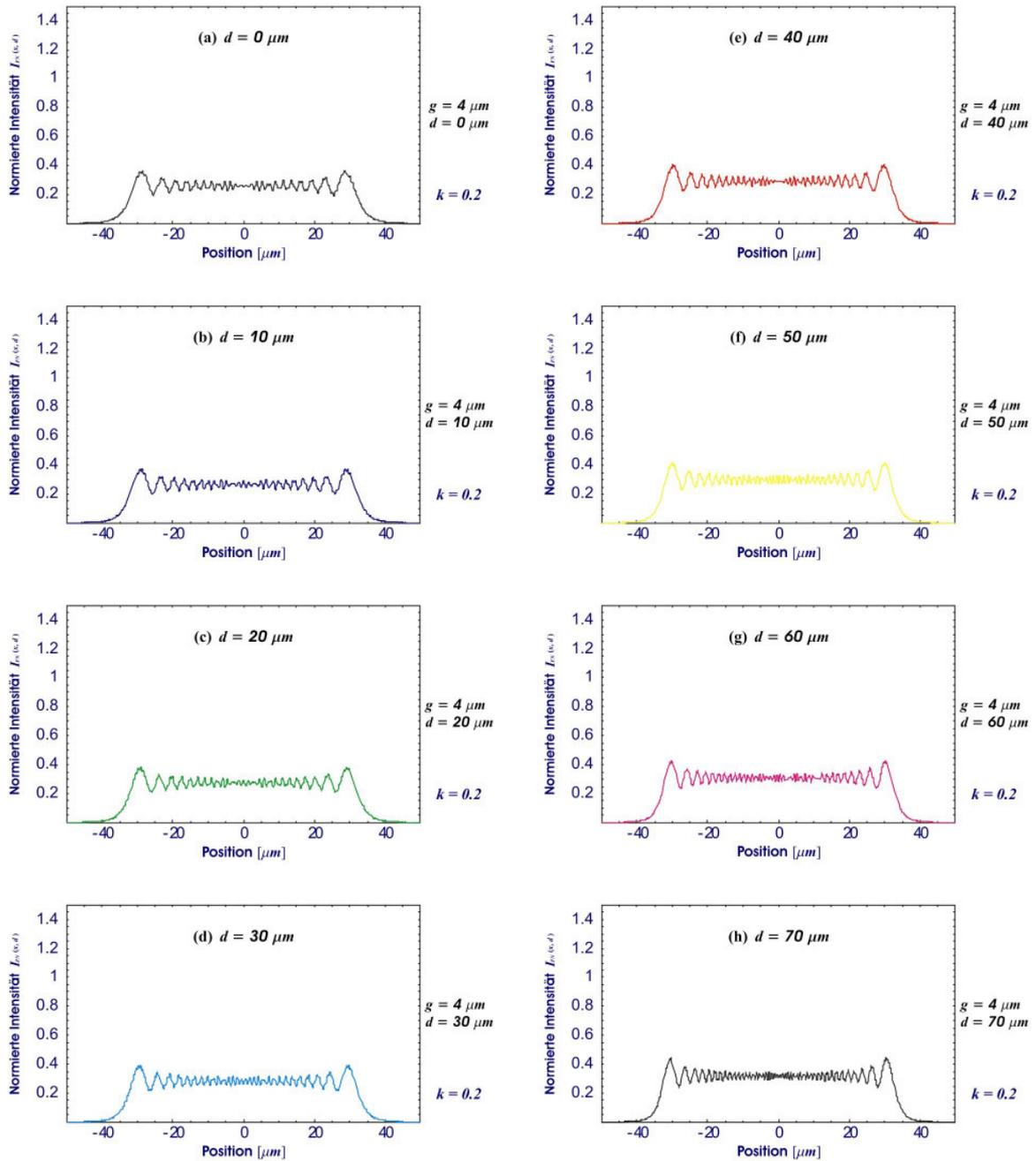


Abb.3-18 Reflektierende $I_{rN}(x, d)$ in Abhängigkeit von d bei $g = 4 \mu\text{m}$

Gemäß Gl.3-25 sind die normierten Intensitätsverteilungen $I_{rN}(x, d) = I_r(x, d)/I_{0i}$ bei $g = 4 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit von d in Abb.3-18 exemplarisch gezeigt, wobei die Wellenlänge $\lambda = 365 \text{ nm}$ ist und die Öffnungsbreite $B = 70 \mu\text{m}$ beträgt. Im Vergleich mit der einfallenden

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

$I_{iN}(x, d)$ in Abb.3-9 weisen die reflektierenden $I_{rN}(x, d)$ die größer werdende laterale Ausbreitung und die geringere Intensität auf.

Gemäß Gl.3-26 oder durch die Addition ($I_{iN}(x, d)$ in Abb.3-9 + $I_{rN}(x, d)$ in Abb.3-18) sind die normierten Intensitätsverteilungen $I_N(x, d) = I(x, d)/I_{0i}$ bei $g = 4 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit von d in Abb.3-19 dargestellt. Dabei ist die Wellenlänge λ 365 nm und die Öffnungsbreite B beträgt $70 \mu\text{m}$. Hier wird auch die Kriteriumslinie k – hier $k = 0.2$ angenommen – zur Abschätzung des Profils auf jede normierte Intensitätsverteilung $I_N(x, d)$ in Abb.3-19 eingetragen.

Intensität ($I_{iN} + I_{rN}$) in Abhängigkeit von d

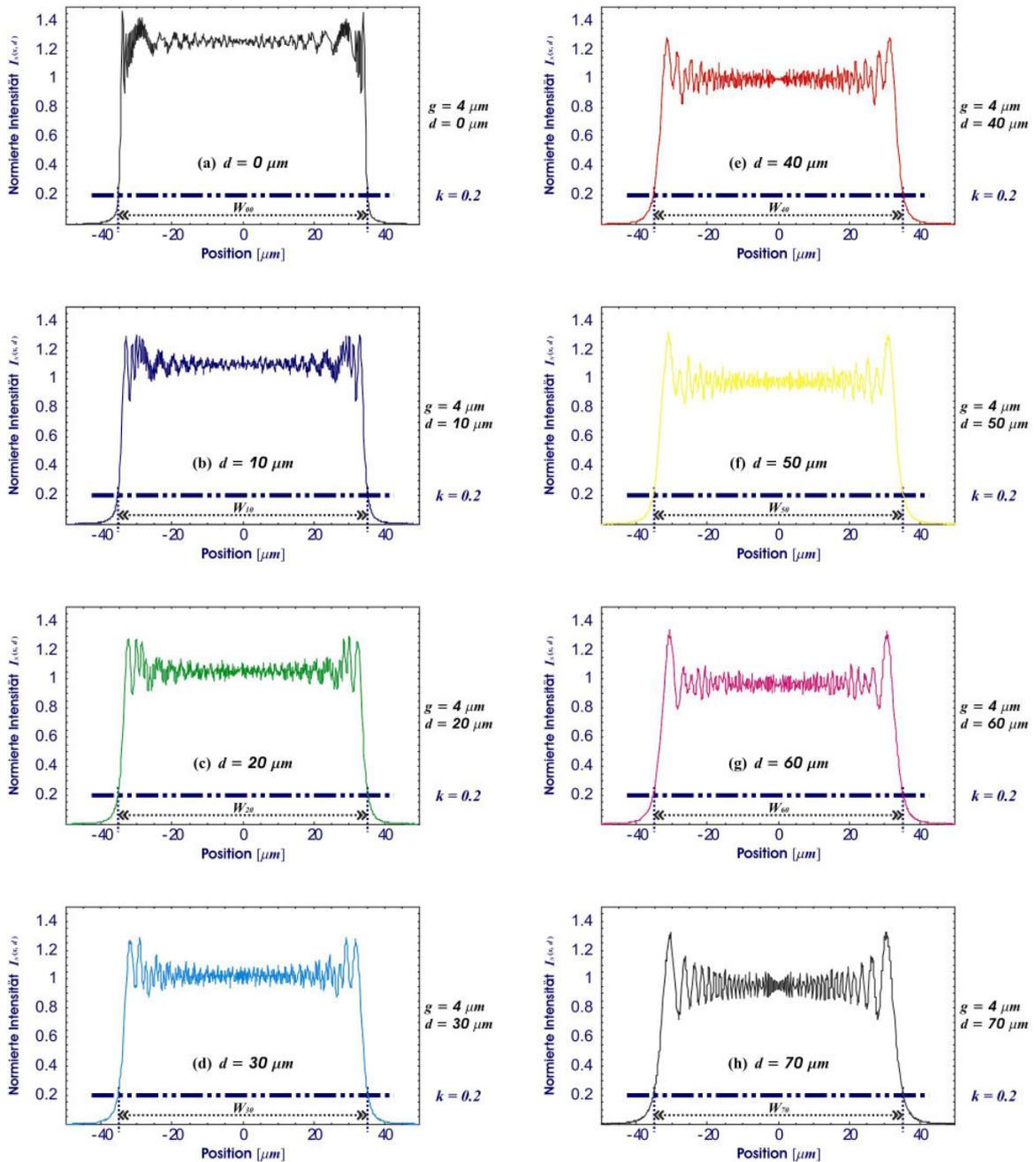


Abb.3-19 $I_N(x, d) = I_{iN}(x, d) + I_{rN}(x, d)$ in Abhängigkeit von d bei $g = 4 \mu\text{m}$

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

Wie schon im vorherigen Abschnitt beschrieben, kann hier auch das Profil durch das Ablesen der Breite der Reaktionszone W abgeschätzt werden. Zum besseren Verständnis sind alle $I_N(x, d)$ in Abb.3-19 übereinander gelegt (Abb.3-20). In Abb.3-20(unten) ist auch eine Vergrößerung von $I_N(x, d)$ im näheren Bereich der Maskenkantenlinie (Position $35 \mu\text{m}$) dargestellt.

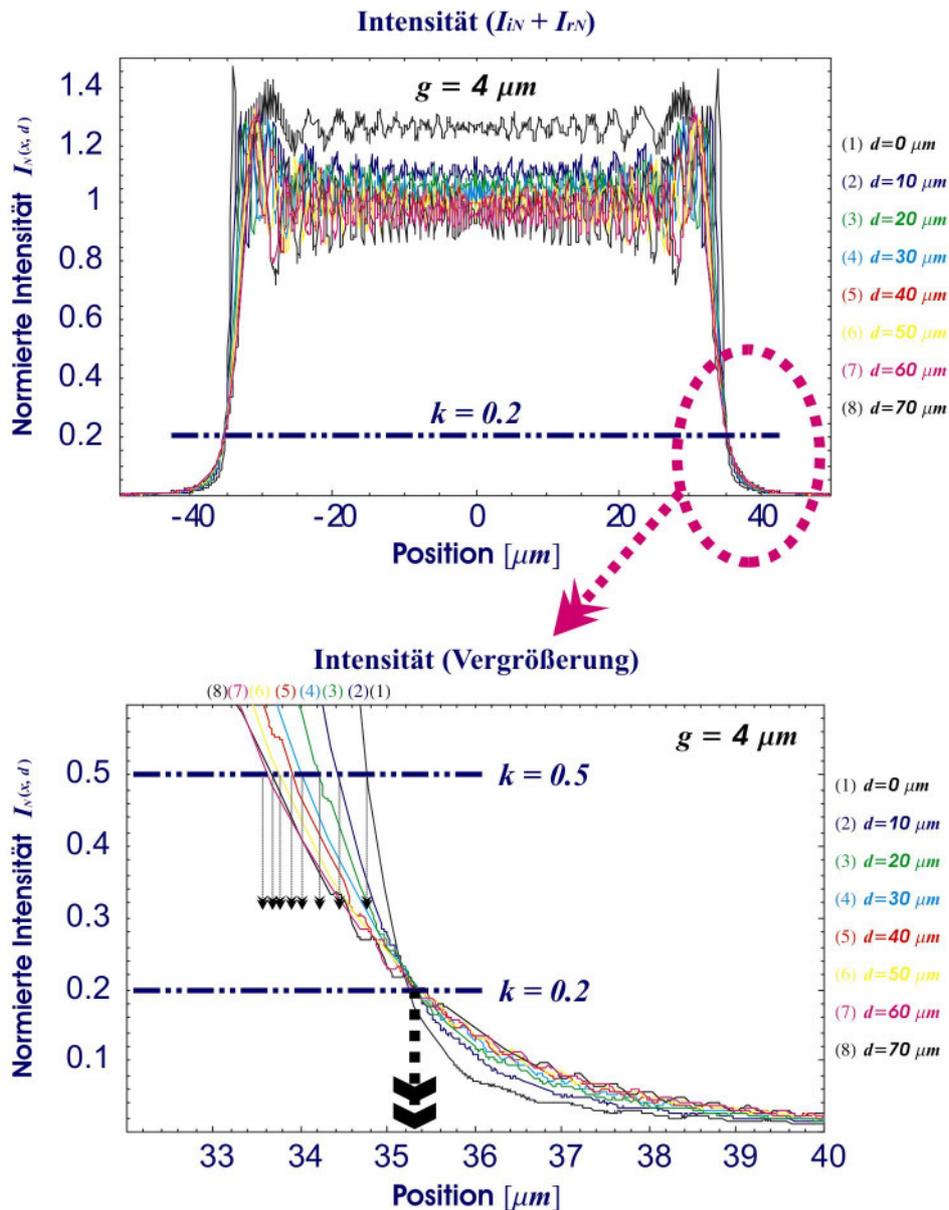


Abb.3-20 Abschätzung des Profils auf Basis von $I_N(x, d)$

Im Vergleich zu Abb.3-10(unten) sind die Linien für Intensitätsverteilungen zu der Maskenkantenlinie genähert und enger miteinander gebündelt. Dies bedeutet, dass die Differenz zwischen $I_N(x, d)$ bei $d = 0 \mu\text{m}$ und $I_N(x, d)$ bei $d = 70 \mu\text{m}$ geringer ist. Beispielsweise

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

sind bei $k = 0.2$ die Werte der Position um etwa $35.4 \mu\text{m}$ (in der Abszisse) konzentriert und gleichzeitig ist die Differenz kaum erkennbar, und damit ist das quasi-vertikale Profil der belichteten Resiststruktur zu erwarten. Bei $k = 0.5$ weist das Profil eine geringe Hinterschneidung aufgrund der kleinen Differenz (etwa $1.0 \mu\text{m}$) auf.

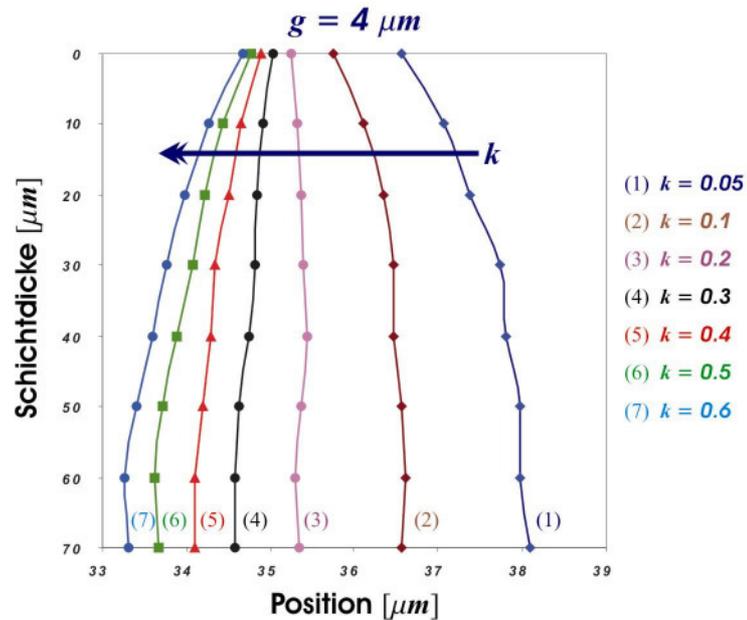


Abb.3-21 Berechnete Profile in Abhängigkeit von k (Kriteriumsfaktor) bei $g = 4 \mu\text{m}$

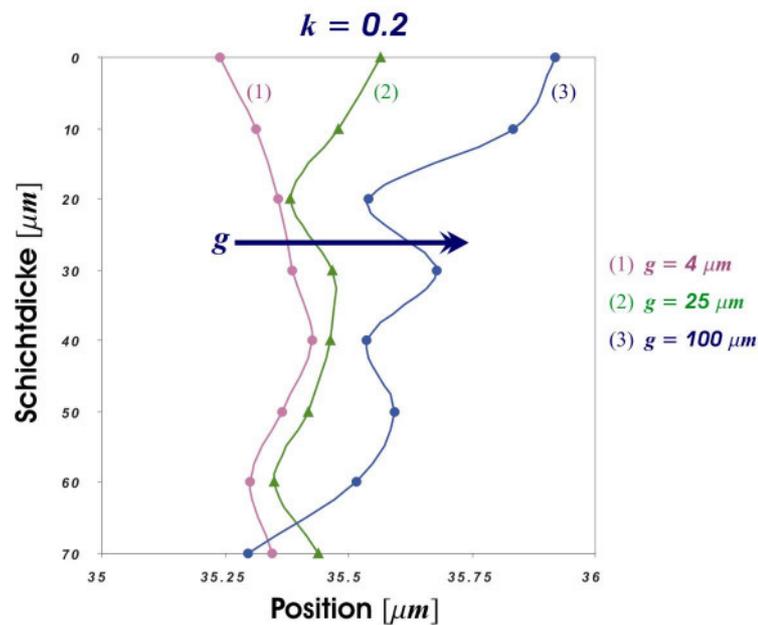


Abb.3-22 Berechnete Profile in Abhängigkeit von g (Abstand zwischen Maske und Oberfläche) bei $k = 0.2$

Die berechneten Profile sind in Abhängigkeit von k bei $g = 4 \mu\text{m}$ in Abb.3-21 und in Abhängigkeit von g bei $k = 0.2$ in Abb.3-22 exemplarisch dargestellt. Im Vergleich zu den Profilen in Abb.3-11 und 3-12 weisen hier die abgeschätzten Profile auf Basis der Reflexion eine andere Tendenz auf: Die Intensitätsverteilung, die von dem einfallenden UV-Licht stammt, wird durch die Reflexion geändert, so dass sich die Breite der belichteten Resiststruktur, besonders im näheren Bereich an der Waferoberfläche, vergrößert.

In Abb.3-23 sind die berechneten Profile bei den unterschiedlichen Reflexionsgraden ($R = 0, 0.5, 0.76$ und 0.9 bei $\lambda = 365 \text{ nm}$) exemplarisch gezeigt, wobei $k = 0.2$, $g = 4 \mu\text{m}$, $D = 70 \mu\text{m}$ und $B = 70 \mu\text{m}$ ist. Hierbei ist in Abhängigkeit vom Reflexionsgrad die Änderung der Profile deutlich erkennbar: Die Hinterschneidung erscheint bei $R = 0$, während das Profil bei $R = 0.5$ eine quasi-vertikale Linie aufweist und mit steigendem R die Profile keine Hinterschneidung. Dies bedeutet, dass mit Hilfe einer stärkeren Reflexion (im Vergleich zu einer Waferoberfläche) die Hinterschneidung bei einer gleichen Belichtungsdosis vermieden werden kann. Jedoch ist die Verbreiterung der belichteten Resiststruktur zu erwarten.

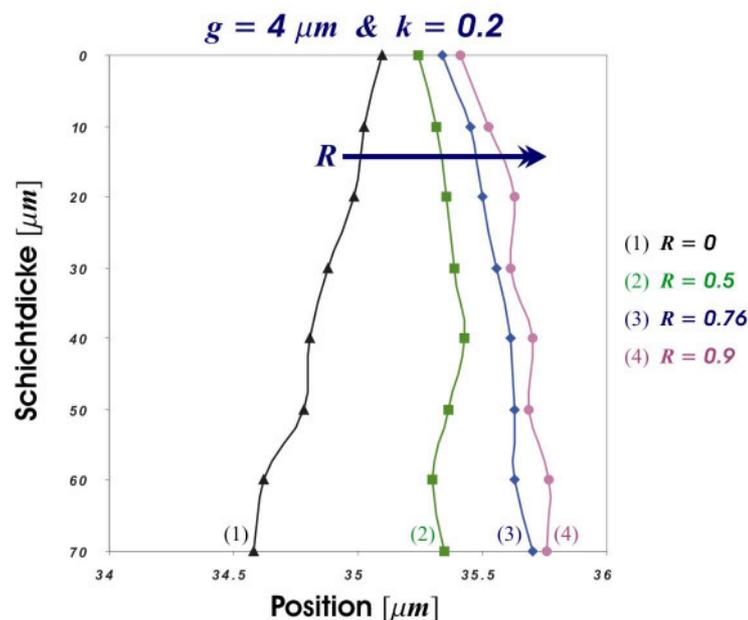


Abb.3-23 Berechnete Profile in Abhängigkeit von R

3.2.3 Belichtung auf Basis der intentionalen Reflexion

Wenn der Fotoresist SU-8 durch zwei Masken und zwei UV-Quellen gleichzeitig belichtet wird (Abb.3-24), dann kann die Hinterschneidung durch eine *Wechselwirkung* zwischen zwei Quellen vermieden werden. Jedoch ist diese Belichtungsanordnung praktisch nicht

realisierbar.

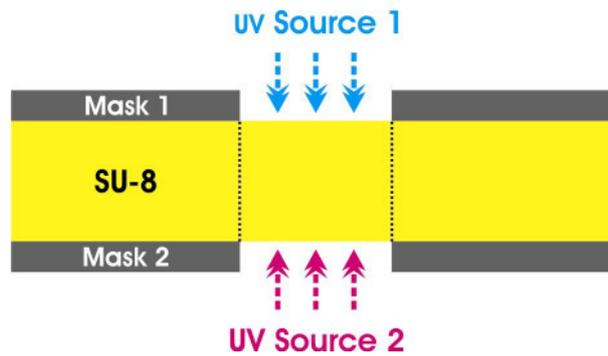


Abb.3-24 Prinzip für beiderseitige Belichtung (schematische Darstellung)

Durch Überlegungen – eine optische Eigenschaft “*Reflexion*“ – kann die quasi beiderseitige Belichtung konstruiert werden: Durch die Aufbringung einer dünnen und metallischen Schicht als Reflektor auf die Waferoberfläche wird eine zwingend und verstärkt reflektierende Welle als eine zweite und imaginäre Quelle erzeugt, so dass der Fotoresist SU-8 von zwei Quellen (realer und imaginärer Quelle) quasi beiderseitig gleichzeitig belichtet wird. Hierbei kann durch einen Umkehrungseffekt der Hinterschneidung mit Hilfe dieser reflektierenden Intensität die bereits wegen des ersten UV-Lichtes entstehende Hinterschneidung kompensiert werden.

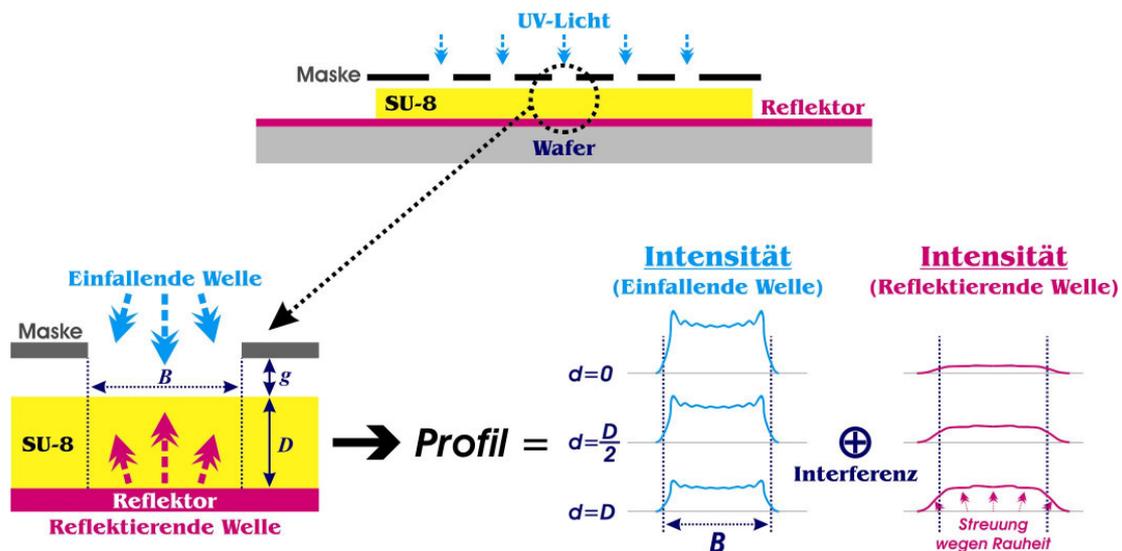


Abb.3-25 Schematische Darstellung der Belichtung auf Basis der intentionalen Reflexion

In Abb.3-25 ist ein Schema der Belichtung auf Basis der intentionalen Reflexion graphisch dargestellt. Eine dünne Metallschicht als Reflektor wird auf die Waferoberfläche gebracht, wodurch die Reflexion verstärkt wird. Dadurch kann die Intensitätsverteilung auf

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

Basis der verstärkten Reflexion geändert werden, so dass die Hinterschneidung vermieden werden kann. Im näheren Bereich an der Waferoberfläche kann es oberflächenprofilbedingt zu diffuser Reflexion oder Streuung kommen. Dies kann dazu führen, dass im Vergleich zu der idealisierten Intensitätsverteilung von Gl.3-25 die reflektierende Intensitätsverteilung real anders verläuft. Jedoch sind die Profile in Abhängigkeit von einem Reflexionsgrad R gemäß Gl.3-26 näherungsweise abzuschätzen.

Bei der Wahl nach einem geeigneten Metall als Reflektor muss man im Vergleich zum Reflexionsgrad ($R = 0.5$) des Wafers bei der Wellenlänge $\lambda = 365 \text{ nm}$ sowohl von einem höheren Reflexionsgrad R als auch von einer nicht transparenten, "ausreichend dicken" Metallschicht ausgehen.

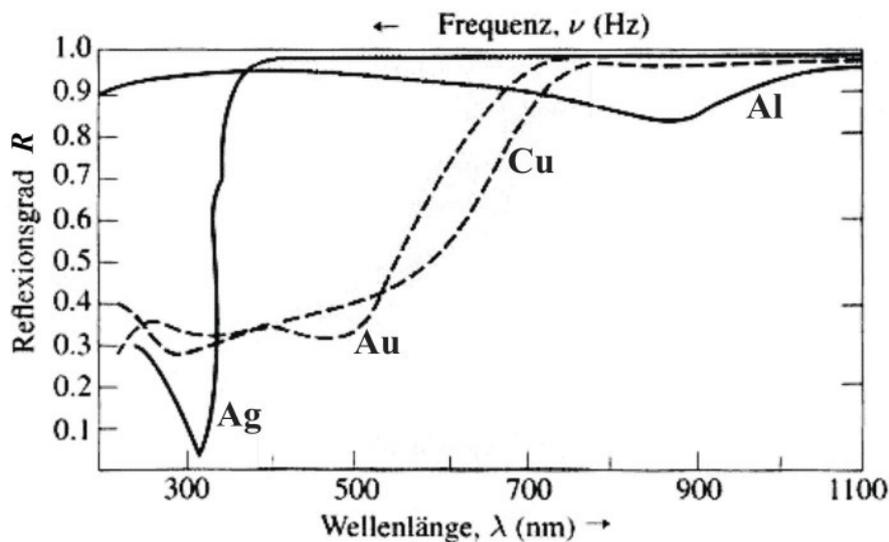


Abb.3-26 Reflexionsgrad in Abhängigkeit der Wellenlänge [02]

Material	Reflexionsgrad R ($\lambda = 365 \text{ nm}$)
Si-Wafer	0.5
Chrom (Cr-Reflektor)	0.76
Silber (Ag-Reflektor)	0.9

Tab.3-1 Reflexionsgrad für Si-Wafer, Chrom und Silber [02, 05, 15]

In Abb.3-26 ist bei verschiedenen Wellenlängen und senkrechtem Einfall der Reflexionsgrad R für verschiedene aufgedampfte Metallschichten exemplarisch gezeigt [02]. In Tab.3-1 ist der Reflexionsgrad R von Chrom (Cr) und Silber (Ag), welche in dieser Arbeit verwendet werden, vergleichsweise zusammengestellt [02, 07, 15].

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

In Abb.3-27 sind die berechneten Profile in Abhängigkeit von k bei dem Cr-Reflektor und dem Ag-Reflektor dargestellt, wobei $g = 4 \mu\text{m}$, $D = 70 \mu\text{m}$ und $B = 70 \mu\text{m}$ ist. Hierbei ist bemerkbar, dass im Vergleich zu Abb.3-21 (nur die Reflexion an der Waferoberfläche) durch die gezielte Reflexion die berechneten Profile eine andere Neigung zeigen; beispielsweise weist das Profil bei $k = 0.3$ die quasi-vertikale Linie und ab $k = 0.2$ keine Hinterschneidung auf, während in Abb.3-21 das Profil bei $k = 0.3$ die Hinterschneidung zeigt und bei $k = 0.2$ die quasi-vertikale Linie. In Abb.3-28 sind die berechneten Profile in Abhängigkeit von g bei dem Cr-Reflektor und dem Ag-Reflektor exemplarisch gezeigt, wobei $k = 0.2$, $D = 70 \mu\text{m}$ und $B = 70 \mu\text{m}$ ist: Ähnlich wie Abb.3-22 ist auch hier erkennbar, dass mit steigendem g die Hinterschneidung durch die laterale Ausbreitung der Intensitätsverteilung unter die Maske und die abfallende Intensität entsteht.

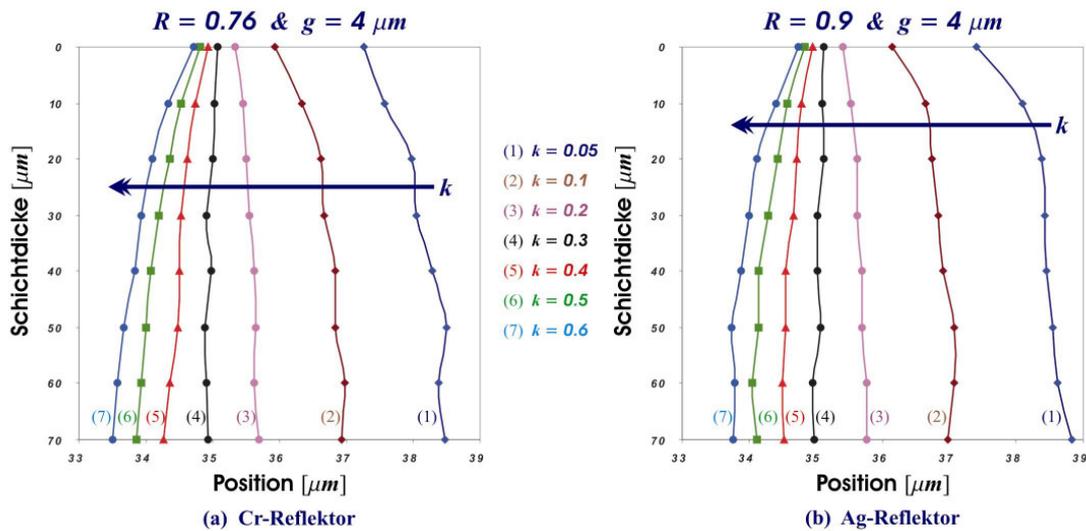


Abb.3-27 Berechnete Profile in Abhängigkeit von k bei $g = 4 \mu\text{m}$ (a) Cr-Reflektor und (b) Ag-Reflektor

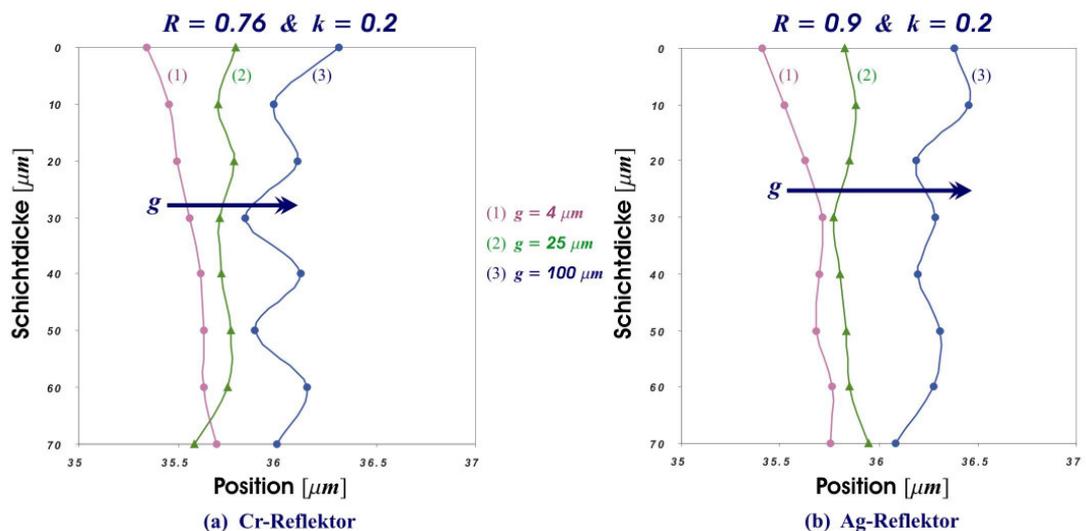


Abb.3-28 Berechnete Profile in Abhängigkeit von g bei $k = 0.2$ (a) Cr-Reflektor und (b) Ag-Reflektor

Zur Abschätzung des Profils der belichteten Resiststruktur werden zwei Modelle – das eine auf Basis von $I_{iN}(x, d)$, das andere auf Basis von $I_N(x, d) = I_{iN}(x, d) + I_{rN}(x, d)$ – betrachtet. Hier können die beiden Methoden von der Prozessierung mit SU-8 stark abhängig sein. Beispielsweise ist für den Prozess ohne Verwendung einer Anti-Reflexionsschicht auf dem Wafer das Modell durch $I_N(x, d)$ geeignet, während das Modell durch $I_{iN}(x, d)$ für den Prozess mit einer Anti-Reflexionsschicht oder eine gezielte Belichtungsmethode wie z.B. Rückseitenbelichtung [06] anwendbar ist.

Nur auf Basis des vorgestellten Modells – Abschätzung durch Abgrenzung zwischen dem belichteten und dem unbelichteten Bereich mit Hilfe von k – ist das exakte Profil nicht zu bestimmen. Das Profil wird ebenfalls von Phänomenen wie der lateralen Ausbreitung des Lichtes zur Resistoberfläche aufgrund des Abstandes g und der diffusen Reflexion an der Waferoberfläche wegen des Oberflächenprofils beeinflusst. Außerdem müssen einige folgende Prozesse wie Entwicklung und Temperung nach der Belichtung durchgeführt werden. Hierbei kann das Profil bei einem nachfolgenden Prozess beeinflusst werden: Das Profil kann durch die Schwellung während der Entwicklung [08] und die Temperung [24, 45] wie PEB geändert werden. Trotz solchen Einflusses ist die Tendenz für das Profil der belichteten Resiststruktur mit Hilfe von k näherungsweise abzuschätzen. Zusammenfassend kann dieses Modell eine *Richtlinie* für die Belichtungsphase bieten. Im nächsten Kapitel wird eine tendenzielle Übereinstimmung durch Experimente überprüft.

3.3 Laserdirektbelichtung

In diesem Abschnitt wird eine laserunterstützte direkte Lithographie (Laserdirektbelichtung) beschrieben. Im Gegensatz zur Maskenbelichtung wird der Fotoresist nicht durch eine Abbildung mit Hilfe einer Maske, sondern mit Hilfe des Laserstrahls direkt belichtet.

In der Regel wird die direkte Belichtungstechnik mittels UV-Laser ohne Verwendung einer Maske in der Massenfertigung kaum Verwendung finden, da es sich um ein seriell schreibendes Verfahren handelt, bei dem die Struktur Punkt um Punkt belichtet werden muss. Jedoch kann die Laserdirektbelichtung als ein mikrolithographisches Verfahren zum Einsatz kommen, wenn es sich um die Herstellung eines *Abformwerkzeuges* oder *Rapid Prototyping* oder *3D-Strukturierung* handelt. Bei diesem Verfahren besteht der Vorteil darin, dass keine Maske benötigt wird, da der Strahl direkt gesteuert werden kann – entsprechend der Information aus dem CAD-System. Dabei ist das Auflösungsvermögen von dem Laserstrahl – seiner *Intensitätsverteilung* und der *Form des Fokus* – und auch von dem Fotoresist abhängig.

Zur Erzeugung von Mikrostrukturen und Mikrokomponenten wird durch die Laserdirektbelichtung eine Vielzahl von Verfahren in der Literatur [59, 60, 61] berichtet: Beispielsweise wird ein Verfahren auf Basis von "On-Focus" (der Strahlfokus liegt an der Resistoberfläche) und "Out-of-Focus" (der Fokus ist höher als die Resistoberfläche positioniert) des Laserstrahls in Abb.3-29(links) vorgestellt und damit wird also die 3D-Strukturierung (Abb.3-29, rechts) demonstriert [61].

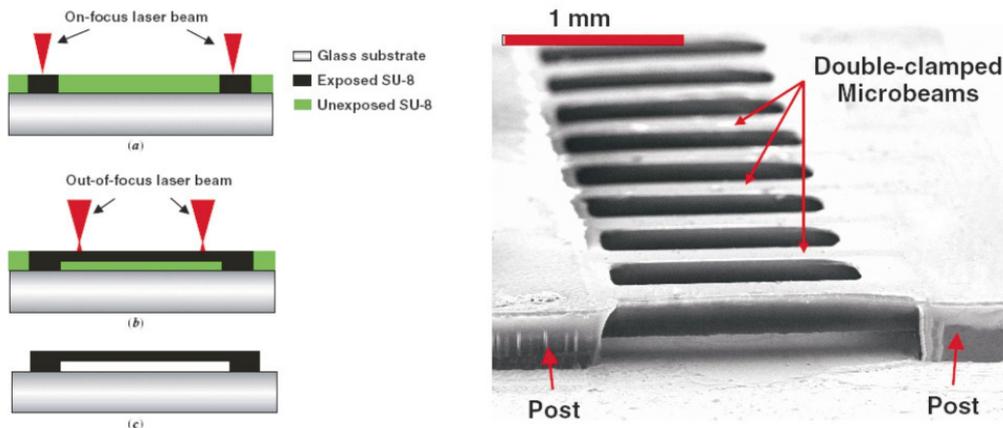


Abb.3-29 Strukturierungsmethode durch Änderung der Intensität auf Basis des Strahlfokus [61]

3.3.1 Gaußscher Strahl

Bei der Laserdirektbelichtung mit festem Strahl entspricht die Intensitätsverteilung im Strahl einer Gaußschen Verteilung. Man spricht deshalb von einem *Gaußschen Strahl*. In Folgenden wird der Gaußsche Strahl betrachtet, wobei die grundlegende Beschreibung der Literatur [58, 62, 63, 64] entnommen wird.

Bei dem Gaußschen Strahl handelt es sich um einen zur Ausbreitungsrichtung (*z-Achse*) rotationssymmetrischen Laserstrahl. Die Intensität I nimmt in radialer Richtung gaußförmig ab (Abb.3-30) und wird folgend beschrieben werden:

$$I(z, r) = I_0 \left(\frac{W_0}{w(z)} \right)^2 \cdot \exp \left[-2 \left(\frac{r}{w(z)} \right)^2 \right] \quad \text{hier } I_0 = I(0,0) \quad (3-27)$$

mit

$$w(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2} \quad (3-28)$$

$$z_R = \frac{\pi \cdot W_0^2}{\lambda} \quad (3-29)$$

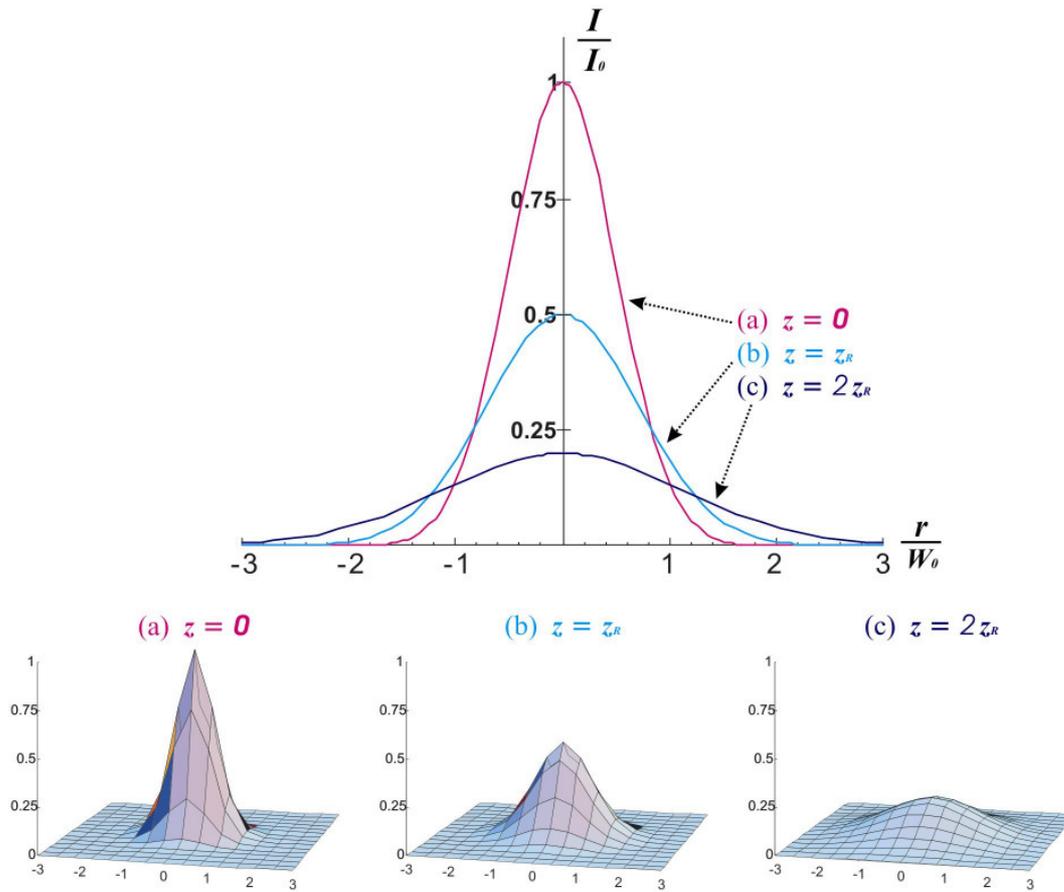


Abb.3-30 Radiale Intensitätsverteilung eines Gaußschen Strahls

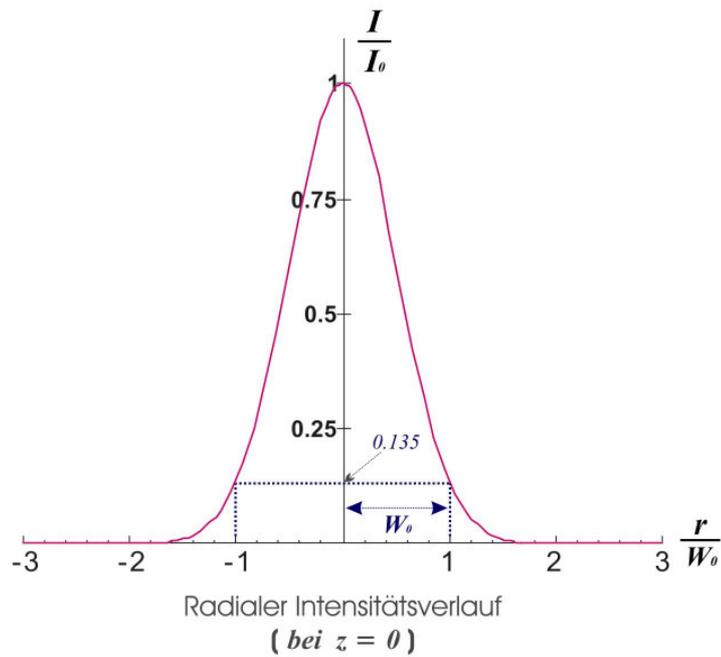


Abb.3-31 Definition der Strahltaile W_0 bei einem Gaußschen Strahl

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

In der radialen Richtung verteilt sich die Intensität nach einer Gaußfunktion gemäß dem Term $\exp[-2(r/w(z))^2]$. Bei $r = w(z)$ ist die Intensität im Vergleich zur Strahlachse ($r = 0$) um den Faktor e^{-2} ($\approx 13.5\%$) abgesunken. Daher wird $w(z)$ als Strahlradius bezeichnet. Der Strahlradius nimmt sein Minimum W_0 (*Strahltaille*) bei $z = 0$ an (Abb.3-31). Mit zu- bzw. abnehmendem z wächst der Strahlradius entsprechend Gl.3-28 an.

Mit zunehmendem Strahlradius $w(z)$ muss aus Gründen der Energieerhaltung die Feldstärke auf der Strahlachse (z -Achse) abnehmen. Dies wird durch den Faktor $[W_0/w(z)]^2$ in Gl.3-27 berücksichtigt.

Für $z = z_R$ ergibt sich ein Anwachsen des Strahlradius auf $\sqrt{2}W_0$. Die den Gaußschen Strahl charakterisierende Größe z_R heißt *Rayleigh-Länge* (Abb.3-32); für $|z| \gg z_R$ spricht man auch vom *Fernfeld*, für $|z| \leq z_R$ vom *Nahfeld*.

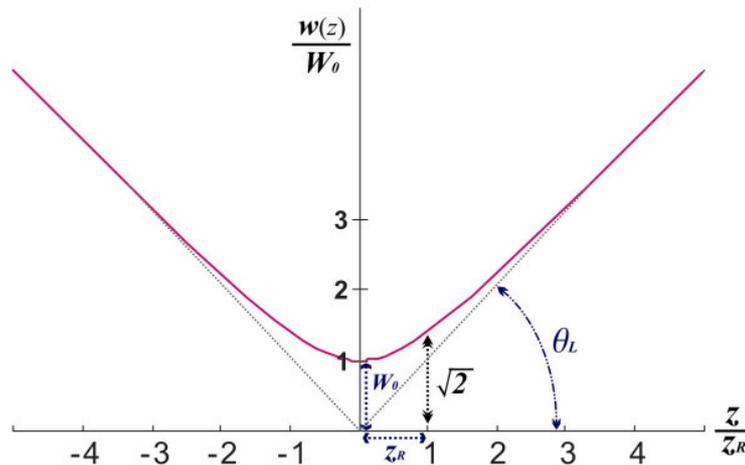


Abb.3-32 Normierter Strahlradius $w(z)/W_0$ eines Gaußschen Strahls in Abhängigkeit von z/z_R

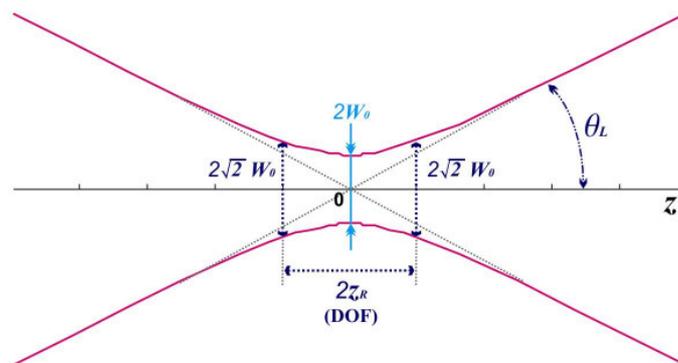


Abb.3-33 Definition der Depth-of-Focus (DOF) bei einem Gaußschen Strahl

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

Im Fernfeld ($|z| \gg z_R$) hat der Gaußsche Strahl einen konstanten beugungsbedingten *Divergenzwinkel* θ_L , der wie folgt gegeben ist:

$$\theta_L = \frac{\lambda}{\pi \cdot W_0} \quad (3-30)$$

Bei der Direktbelichtung mithilfe eines Gaußschen Strahls gibt es nur einen begrenzten Tiefenbereich – *Fokustiefe* oder *DOF* (Depth of Focus) – im Bereich der Fokusebene. *DOF* steht für die praktisch nutzbare Tiefenschärfe bei der Belichtung. Die Größe von *DOF* wird durch *Rayleigh-Länge* z_R bestimmt und ist wie folgt definiert (Abb.3-33):

$$DOF = 2 \cdot z_R \quad (3-31)$$

Zur besseren Verständigung ist der Verlauf der Intensitätsverteilung (die Änderung des Strahlradius) eines Gaußschen Strahls in Abhängigkeit von z (mit zu- bzw. abnehmendem z) längs der Strahlachse in Abb.3-34 veranschaulicht dargestellt.

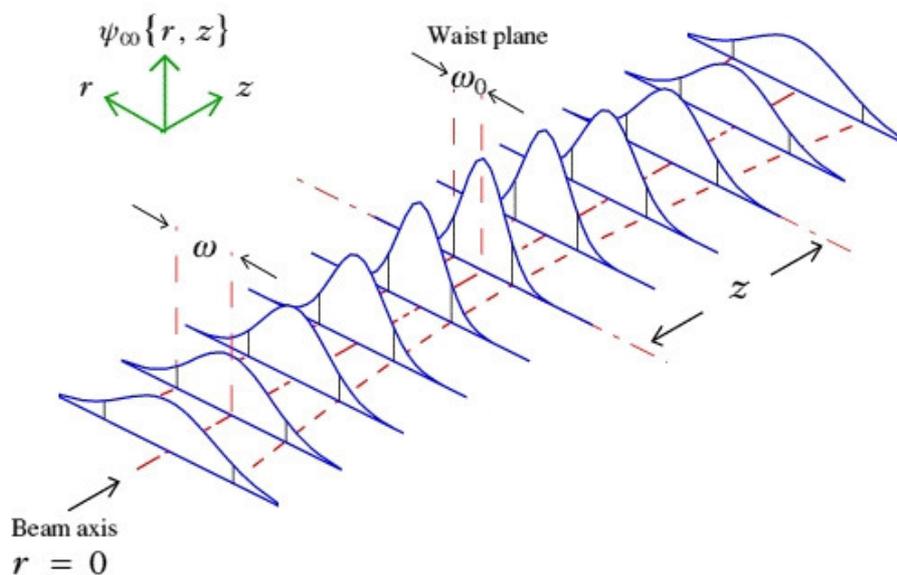


Abb.3-34 Verlauf der Intensitätsverteilung eines Gaußschen Strahls in Abhängigkeit von z

Im Allgemeinen kann der Laserstrahl bei der Laserdirektbelichtung nur als ein Gaußscher Strahl (Grundmode **TEM₀₀**) betrachtet werden. Im Real können aber mehrere Moden wie z.B. **TEM₁₀** und **TEM₀₁** gleichzeitig anschwingen, was bei Multimode-Laser der Fall ist. In diesem Zusammenhang soll erwähnt werden, dass jeder reale Laserstrahl als Überlagerung verschiedener Moden aufgefasst werden kann [58]. Die Intensitätsverteilungen von einigen

Moden sind in Abb.3-35 exemplarisch dargestellt.

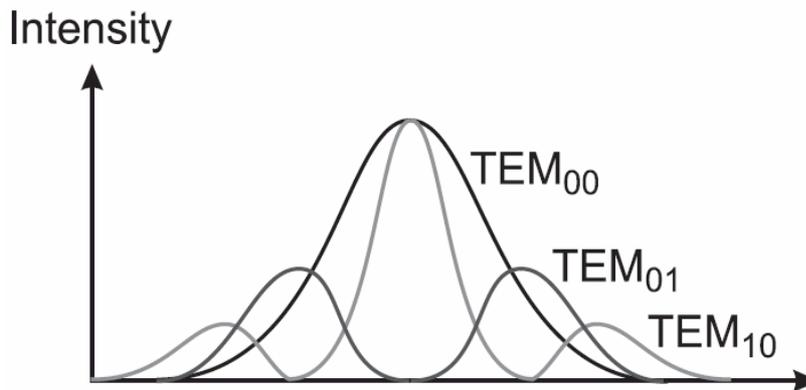


Abb.3-35 Intensitätsverteilung von einigen Moden [64]

3.3.2 Tiefenbedingte Intensitätsverteilung in Luft

Um die photoaktiven Komponenten im Fotoresist in eine Reaktion zu bringen, ist eine bestimmte Energie notwendig, wodurch die Löslichkeit des Fotoresists verändert wird. Bei der Laserdirektbelichtung soll die Energie des Gaußschen Strahls – wie bei der Maskenbelichtung – nicht nur auf die Resistoberfläche übertragen werden, sondern auch in die Tiefe des Fotoresists. Daher wird der Verlauf der tiefenbedingten Intensitätsverteilung auf Basis des Gaußschen Strahls (Grundmode TEM_{00}) zuerst in Luft betrachtet.

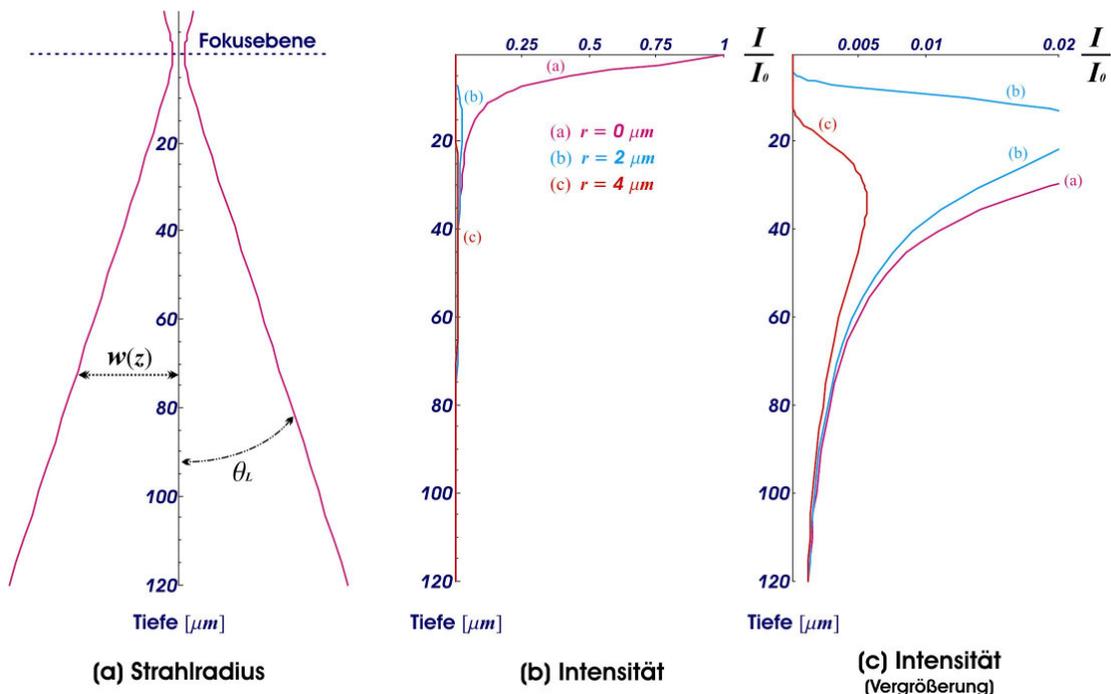


Abb.3-36 Strahlradius und Verlauf der Intensität in Abhängigkeit der Tiefe z

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

In Abb.3-36 sind der Strahlradius und der Verlauf der Intensität ($r = w(z) = 0, 2$ und $4 \mu\text{m}$) eines Gaußschen Strahls in Abhängigkeit von der Tiefe z [μm] dargestellt. Hierbei beträgt die Strahltaile W_0 ca. $0.7 \mu\text{m}$ und die Wellenlänge λ ist 365 nm . Daraus ergibt sich die Rayleigh-Länge z_R ca. $4.24 \mu\text{m}$.

Wie in Abb.3-36(a) gezeigt, je größer die Tiefe desto breiter ist der Strahlradius $w(z)$ divergenzbedingt (θ_L), so dass gemäß der Energieerhaltung tiefenbedingt die Intensität auf der Strahlachse ($r = 0 \mu\text{m}$) in Abb.3-36(b) abnimmt. Zuerst fällt die Intensität drastisch bis zu der Tiefe z ca. $50 \mu\text{m}$ in Abb.3-36(c) ab; bei der Tiefe ca. $50 \mu\text{m}$ ist die Intensität im Vergleich zur Fokusebene ($z = 0 \mu\text{m}$) um den Faktor ca. 0.007 ($\approx 0.7\%$) abgesunken. Im Gegensatz dazu ist tiefenbedingt die Änderung der Intensität bei $r = 2$ und $4 \mu\text{m}$ nicht so drastisch.

Die Strahldivergenz – der Divergenzwinkel θ_L – beruht auf der Beugung des Lichtes beim Austritt aus dem Laser. Beim Austritt des Laserlichtes verbreitert sich die Wellenfront, wird bogenförmig und weicht so von einer idealen parallelen Wellenfront ab. Der Beugungseffekt einer elektromagnetischen Welle hängt von der Wellenlänge λ ab. Je kürzer die Wellenlänge desto geringer ist der Beugungseffekt.

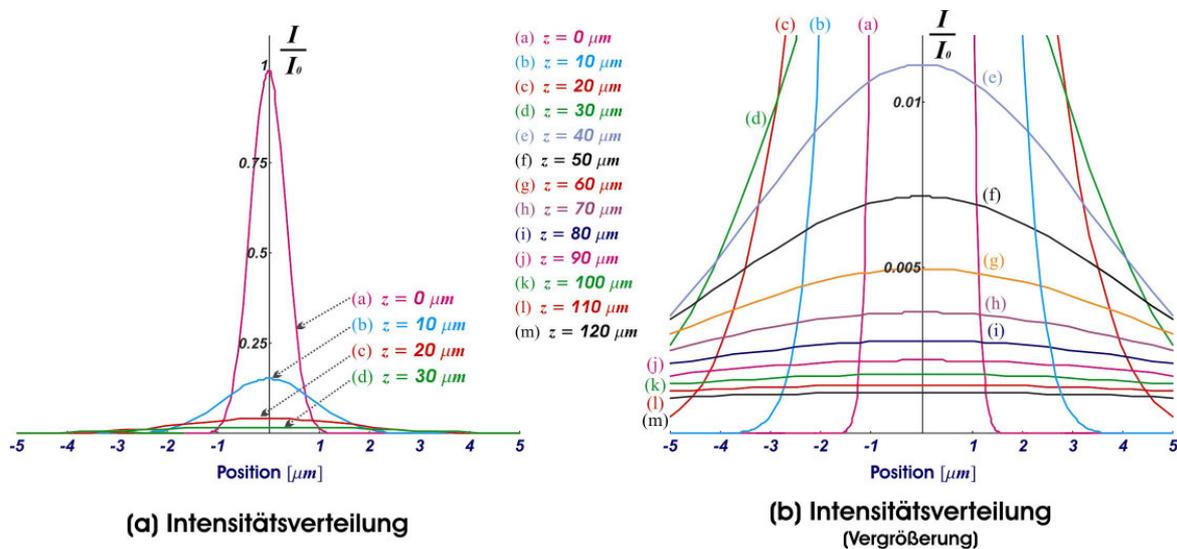


Abb.3-37 Tiefebedingte Intensitätsverteilung I/I_0

In Abb.3-37 sind die normierten Intensitätsverteilungen $I_N(z, r) = I(z, r)/I_0$ in Abhängigkeit der Tiefe z [μm] dargestellt. Wie bereits erwähnt, ist hier die tiefenbedingt drastische Änderung im Bereich der erst $30 \mu\text{m}$ nur noch zu sehen. Unter einer Tiefe von ca. $50 \mu\text{m}$ ((f)-Linie in Abb.3-37(b)) fällt die Intensität geringfügig ab.

3.3.3 Tiefenbedingte Intensitätsverteilung in einem Fotoresist

Im vorherigen Abschnitt wird idealisiert – ohne Berücksichtigung von *Brechung* und *Dämpfung* – nur die tiefenbedingte Intensitätsverteilung betrachtet. In der Realität herrscht wegen der Dämpfung eine abfallende Intensität, die von dem Resistsystem wie z.B. SU-8 abhängt. Beim Übergang von Luft ($n_0 = 1.0$) auf SU-8 ($n_R = 1.67$) findet die Brechung aufgrund des Divergenzwinkels θ_L statt, so dass sich der Strahlradius $w_{SU8}(z)$ in SU-8 im Vergleich zu $w(z)$ in der Luft verringert, d.h., der Divergenzwinkel θ_{SU8} (ca. 5.68°) in SU-8 als θ_L (ca. 9.51°) in Luft kleiner wird.

In Abb.3-38 ist der tiefenbedingte Verlauf von zwei Strahlradien – $w_{SU8}(z)$ und $w(z)$ – schematisch dargestellt. Hierbei ist der Einfallswinkel für $z < z_R$ als vertikal angenommen, d.h., *keine Brechung*. Ab $z \geq z_R$ findet die Brechung statt. Dann wird hier der Divergenzwinkel θ_{SU8} in SU-8 durch das *Snelliussche Brechungsgesetz* wie folgt gegeben:

$$\theta_{SU8} = \sin^{-1} \left\langle \frac{n_0}{n_R} \sin \theta_L \right\rangle \quad (3-32)$$

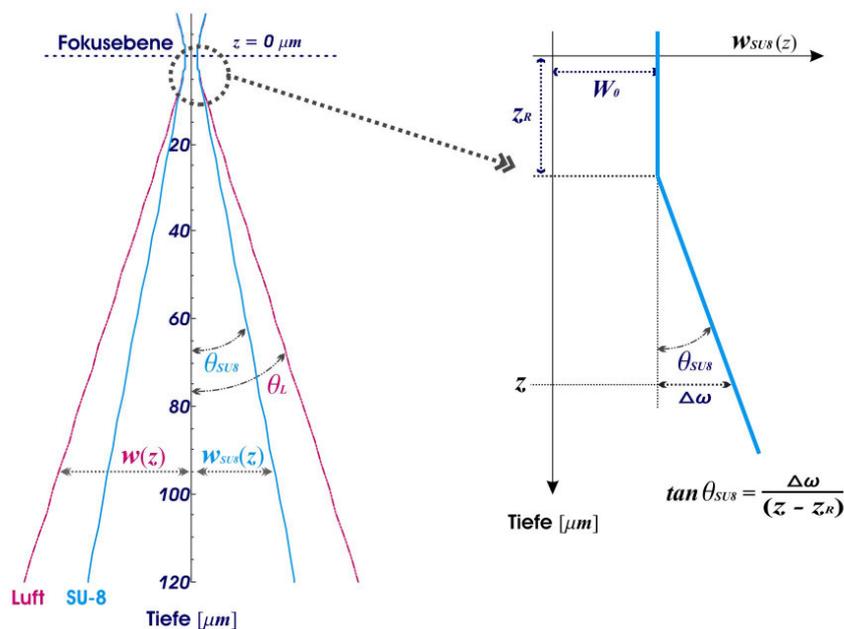


Abb.3-38 Tiefenbedingter Verlauf des Strahlradius in Luft und SU-8

Für $z < z_R$ ist der Strahlradius $w_{SU8}(z)$ in SU-8 unverändert gleich der Strahltaile W_0 . Für $z \geq z_R$ wird $w_{SU8}(z)$ näherungsweise wie folgt beschrieben (Abb.3-38 rechts):

$$w_{SU8}(z) = W_0 + \Delta w = W_0 + (z - z_R) \cdot \tan \theta_{SU8} \quad (3-33)$$

Neben der beugungsbedingten Strahldivergenz wirkt sich auch die materialspezifische Dämpfung in SU-8 aus. Dies führt dazu, dass während des Belichtungsvorgangs die Intensität längs der Tiefe bei einer dicken Resistschicht abfällt und dadurch das Licht die gesamte Schichtdicke des Fotoresists nicht durchdringen kann, so dass nur die photoaktiven Komponenten in der Nähe der Resistoberfläche in eine Reaktion gebracht werden können. Dies kann durch die Änderung der Leistung P_L bzw. der Intensität I_0 des Lasers kontrolliert werden. Jedoch weist die Intensität I des Laserstrahls tiefenbedingt eine starke Änderung und eine große Differenz auf, wie bereits in Abb.3-36 und 3-37 gezeigt. In Gleichung Gl.3-34 ist ein Zusammenhang zwischen P_L und I_0 gegeben [62]:

$$P_L = \frac{1}{2} \cdot I_0 (\pi W_0^2) \quad (3-34)$$

Im Folgenden wird die Intensitätsverteilung im Fotoresist SU-8 in Abhängigkeit der Tiefe z betrachtet. Eine Direktbelichtung mithilfe des UV-Laserstrahls ist schematisch in Abb.3-39 dargestellt. Dabei ist auch wie die Maskenbelichtung eine idealisierte Reflexion – *spiegelnde Reflexion* – von der Waferoberfläche angenommen.

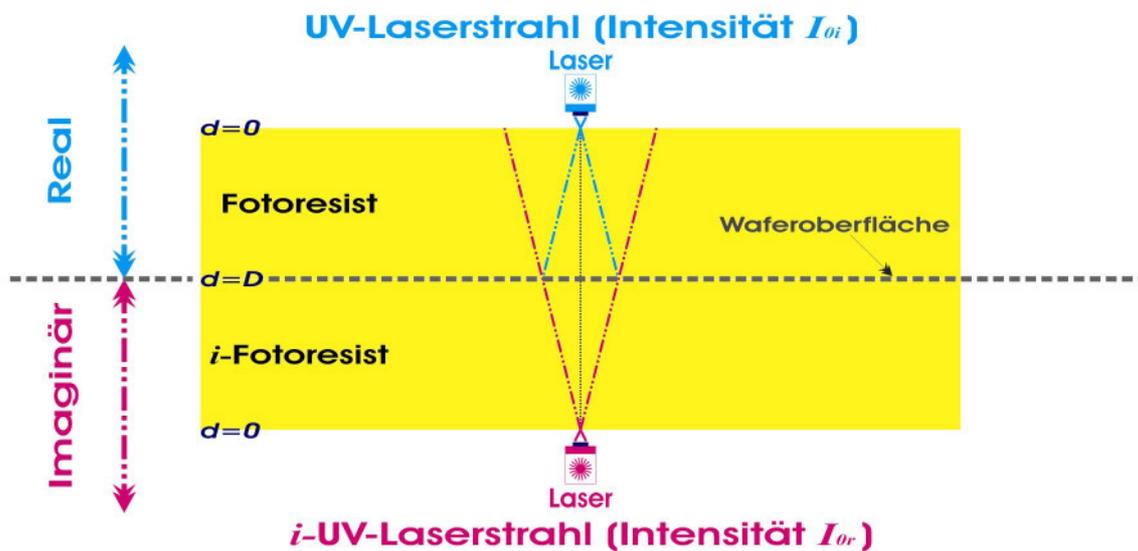


Abb.3-39 Schematische Darstellung einer Laserdirektbelichtung mit zwei Quellen

Wie bereits in Abb.3-39 gezeigt, wird zweckmäßig durch die Spiegelung in Bezug auf die Waferoberfläche eine Belichtungskonfiguration mit zwei Laserquellen eingeführt, um die Intensitätsverteilung $I(z, r)$ auf Basis der einfallenden $I_i(z, r)$ und der reflektierenden $I_r(z, r)$ zu betrachten: **UV-Laserstrahl** mit I_{0i} (einfallende Intensität), das von oben nach unten emittiert

wird, ist eine reale Quelle von einer Belichtungsanlage, und ***i*-UV-Laserstrahl** mit I_{0r} (reflektierende Intensität), das von unten nach oben emittiert wird, ist eine gespiegelte und imaginäre Quelle, wobei bei der Reflexion die Strahldivergenz berücksichtigt wird.

Wie bereits in Kapitel 3.2.2 erwähnt, kann bei einem großen Abstand zwischen beiden Laserquellen die Interferenz – zwischen $I_i(z, r)$ und $I_r(z, r)$ – ignoriert werden. Damit kann unter der Berücksichtigung der Dämpfung Gl.3-8 die Intensitätsverteilung $I(z, r)$ wie folgt beschrieben werden:

$$I(z, r) \cong I_i(z, r) + I_r(z, r) \quad (3-35)$$

wobei

$$I_i(z, r) = \alpha(z) \cdot I_{0i} \left(\frac{W_0}{w_{SU8}(z)} \right)^2 \cdot \exp \left[-2 \left(\frac{r}{w_{SU8}(z)} \right)^2 \right] \quad (3-36)$$

$$I_r(z, r) = \alpha(z) \cdot I_{0r} \left(\frac{W_0}{w_{SU8}(z)} \right)^2 \cdot \exp \left[-2 \left(\frac{r}{w_{SU8}(z)} \right)^2 \right] \quad (3-37)$$

ist. Hier ist der *i*-UV-Laserstrahl mit I_{0r} eine imaginäre Quelle. Daher muss der Ausdruck der Gleichung Gl.3-37 als die reflektierende Intensität in Bezug auf die einfallende Intensität umformuliert werden. Dann ist $I_r(z, r)$ wie folgt gegeben:

$$I_r(z, r) = \alpha(2D - z) \cdot R \alpha(D) I_{0i} \left(\frac{W_0}{w_{SU8}(2D - z)} \right)^2 \cdot \exp \left[-2 \left(\frac{r}{w_{SU8}(2D - z)} \right)^2 \right] \quad (3-38)$$

Dabei ist D die Schichtdicke des Fotoresists, R der Reflexionsgrad der Waferoberfläche und I_{0i} die einfallende Intensität ($I_{0i} = I_0$).

3.3.4 Einfluss des Strahlfokus auf das Profil

Zur einfachen Abschätzung des Profils der mittels des Gaußschen Strahls belichteten Struktur wird hier auch ein Modell ähnlich wie das Modell – *Threshold Model* – in der Maskenbelichtung (Kapitel 3.2) eingeführt. Damit wird das Profil der belichteten Resiststruktur in Abhängigkeit des Strahlfokus – *On-* und *Out-of-Focus* – betrachtet (Abb.3-40): Bei *On-Focus* liegt der Strahlfokus an der Resistoberfläche, während bei *Out-of-Focus* der Fokus höher als die Resistoberfläche positioniert ist, wobei g der Abstand zwischen Strahlfokus und Resistoberfläche ist.

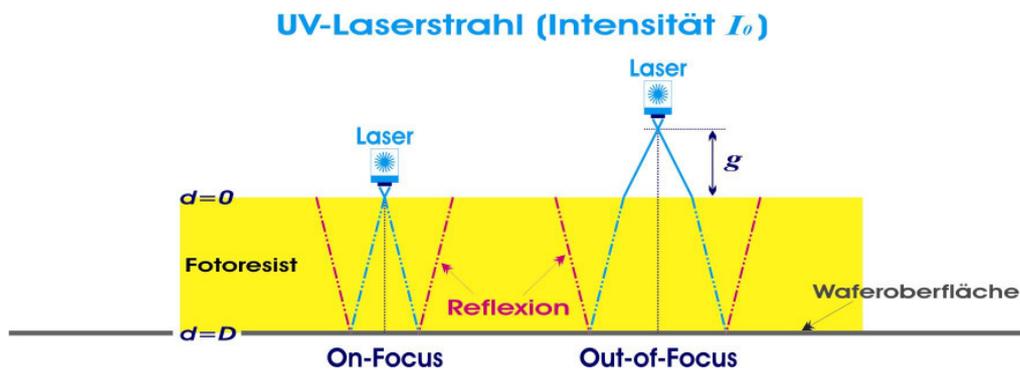


Abb.3-40 Schematische Darstellung einer Laserdirektbelichtung in Abhängigkeit des Strahlfokus

Bei der Laserdirektbelichtung ist die Belichtungszeit t_e meistens fixiert. In der Regel kann die eingesetzte Energie (Intensität $I_0 \times$ Belichtungszeit t_e) statt der Belichtungszeit t_e durch die Variation der Leistung bzw. der Intensität des Lasers eingestellt werden. Dies bedeutet, dass der Kriteriumsfaktor k (Kapitel 3.2) nur allein durch die Intensität I_0 kontrolliert werden kann; bei einer großen Intensität wird k kleiner, bei einer kleinen Intensität k größer. Das Profil der belichteten Resiststruktur ist allein durch die Intensität I_0 zu bestimmen.

Strahlfokus an der Resistoberfläche (On-Focus)

Hier wird die tiefenbedingte Intensitätsverteilung betrachtet, wobei die Fokusebene an der Resistoberfläche ($z = d = 0 \mu\text{m}$) liegt. In Abb.3-41 sind die normierten Intensitätsverteilungen $I_N(z, r) = I(z, r)/I_0$ in Abhängigkeit der Tiefe z übereinander dargestellt. In Abb.3-41(b) ist eine Vergrößerung gezeigt, um den Verlauf zu besser sehen. In Abb.3-41(c) ist eine seitliche Vergrößerung dargestellt, um das Profil der belichteten Resiststruktur auf Basis von k berechnen zu können. Dabei beträgt die Strahltaile W_0 ca. $0.7 \mu\text{m}$ und die Wellenlänge λ ist 365 nm . Daraus ergibt sich z_R ca. $4.24 \mu\text{m}$.

In Abb.3-42 sind die berechneten Profile in Abhängigkeit von k bei $g = 0 \mu\text{m}$ dargestellt: Mit abnehmender k (steigender Intensität oder Leistung) bei einer fixierten Belichtungszeit t_e ist der Verlauf des Profils dargestellt. Dabei ist eine Vergrößerung der Strukturbreite deutlich zu erwarten, wobei die Laserstrahlachse in der Position von $0 \mu\text{m}$ liegt.

Für $0.0005 \leq k \leq 0.002$ weisen die Profile gemäß Abb.3-42 keine Hinterschneidung auf. Jedoch ist hier die unerwünschte Vergrößerung zu sehen. Für $k = 0.008$ ist ein gekrümmtes Profil zu erwarten. Eine Hinterschneidung und eine starke Verbreiterung der Struktur können für $k = 0.0001$ auftreten.

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

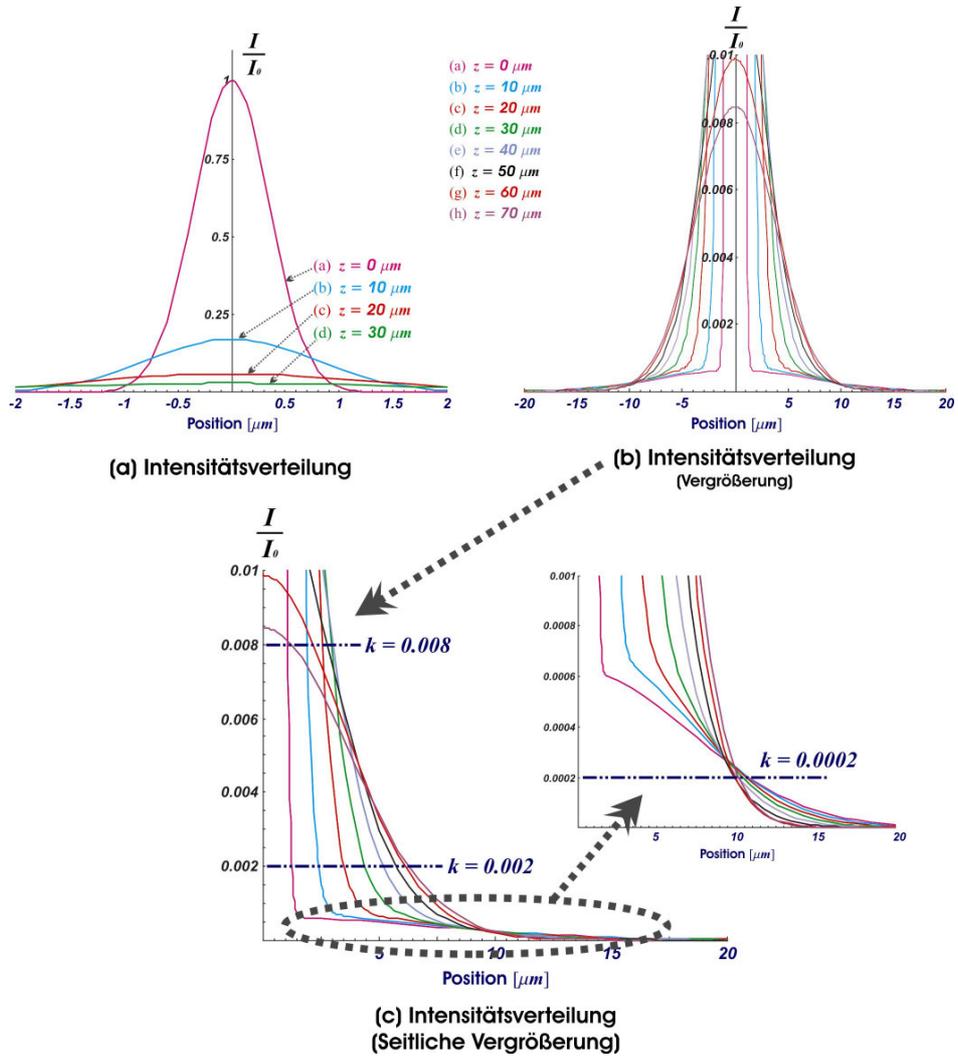


Abb.3-41 Abschätzung des Profils auf Basis von $I_N(z, r)$ (On-Focus)

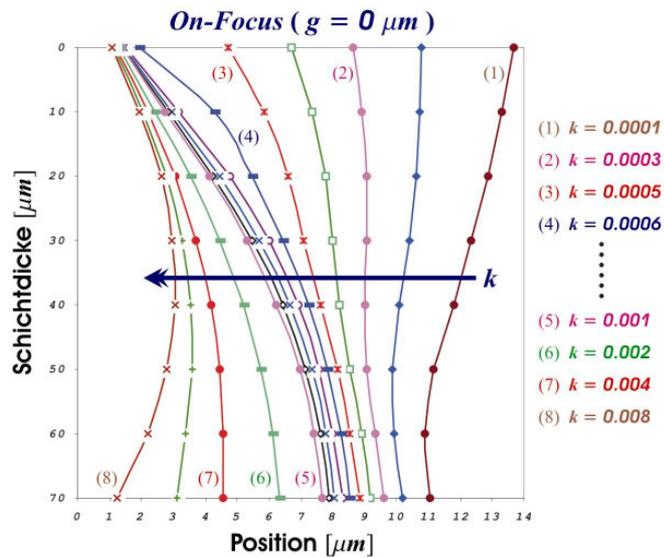


Abb.3-42 Berechnete Profile in Abhängigkeit von k (On-Focus)

Strahlfokus über der Resistoberfläche (Out-of-Focus)

Wie bereits in Abb.3-43 gezeigt, muss bei der Belichtung mit "Out-of-Focus" zuerst der Strahlradius in SU-8 in Abhängigkeit von g beachtet werden. Dann muss die Gleichung Gl.3-33 umgeschrieben werden. Für $z < g$ ist der Strahlradius unverändert gleich $w(z)$ in Luft. Für $z \geq g$ (ab $d = 0 \mu\text{m}$) wird $w_{SU8g}(z)$ wie folgt beschrieben:

$$w_{SU8g}(z) = w(g) + (z - g) \cdot \tan \theta_{SU8} \quad (3-39)$$

Beispielsweise positioniert bei "Out-of-Focus" die Fokusebene ($z = 0 \mu\text{m}$) ca. $50 \mu\text{m}$ höher als die Resistoberfläche ($z = 50 \mu\text{m}$ und $d = 0 \mu\text{m}$), d.h., $g = 50 \mu\text{m}$. Dann müssen die Gleichungen Gl.3-35, Gl.3-36 und Gl.3-38 unter der Berücksichtigung des Abstands g wie folgt umgeschrieben werden:

$$I_g(z, r) \cong I_{ig}(z, r) + I_{rg}(z, r) \quad (3-40)$$

mit

$$I_{ig}(z, r) = \alpha(z - g) \cdot I_{0ig} \left(\frac{W_0}{w_{SU8g}(z)} \right)^2 \cdot \exp \left[-2 \left(\frac{r}{w_{SU8g}(z)} \right)^2 \right] \quad (3-41)$$

$$I_{rg}(z, r) = \alpha(2D - (z - g)) \cdot R \alpha(D) I_{0ig} \left(\frac{W_0}{w_{SU8g}(2D + 2g - z)} \right)^2 \cdot \exp \left[-2 \left(\frac{r}{w_{SU8g}(2D + 2g - z)} \right)^2 \right] \quad (3-42)$$

Dabei ist D die Schichtdicke des Fotoresists, R der Reflexionsgrad der Waferoberfläche und I_{0ig} die einfallende Intensität ($I_{0ig} = I_g(g, 0)$).

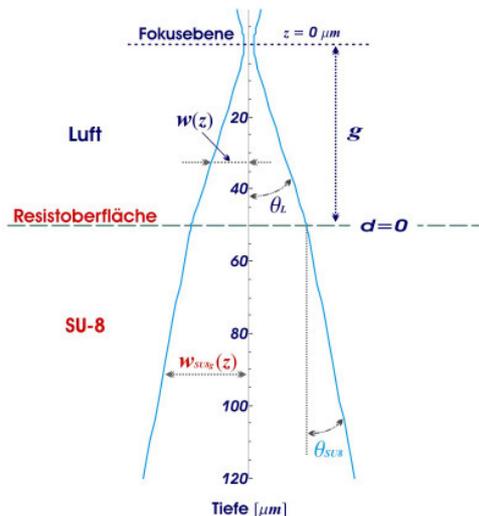


Abb.3-43 Tiefenbedingter Verlauf des Strahlradius in SU-8 (Out-of-Focus)

Kapitel 3. Theoretische Untersuchungen

In Abb.3-44 sind die normierten Intensitätsverteilungen $I_{Ng}(z, r) = I_g(z, r)/I_g(g, 0)$ in Abhängigkeit der Tiefe z übereinander dargestellt, wobei g ca. $50 \mu\text{m}$ beträgt. Im Vergleich zu "On-Focus" ist hier die starke Änderung der Intensität nicht zu sehen. Jedoch verbreitert sich die Intensitätsverteilung stark wegen der Strahldivergenz. Dies bedeutet, dass eine starke Verbreiterung der belichteten Struktur wahrscheinlich zu erwarten ist.

In Abb.3-45 sind die berechneten Profile in Abhängigkeit von k bei $g = 50 \mu\text{m}$ dargestellt: Mit abnehmender k (steigender Intensität oder Leistung) bei einer fixierten Belichtungszeit t_e ist der Verlauf des Profils dargestellt. Die abgeschätzten Profile weisen keine Hinterschneidung auf, jedoch ist die starke Verbreiterung zu sehen.

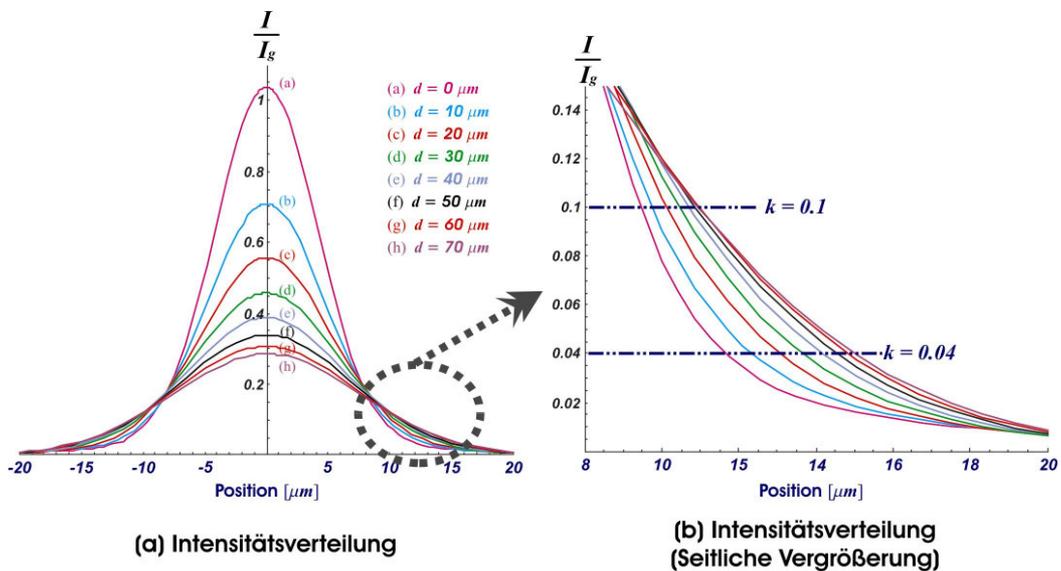


Abb.3-44 Abschätzung des Profils auf Basis von $I_{Ng}(z, r)$ bei $g = 50 \mu\text{m}$ (Out-of-Focus)

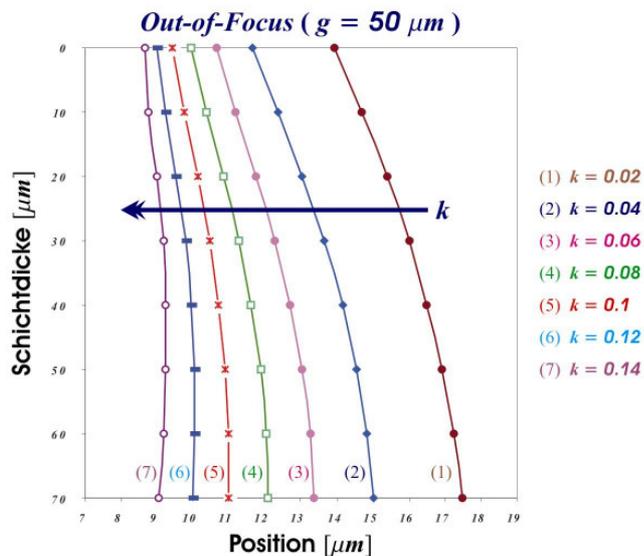


Abb.3-45 Berechnete Profile in Abhängigkeit von k (Out-of-Focus)

3.3.5 Belichtung auf Basis der verkleinerten Soll-Breite

Gemäß den abgeschätzten Profilen in Abb.3-42 (*On-Focus*) und Abb.3-45 (*Out-of-Focus*) ist die Hinterschneidung durch die Wahl nach einer geeigneten Leistung P_L zu vermeiden. Jedoch ist dabei die Vergrößerung der Strukturbreite zu erwarten: Bei *On-Focus* in Abb.3-42 beträgt die einseitige Verbreiterung der belichteten Resiststruktur bis zu ca. $9\ \mu\text{m}$, während bei *Out-of-Focus* in Abb.3-45 sie oberhalb von ca. $9\ \mu\text{m}$ liegt, d.h., bei *On-Focus* ist die geringere Vergrößerung der Strukturbreite zu erwarten. Soll eine Belichtung ohne Hinterschneidung erreicht werden, so sollte die Belichtung auf Basis von *On-Focus* aufgrund der geringeren Verbreiterung der belichteten Resiststruktur verwendet werden, indem bei der Belichtung die Leistung P_L bzw. der Intensität I_0 des Lasers kontrolliert wird.

Bei der Laserdirektbelichtung wird der Strahl direkt gesteuert – entsprechend der Information aus dem CAD-System, d.h., die belichtete Strukturbreite wird zuerst mit einer CAD-Software erstellt. Bei der Erstellung kann die Strukturbreite absichtlich verkleinert werden; beispielsweise wird statt der Soll-Breite $70.0\ \mu\text{m}$ die verkleinerte Soll-Breite $50\ \mu\text{m}$ zur Vermeidung der Verbreiterung verwendet. In Abb.3-46 ist ein Schema der Belichtung dargestellt; die Verbreiterung der Strukturbreite kann dadurch vermieden werden, dass unter Berücksichtigung der belichtungsbedingten Verbreiterung die Soll-Breite verkleinert wird.

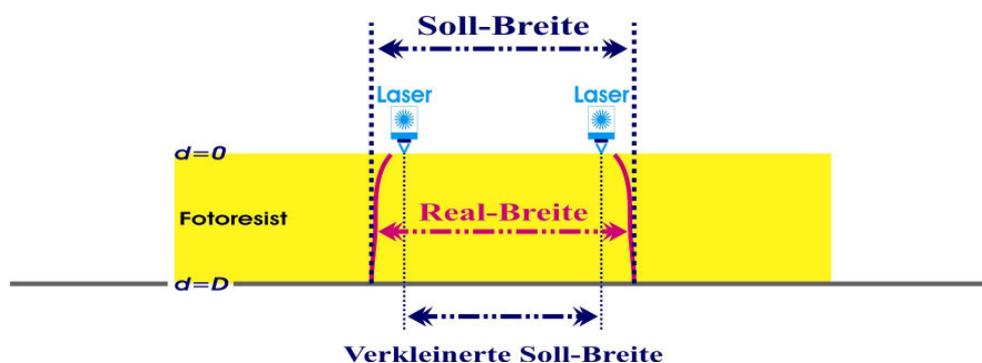


Abb.3-46 Schema der Belichtung zur Vermeidung der Verbreiterung der Struktur

Analog zur Maskenbelichtung werden die Profile einer mit dem Laserstrahl belichteten Resiststruktur durch Näherungen abgeschätzt, und damit wird ein Verlauf des Profils bei einer Fokushöhe (*On-* oder *Out-of-Focus*) in Abhängigkeit von der Leistung betrachtet. Durch die Betrachtung wird eine Belichtungsmethode auf Basis der verkleinerten Soll-Breite vorgestellt. Im nächsten Kapitel wird eine tendenzielle Übereinstimmung durch Experimente überprüft.

Kapitel 4

Experimentelle Untersuchungen zur Dickschicht-Mikrolithographie

In diesem Kapitel werden die im vorherigen Kapitel vorgestellten Belichtungsmethoden, die *Belichtung auf Basis der intentionalen Reflexion* und die *Laserdirektbelichtung*, experimentell untersucht, ob die experimentellen Ergebnisse der berechneten Tendenz auf Basis des Abschätzungsmodells entsprechen.

4.1 Mikrolithographie mit SU-8

In diesem Abschnitt wird der Negativ-Fotoresist SU-8 kurz erläutert. Anschließend wird die in dieser Arbeit verwendete Prozessierung von SU-8 beschrieben.

4.1.1 Negativ-Fotoresist SU-8

Der Fotoresist SU-8 besteht aus in einem Lösungsmittel GBL (Gamma-Butyrolacton) gelöstem Epoxidharz und einem Photoinitatorsalz (Triäthylm-Sulfonium) [13], und zeichnet sich durch eine hohe Empfindlichkeit, eine hohe Transparenz und eine chemische Beständigkeit aus.

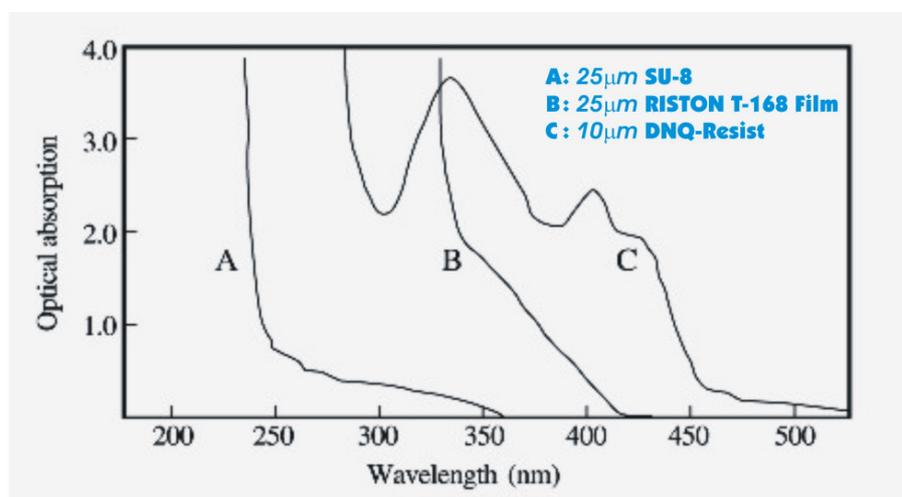


Abb.4-1 Absorptionsspektren [11]

Kapitel 4. Experimentelle Untersuchungen

Durch eine Veränderung der Konzentration des Lösungsmittels ist die Viskosität des Resists in einem großen Bereich einstellbar. Bei einer maximalen Konzentration von 85 % kann der Resist in einem Schritt von mehr als 200 μm Dicke aufgebracht werden. Aufgrund der hohen Transparenz kann diese dicke Schicht auch in einem Schritt belichtet werden. In Abb.4-1 ist das Absorptionsspektrum von SU-8 im Vergleich zu einem DNQ-Resist und einem RISTON T-168 Film exemplarisch gezeigt [11].

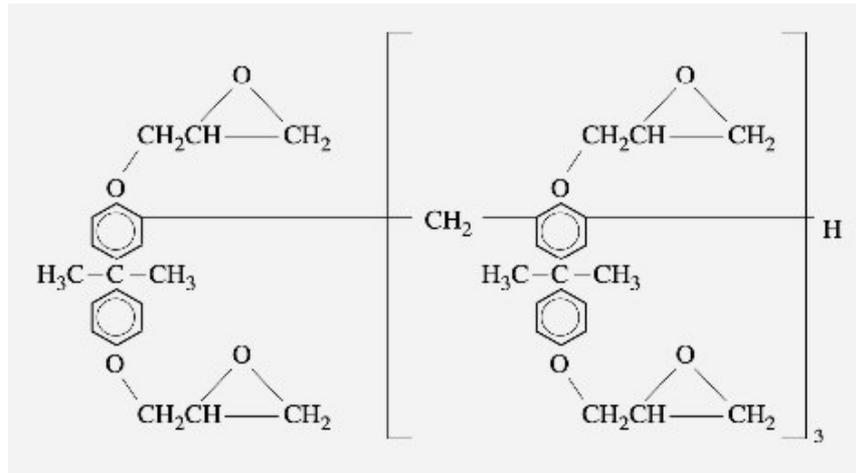


Abb.4-2 Glycidylether von Bisphenol-A: SU-8 [11]

Im Gegensatz zu einem Positiv-Fotoresist wie DNQ/Novolak-Resist beruht die Löslichkeitsdifferenz bei SU-8 auf der Vernetzung der Resistmoleküle, die durch die Belichtung gestartet wird; während der unbelichtete Bereich des Resists in geeigneten organischen Lösungsmitteln löslich ist, ist der vernetzte Bereich des Resists unlöslich. In Abb.4-2 ist der chemische Aufbau von SU-8 gezeigt [11].

Damit die Vernetzung der Moleküle stattfinden kann, muss ein Photoinitiator zugesetzt werden. Dies ist ein lichtempfindliches Salz, das im UV-Licht eine Säure freisetzt. Diese ermöglicht dann die Vernetzung der Moleküle in SU-8 zu einer matrixartigen, chemisch und thermisch sehr stabilen Struktur. Die unvernetzten Moleküle sind bei der Verarbeitung in einem organischen Lösungsmittel gelöst.

4.1.2 SU-8-Prozess

Hier wird die Prozessierung von SU-8, die auf den Empfehlungen der Hersteller basiert, zur Erzeugung der Vorform für Mikrostrukturen wie z.B. Multimode-Wellenleiter beschrieben. In Abb.4-3 ist der Überblick von SU-8-Prozess zur Vorformherstellung grob dargestellt.

Präparation

- . Reinigung von Wafer
- . Metallisierung von Waferoberfläche
(Option: Belichtungsmethodebedingt)



Haftschicht mit SU-8-2

- . Beschichtung mittels Spin-Coating
- . Soft-Bake
- . Flutbelichtung
- . Post Exposure Bake (Optional)



Strukturschicht mit SU-8-50

- . Beschichtung mittels Spin-Coating
- . Soft-Bake



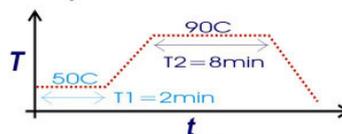
Belichtung

- . Belichtungsmethoden
 1. Maskenbelichtung
 2. Laserdirektbelichtung



Post Exposure Bake (PEB)

Multi-Step PEB auf Hot-Plate



Entwicklung

Photolithographische Vorform



Abb.4-3 Überblick von SU-8-Prozess zur Vorformherstellung

Präparation

Um eine optimale Haftung des Fotoresists auf dem Wafer zu gewährleisten, muss dieser zunächst gesäubert werden: Dies geschieht mit einer Mischung aus einem fettlösenden Mittel (Mucasol) und Wasser. Anschließend wird der Wafer im Druckluftstrom getrocknet und für einige Stunden in einem 160 °C heißen Ofen dehydriert. Belichtungsmethodenbedingt kann die Oberfläche des Wafers metallisiert werden. Eine metallisierte Oberfläche dient als Reflektor, der zur zwingenden Verstärkung der Reflexion an der Waferoberfläche erforderlich ist, bei der *Reflexionsbelichtung* (Kapitel 4.2).

Haftschicht mit SU-8-2

Der Fotoresist SU-8 zeigt schlechte Hafteigenschaften auf dem Wafer [06]; schmale Strukturen lösen sich bei der Entwicklung ab, während zusammenhängend bedeckte, größere Flächen haften bleiben. Hier kann die Haftung durch Aufbringen einer dünnen Haftschicht verbessert werden. Daher wird eine niedrigviskose Sorte SU-8-2 zuerst auf den Wafer mittels Spin-Coating aufgebracht, wobei die Schichtdicke ca. $2\text{ }\mu\text{m}$ beträgt. Dann wird der flüssige SU-8-2 für ca. 20 min in einem 90 °C heißen Umluftofen stabilisiert (Soft-Bake). Der belackte Wafer wird ohne Maske komplett von oben belichtet (Flutbelichtung).

Um kein Post Exposure Bake (PEB) durchführen zu müssen, wird der belackte Wafer bei der Flutbelichtung für die lange Belichtungszeit ca. 50 sec (1000 mJ/cm^2) belichtet. Danach wird der Wafer zur Vernetzung des belichteten SU-8-2 für mindestens 15 Stunden bei 25 °C liegen gelassen. Auf diese Weise werden die Spannungen, welche zu späteren Rissen führen, reduziert, und nach der Entwicklung treten keine Risse auf [05]. Stattdessen kann nach der Flutbelichtung für die Belichtungszeit ca. 50 sec auch PEB ca. 5 min in einem 90 °C heißen Umluftofen durchgeführt werden.

Strukturschicht mit SU-8-50

Für die Strukturschicht wird die höherviskose Sorte SU-8-50 verwendet. Zuerst wird die Strukturschicht auf den mit der Haftschicht SU-8-2 beschichteten Wafer mittels Spin-Coating aufgebracht. Dann wird die belackte Schicht SU-8-50 für ca. 60 min in einem 90 °C heißen Umluftofen stabilisiert (Soft-Bake).

Belichtung

Der Resist SU-8 ist ein Negativ-Resist, daher löst sich beim Entwickeln der unbelichtete Bereich des Resists im Entwickler. Eine typische Eigenschaft von Negativ-Resist ist, dass

die Seitenwand des Resists durch die ungünstige Intensitätsverteilung wegen der Beugung und die abfallende Intensität wegen der Dämpfung im Resist stets die Hinterschneidung aufweisen.

Diese Hinterschneidung kann beim späteren Prozess wie einem Abformverfahren ein zerstörungsfreies Trennen von Vorform und Substrat verhindern. Aus diesem Grund werden beim SU-8-Prozess Belichtungsmethoden zur Vermeidung der Hinterschneidung entwickelt:

1. **Reflexionsbelichtung (Maskenbelichtung)**
2. **Laserdirektbelichtung**

Post Exposure Bake (PEB)

Die chemischen Veränderungen des SU-8-Resists, die später eine Strukturierung ermöglichen, werden durch die UV-Bestrahlung bei der Belichtung lediglich gestartet; sie sind mit Ende der Belichtungszeit noch nicht abgeschlossen. Damit der belichtete Resist später dem Entwickler widersteht, muss er einige Zeit bei erhöhter Temperatur vernetzen. Dies geschieht durch das sog. Post Exposure Bake (PEB).

Durch PEB – Multi-Step PEB in Abb.4-3 – können die Vernetzungsreaktionen, die durch die Belichtung gestartet wurden, vollständig ablaufen: Der belichtete Wafer wird bei Raumtemperatur auf die Hot-Plate gelegt. Danach wird die Temperatur gemäß den Empfehlungen des Herstellers zunächst z.B. für *2 min* auf *50 °C*, für *8 min* auf *90 °C* gehalten.

Abschließend wird das Heizelement abgeschaltet, und die Hot-Plate kühlt langsam ab. Durch die Wärmekapazität der Hot-Plate ist der Abkühlvorgang bestimmt und kann nicht variiert werden.

Entwicklung

Die Entwicklung (SU-8-Entwickler der Fa. *Microresist*) der belichteten Wafers erfolgt im Tauchverfahren mithilfe einer Entwicklungsanlage, welche mit einer Pumpe zur Umwälzung des Entwicklers versehen ist.

Anschließend ist eine Säuberung des entwickelten Wafers erforderlich, da bei der Entwicklung einige unerwünschte Partikel auf der Oberfläche der entwickelten Strukturen vorhanden sein können: Der entwickelte Wafer wird auf dem Drehteller des Spin-Coaters durch ein Vakuum in seiner Position gehalten. Dann wird der Drehteller mit der niedrigen Umdrehung (ca. *800 rpm*) gestartet. Durch die bei der Rotation entstehenden Fliehkräfte wird der Wafer mit dem frischen Entwickler gesäubert. Bis zur vollständigen Verdunstung des Entwicklers wird der Wafer weitergedreht.

4.2 Reflexionsbelichtung

Im Kapitel 3.2.3 wird eine Belichtungsmethode auf Basis der Reflexion vorgestellt. Gemäß der Abschätzung in Abb.3-23 ist *eine Kompensation des hinterschnittenen Resistprofils durch die Reflexion* zu erwarten.

In Abb.4-4 ist eine schematische Darstellung der Reflexionsbelichtung gezeigt. Hierbei muss vor der Belackung die Waferoberfläche metallisiert werden oder mit einer zu reflektierenden Schicht versehen werden. Wie bereits erwähnt, werden hier zwei Metalle, Silber (Ag) und Chrom (Cr), verwendet, da im Vergleich zu Si-Waferoberfläche die beiden Metalle den stärkeren Reflexionsgrad aufweisen (Tab 3-1). Ag- oder Cr-Schicht als ein Reflektor wird auf die Waferoberfläche durch Sputtern (BAK 605, Firma Balzer) aufgebracht, wobei die Schichtdicke ca. 200 nm beträgt.

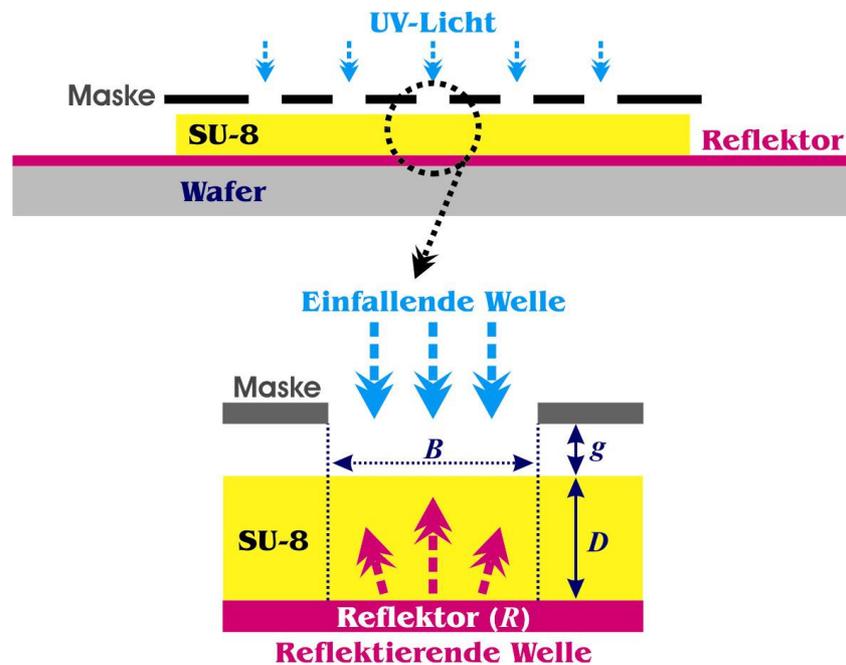


Abb.4-4 Schematische Darstellung der Reflexionsbelichtung auf Basis der intentionalen Reflexion

Im Folgenden wird durch die experimentellen Untersuchungen die vorgestellte Reflexionsbelichtung betrachtet, ob damit die Hinterschneidung vermieden werden kann und ob die experimentellen Ergebnisse der berechneten Tendenz entsprechen. Wie bereits in Kapitel 3.2.3 erwähnt, ist die Tendenz des Resistprofils mit Hilfe des vorgestellten Abschätzungsmodells zu erkennen, da das Modell nur auf Intensitätsverteilungen (nur Belichtungsvorgang) beruht. In der Literatur [08, 24, 45] wird berichtet, dass das Profil durch folgende Prozesse wie Entwicklung und Temperung (PEB) beeinflusst werden kann.

Kapitel 4. Experimentelle Untersuchungen

Der Belichtungsschritt wird mit dem konventionellen Belichter (MA-6, Firma Karl Süss) durchgeführt. Hier arbeitet der Belichter MA-6, bestehend aus einer Quecksilberdampfampe und mehreren Spektralfiltern, mit Wellenlängen von 365 nm , 405 nm und 435 nm , wobei die Lichtintensität bei der Wellenlänge von 365 nm ca. 20.0 mW/cm^2 beträgt.

Bei der Belichtung werden die mit SU-8-50 belackten Wafer verwendet, wobei die Schichtdicke D meistens ca. $70.0\text{ }\mu\text{m}$ beträgt. Die Wafer werden durch die Maske, deren Öffnungsbreite $B = 70\text{ }\mu\text{m}$ beträgt, für gerade Multimode-Wellenleiter belichtet.

Bei der Reflexionsbelichtung können die verschiedenen Parameter berücksichtigt werden, um einen Einfluss auf das Profil experimentell zu untersuchen. Hierbei sind praktikable Parameter wie z.B. der Reflexionsgrad R , die Belichtungszeit t_e , der Abstand g zwischen der Maske und der Resistoberfläche und die Schichtdicke D denkbar. Hierzu können außer den oben genannten Parametern auch andere Faktoren wie z.B. die Oberflächenrauheit eines Substrates und die Brechung von UV-Licht beim Übertritt von Luft in SU-8 in Betracht gezogen werden. Jedoch können diese Faktoren vermutlich ignoriert werden, da die Si-Waferoberfläche eine sehr niedrige Rauheit (etwa unter 5.0 nm) aufweist und meistens das UV-Licht zu der Resistoberfläche senkrecht ausgerichtet ist.

Unten zusammenfassend ist das Profil als eine Funktion von den oben genannten praktikablen Parametern – R , t_e , g und D – dargestellt.

Profil = Funktion (R , t_e , g , D)

R : Reflexionsgrad

t_e : Belichtungszeit

g : Abstand zwischen Maske und SU-8

D : Schichtdicke

Photoresistprofile in Abhängigkeit von Reflexionsgrad R

In Abhängigkeit von R werden die Profile und die Oberflächen der Seitenwand untersucht, wobei für $t_e = 30\text{ sec}$ (gleichen k oder gleiche Belichtungs-dosis) drei Wafer – Si-Wafer ($R = 0.5$), Cr-Reflektor ($R = 0.76$) und Ag-Reflektor ($R = 0.9$) – belichtet werden. Hierbei wird die Randwulst absichtlich nicht beseitigt, um den Abstand g im Bereich von $20.0 - 30.0\text{ }\mu\text{m}$ zu gewinnen.

Kapitel 4. Experimentelle Untersuchungen

Im Vergleich zu berechneten Profilen in Abb.3-23 zeigen die Profile in Abb.4-5 eine tendenzielle Übereinstimmung. Wie die Abschätzung weist das Profil ($R = 0.5$, Si-Wafer) in Abb.4-5(a) eine quasi-vertikale Linie (jedoch geringfügig hinterschnitten, *negativer Flankenwinkel* ca. -0.1°) auf, während mit steigendem R ($R = 0.76$ und 0.9) die Profile in Abb.4-5(b) und (c) keine Hinterschneidung (*positiver Flankenwinkel*: ca. 1.2° bei Cr-Reflector und ca. 2.0° bei Ag-Reflector) zeigen, und die Verbreiterung der belichteten Resiststruktur (*Boden-Breite* ca. $76.0 \mu\text{m}$ bei Cr-Reflector und ca. $78.0 \mu\text{m}$ bei Ag-Reflector, während ca. $70.8 \mu\text{m}$ bei Si-Wafer) ist erkennbar.

In Abb.4-5(d), (e) und (f) sind reflexionsgradabhängige Oberflächen der Seitenwand gezeigt. Mit steigendem R wird die Oberflächenrauheit (R_a) der Seitenwand der belichteten Resiststruktur immer größer und die Kante des Bodens immer runder. Vermutlich ist die starke Streuung wegen der verstärkten Reflexion an der Waferoberfläche für die gerundete Kante und die geringfügige Verschlechterung der Rauheit verantwortlich. Jedoch weist die Rauheit bei Ag-Reflector eine gute Qualität auf.

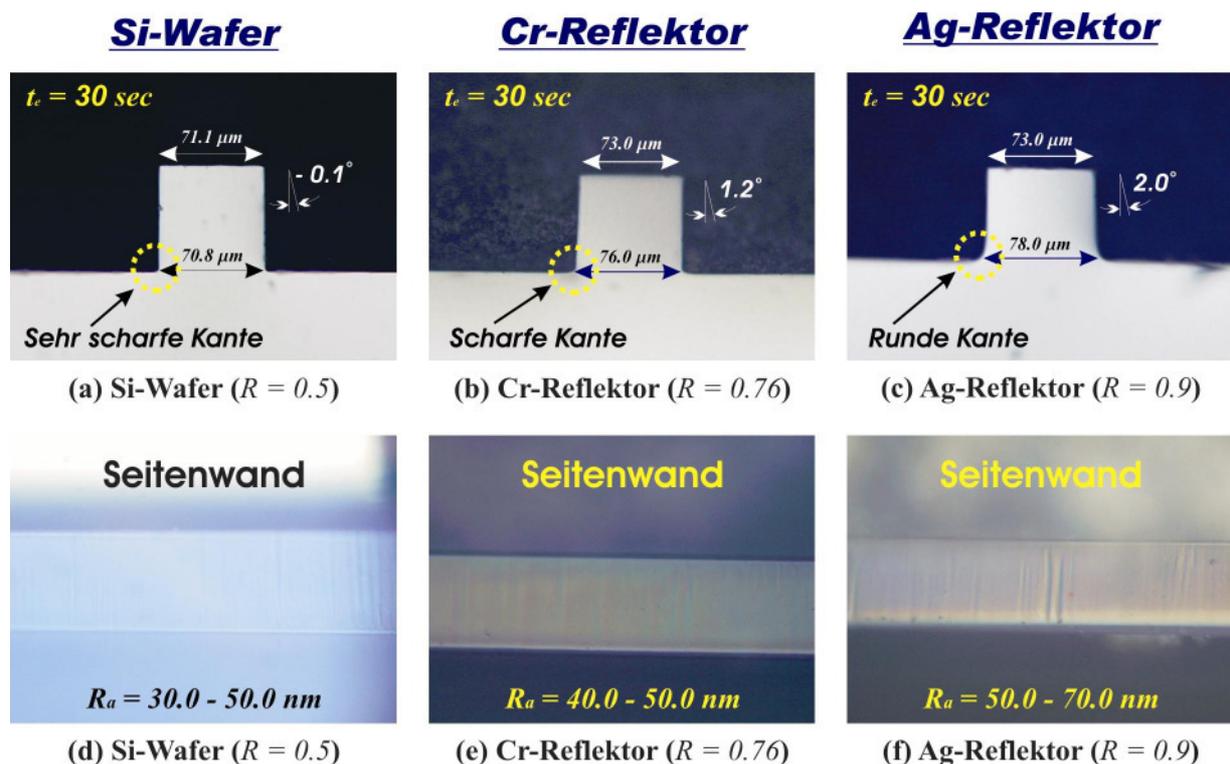


Abb.4-5 Profile und Oberflächen der Seitenwand in Abhängigkeit von R :

Mit steigendem R ist die Vermeidung der Hinterschneidung zu sehen. Negativer Flankenwinkel von ca. -0.1° (geringfügig hinterschnitten) bei Si-Wafer ($R = 0.5$), während positiver Flankenwinkel von ca. 1.2° bei Cr-Reflektor ($R = 0.76$) und ca. 2.0° bei Ag-Reflektor ($R = 0.9$). Jedoch sind die Verbreiterung der belichteten Resiststruktur und die geringfügige Verschlechterung der Rauheit der Seitenwand erkennbar.

Photoresistprofile in Abhängigkeit von Abstand g

Im Allgemein weist der mittels Spin-Coater belackte Wafer eine *Randwulst* (Abb.3-2) auf, die sich wegen der Oberflächenspannung des Fotoresists am Rand des Wafers bildet und ca. $20.0 - 30.0 \mu\text{m}$ höher als die Resistoberfläche ist (Kapitel 3.1). Dadurch ergibt sich bei der Belichtung ein ebenso großer Abstand g zwischen der Maske und der Resistoberfläche.

Durch die Beseitigung der Randwulst kann der Wafer mit einem quasi-idealen Kontakt belichtet werden. Jedoch kann hier der Abstand g wegen der Welligkeit (Abb.3-2) oder/und der unerwünschten Partikel auf der Resistoberfläche nicht als einen idealen Kontakt ($g = 0$) betrachtet werden. Aus diesem Grund kann bei Belichtung des randwulstfreien Wafers auch der sehr geringe Abstand (hier, $g = \text{ca. } 4.0 \mu\text{m}$) angenommen werden.

Bei der Untersuchung der Profile in Abhängigkeit von g wird der Wafer mit Randwulst und ohne Randwulst belichtet, wobei der Ag-Reflektor verwendet wird. In Abb.4-6 sind die Profile in Abhängigkeit von g , wobei die Belichtungszeit t_e 30 sec beträgt.

Gemäß Abschätzung in Abb.3-28(b) sind mit steigendem g , wie z.B. von $g = 4.0 \mu\text{m}$ zu $g = 25 \mu\text{m}$, geringfügige Änderungen, *eine kleine Verbreiterung und eine kleine Änderung des Flankenwinkels der belichteten Resiststruktur*, zu erwarten. Abb.4-6 zeigt experimentelle Ergebnisse. Hier ist die kleine Änderung des Flankenwinkels von ca. 0.5° zu erkennen, aber die Vergrößerung der Strukturbreite kaum erkennbar. Dies wird vermutlich an einem Einfluss auf das Profil während einer Entwicklung und Temperung liegen, da der berechnete Unterschied (unter $0.5 \mu\text{m}$) in Abb.3-28(b) sehr klein ist.

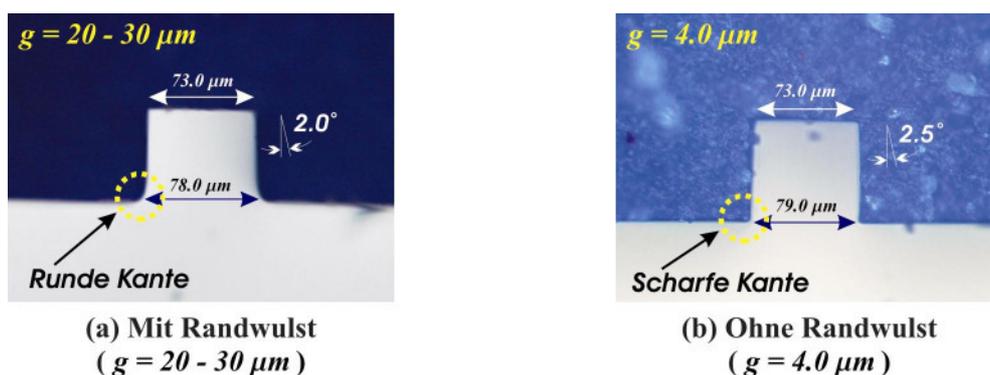


Abb.4-6 Profile in Abhängigkeit von g bei Ag-Reflektor:

Mit steigendem g wird der beugungsbedingte Divergenzwinkel immer stärker. Dies führt besonders zu der runden Kante am Boden aufgrund der winkelbedingten Reflexion.

Wie in Abb.4-6 gezeigt, weist das Profil bei dem geringen Abstand ($g = 4.0 \mu\text{m}$) in Abb.4-6(b) eine gerade Linie auf. Im Vergleich dazu zeigt das Profil ($g = 20.0 - 30.0 \mu\text{m}$) in Abb.4-

6(a) die runde Kante am Boden und die gekrümmte Linie. Dies würde auf der Streuung an der metallisierten Waferoberfläche beruhen; mit steigendem g breitet sich die Intensitätsverteilung aufgrund einer beugungsbedingten Divergenz unter die Maske (laterale Ausbreitung) aus.

Photoresistprofile in Abhängigkeit von Belichtungszeit t_e

Hier wird die Änderung der Profile, besonders *der Flankenwinkel*, in Abhängigkeit von t_e betrachtet, wobei der randwulstfreie Wafer, d.h. $g = 4.0 \mu\text{m}$, belichtet wird und die Ag-Schicht als ein Reflektor benutzt wird. In Abb.4-7 sind die Profile in Abhängigkeit von t_e (10 sec, 30 sec, 60 sec und 120 sec) gezeigt. Mit steigender t_e vergrößert sich der Flankenwinkel, wobei die deutliche Vergrößerung der Strukturbreite erkennbar ist.

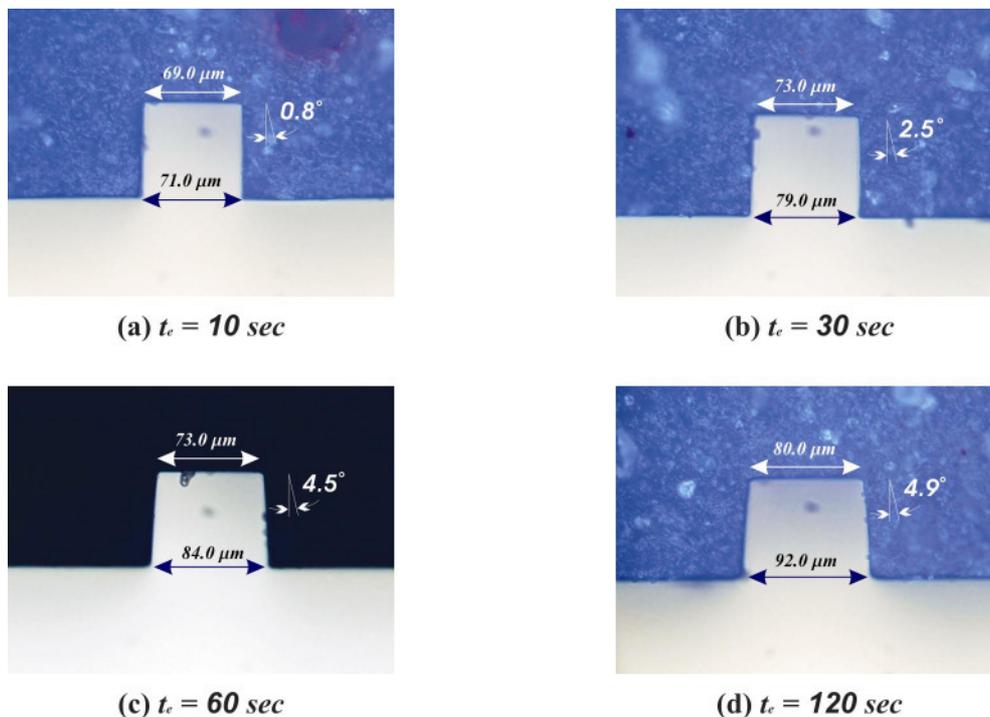


Abb.4-7 Profile in Abhängigkeit von t_e . bei Ag-Reflektor:

Mit steigender t_e (steigender Belichtungs-dosis) weisen die Profile einen steigenden Flankenwinkel und eine Vergrößerung der Strukturbreite auf.

Die berechneten Profile in Abb.3-27(b) weisen mit steigender t_e (steigender Belichtungs-dosis) eine Tendenz – einen *steigenden Flankenwinkel* und eine Vergrößerung der Strukturbreite – auf. Die Tendenz der Profile in Abb.4-7 entspricht der Abschätzung in Abb.3-27(b). Es scheint nach Abschätzung, als ob ein Verhältnis zwischen dem Flankenwinkel und der Belichtungszeit (Belichtungs-dosis) quasi linear wäre. Nach

Kapitel 4. Experimentelle Untersuchungen

experimentellen Ergebnissen in Abb.4-7 ist das Verhältnis nicht linear (Abb.4-8). Bis $t_e = 60 \text{ sec}$ tritt ein quasi-lineares Verhalten zwischen dem Winkel und t_e auf. Jedoch neigt die Tendenz ab $t_e = 60 \text{ sec}$ zu einer Quasi-Sättigung; zwischen 60 sec und 120 sec ist eine kleine Änderung des Winkels von ca. 0.5° erkennbar. Zur Überprüfung dieses Verhaltens (Sättigung) wird der randwulstfreie Wafer mit sehr langen Belichtungszeit (300 sec) belichtet. Wie in Abb.4-9 gezeigt, weist das Profil eine sehr stark gekrümmte Linie und einen Knickpunkt im unteren Bereich auf. Dies liegt vermutlich daran, dass sich die Intensität wegen der langen Belichtungszeit unter die Maske stark lateral ausbreitet und die stark diffuse Reflexion wegen der Oberflächenrauheit besonders im näheren Bereich an der metallisierten Waferoberfläche stattfindet.

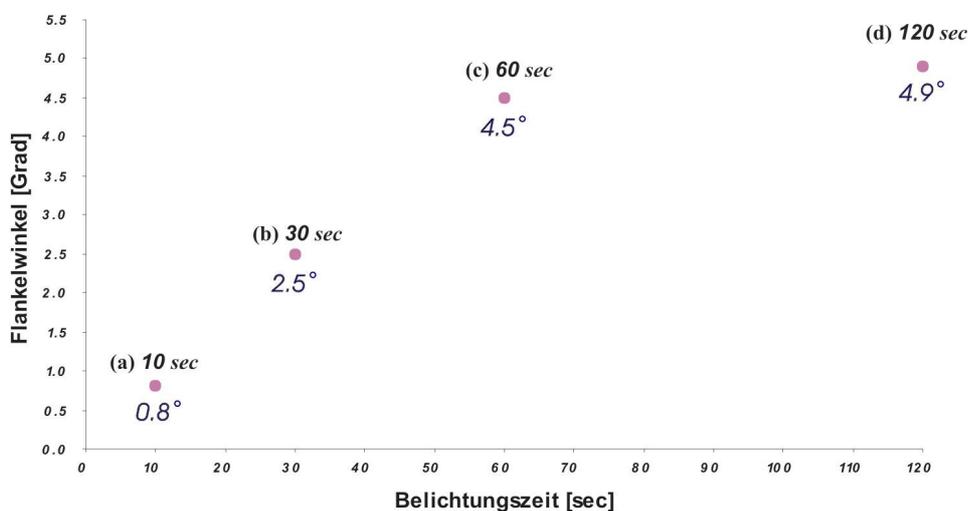


Abb.4-8 Flankenwinkel in Abhängigkeit von t_e bei Ag-Reflektor:

Bis $t_e = 60 \text{ sec}$ tritt ein quasi-lineares Verhalten zwischen dem Winkel und t_e auf. Jedoch neigt die Tendenz ab $t_e = 60 \text{ sec}$ zu einer Quasi-Sättigung; zwischen 60 sec und 120 sec ist eine kleine Änderung des Winkels von ca. 0.5° erkennbar.

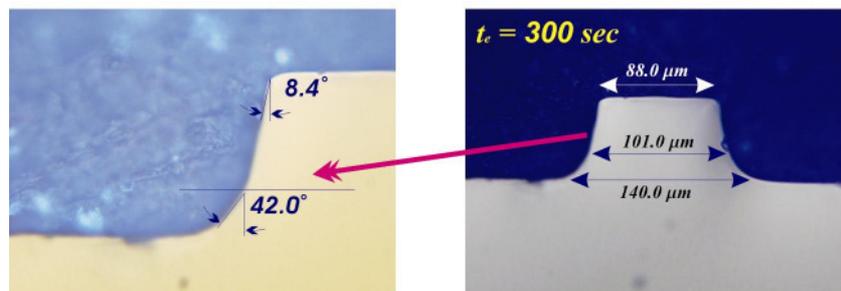


Abb.4-9 Profil für sehr lange Belichtungszeit $t_e = 300 \text{ sec}$ bei Ag-Reflektor:

Aufgrund der lateralen Ausbreitung unter die Maske und der diffusen Reflexion an der Waferoberfläche weist das Profil eine sehr stark gekrümmte Linie und einen Knickpunkt im unteren Bereich.

Kapitel 4. Experimentelle Untersuchungen

Abgesehen von der Strukturbreite ist das Resistprofil (Flankenwinkel) durch die Belichtungszeit t_e bis zum begrenzten Winkel (hier, ca. 4.5° bei Ag-Reflektor) quasi-linear zu kontrollieren.

Photoresistprofile in Abhängigkeit von Schichtdicke D

Bislang wurden die Profile bei dem gleichen Schichtdicke D (ca. $70.0 \mu\text{m}$) bei unterschiedlichen R , g und t_e betrachtet. Hier dagegen werden die Profile in Abhängigkeit von D experimentell untersucht, da mit steigender Schichtdicke der Beugungseffekt und die Dämpfung im Fotoresist immer stärker werden, so dass die Hinterschneidung aufgrund der *nicht ausreichenden* Reflexion erscheinen kann.

In Abb.4-10 sind die Profile in Abhängigkeit von D ($70.0 \mu\text{m}$, $100.0 \mu\text{m}$ und $150.0 \mu\text{m}$) gezeigt, wobei der Ag-Reflektor beschichtete und randwulstfreie Wafer, d.h. $g = 4.0 \mu\text{m}$, belichtet wird und die Belichtungszeit $t_e = 60 \text{ sec}$ beträgt. Hierbei weisen die Profile zuerst keine Hinterschneidung auf. Mit steigendem D wird der Flankenwinkel immer kleiner. Bei der Schichtdicke von $150.0 \mu\text{m}$ ist ein Wendepunkt (Höhe ca. $60.0 \mu\text{m}$ von der Waferoberfläche) des Flankenwinkels erkennbar. Durch die lange Belichtungszeit kann die ausreichende Reflexion über die Gesamtschichtdicke stattfinden, so dass der Hinterschneidungseffekt kompensiert werden kann. Wenn hier die Belichtungszeit geringer wird, kann wahrscheinlich eine Hinterschneidung bei einer hohen Schichtdicke wie z.B. $150.0 \mu\text{m}$ erscheinen.

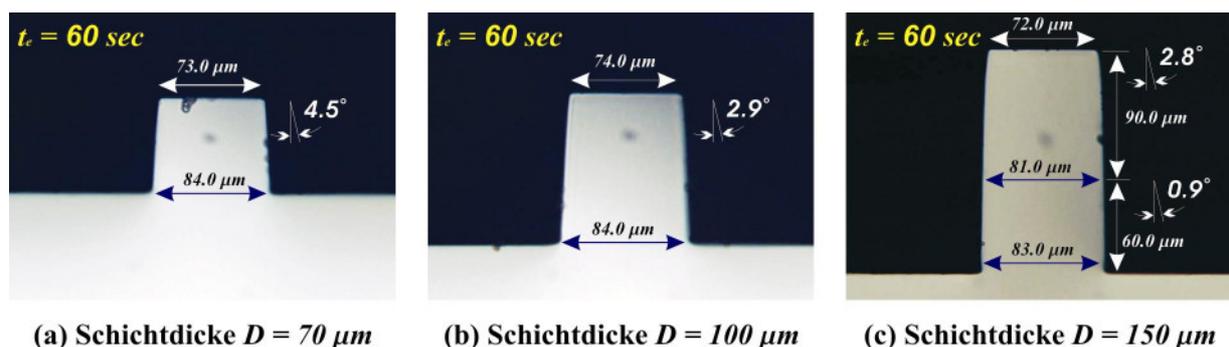


Abb.4-10 Profile in Abhängigkeit von D (70 , 100 , $150 \mu\text{m}$) bei Ag-Reflektor:

Mit steigendem D wird der Flankenwinkel bei der gleichen Belichtungszeit $t_e = 60 \text{ sec}$ immer kleiner, d.h., wenn die Belichtungszeit (Belichtungsdosis) geringer wird, kann wahrscheinlich eine Hinterschneidung bei einer hohen Schichtdicke erscheinen.

In Abb.4-11 sind bei der Schichtdicke von $220.0 \mu\text{m}$ die Profile in Abhängigkeit von t_e (15 sec und 30 sec) exemplarisch gezeigt. Hierbei wird eine Erscheinung der Hinterschneidung belichtungszeitbedingt betrachtet. Wie bereits erwähnt, ist das Profil bei

$t_e = 15 \text{ sec}$ gering hinterschnitten, während bei $t_e = 30 \text{ sec}$ keine Hinterschneidung bemerkbar ist.

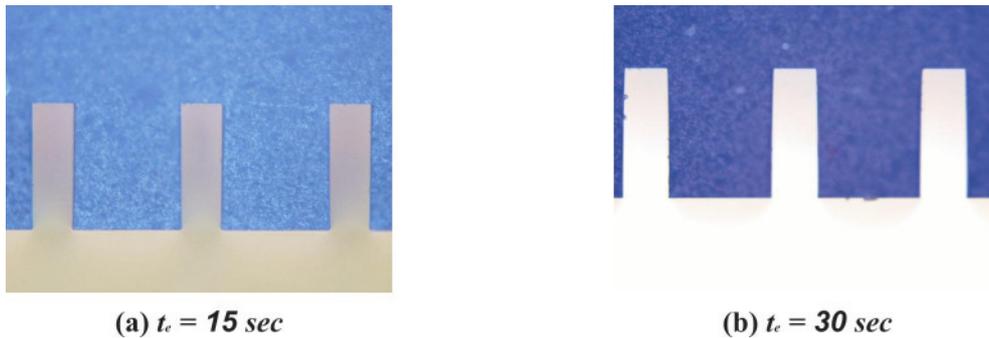


Abb.4-11 Profile in Abhängigkeit von t_e bei Ag-Reflektor und $D = 220 \mu\text{m}$:

(a) Hinterschneidung bei $t_e = 15 \text{ sec}$ aufgrund der nicht ausreichenden Reflexion über die Gesamtschichtdicke und (b) keine Hinterschneidung bei $t_e = 30 \text{ sec}$.

Zusammenfassung

Bei der Reflexionsbelichtung entsprechen die experimentellen Ergebnisse der Tendenz auf Basis der theoretischen Abschätzung; mit steigendem R (> 0.5) weisen die belichteten Resistprofile keine Hinterschneidung auf und der Flankenwinkel der belichteten Resiststruktur kann mit Hilfe von t_e (Belichtungs-dosis) begrenzt kontrolliert werden.

Es ist gezeigt, dass mit Hilfe der Reflexionsbelichtung die für Negativ-Fotoresist typische Hinterschneidung vermieden und der Flankenwinkel durch die Belichtungszeit t_e bis zum begrenzten Winkel (hier, ca. 4.5° bei Ag-Reflektor) quasi-linear kontrolliert werden kann. Jedoch kommt eine negative Auswirkung – *eine Verbreiterung der belichteten Resiststruktur* – zum Fragen. Da eine kleine Verbreiterung für einige Mikrokomponenten wie z.B. Multimode-Wellenleiter nicht unbedingt kritisch ist, kann die Reflexionsbelichtung zur Vermeidung der Hinterschneidung verwendet werden. Sind die Abweichungen nicht zulässig, müssen die Verbreiterung durch entsprechend kleine Maskenöffnungen vorgehalten werden.

4.3 Laserdirektbelichtungsmethode

Für den Übergang auf großflächige Formate kommt der Einsatz eines laserunterstützten direkten Lithographiesystem in Frage, da die Vorformherstellung eines großen Formates auf Basis der Maskenbelichtung aufgrund des technischen Aufwandes heutzutage noch nicht kostengünstig ist. Zuerst wird eine Anlage für die Laserlithographie, die in dieser Arbeit verwendet wird, kurz erläutert. In Abb.4-12 ist das Laserlithographiesystem (DWL66, Heidelberg Instruments) gezeigt. In diesem Gerät wird das vom Laser kommende

Kapitel 4. Experimentelle Untersuchungen

Licht ($\lambda = 364 \text{ nm}$) von einem Schreibkopf auf das mit Fotoresist belackte Substrat wie z.B. Wafer oder Glas fokussiert. Dabei befindet sich das Substrat auf einem beweglichen x - y -Tisch. Die Tischbewegung wird zum Erreichen einer maximalen Positionierungsgenauigkeit interferometrisch kontrolliert. Die Kontrolle der Laserintensität zusammen mit der Tischbewegung ermöglicht so die Belichtung einer vorgegebenen Struktur. In Abb.4-13 sind der Schreibkopf und der x - y -Tisch gezeigt und die signifikanten Parameter von DWL66 sind in Tab.4-1 gestellt.

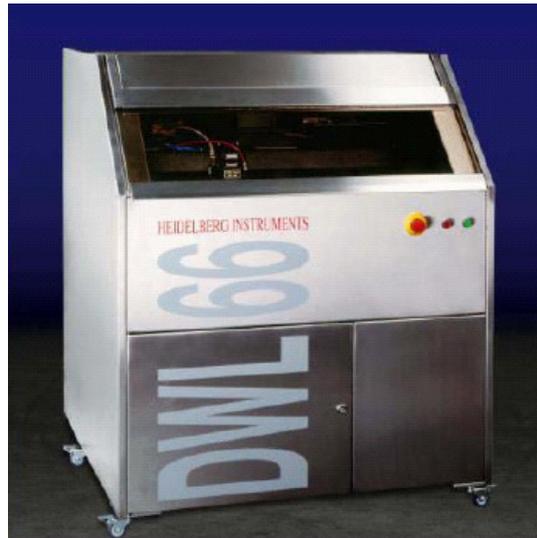


Abb.4-12 Laserlithographiesystem DWL66

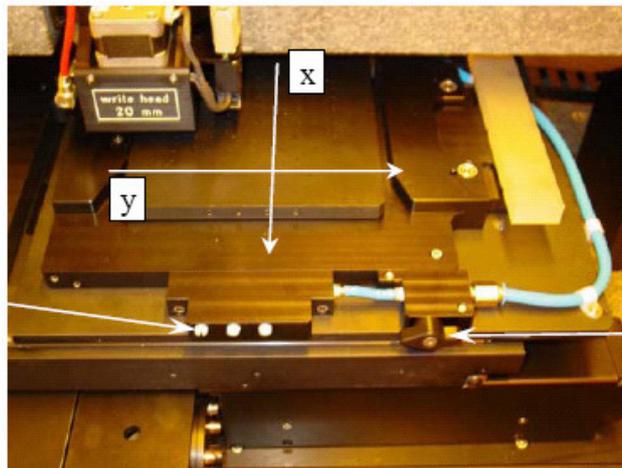


Abb.4-13 Schreibkopf und x - y -Tisch in DWL66

Wellenlänge λ	364 nm
Strahltaile W_0	$0.7 \mu\text{m}$
Depth of Focus DOF	$8.46 \mu\text{m}$

Tab.4-1 Parameter von DWL66

4.3.1 Belichtung auf Basis des Strahlfokus

In diesem Abschnitt wird ein Einfluss auf das Profil – *die Änderung des Profils der belichteten Resiststruktur in Abhängigkeit der Leistung P_L des Lasers* – experimentell untersucht. Hierbei werden die mit SU-8-50 belackten Wafer verwendet, wobei die Schichtdicke D im Bereich von ca. $70.0 \mu\text{m}$ liegt und die Soll-Breite B $70 \mu\text{m}$ beträgt.

Im Folgenden wird der Verlauf des Profils der SU-8-Struktur in Abhängigkeit von P_L betrachtet, ob die experimentellen Ergebnisse der abgeschätzte Tendenz entsprechen: Gemäß Abb.3-42 (*On-Focus*) ist die Hinterschneidung bei einer niedrige oder hohe Leistung P_L zu erwarten, d.h. zur Vermeidung der Hinterschneidung soll eine geeignete Leistung gesucht werden. Bei *Out-of-Focus* (Abb.3-45) weisen mit steigender P_L die berechneten Profile keine Hinterscheidung auf. Jedoch ist eine stärkere Vergrößerung der belichteten Strukturbreite im Vergleich zu *On-Focus* zu erwarten.

Photoresistprofile durch Belichtung in der Einstellung *On-Focus*

Mit steigender P_L (sinkendem k) zeigen die berechneten Profile (*On-Focus*) in Abb.3-42 eine Tendenz: Bei sehr größeren k (z.B. 0.008 , *geringer P_L*) ein nach außen gekrümmtes Profil und eine geringe Vergrößerung der Strukturbreite, bei mittelmäßigen k (z.B. 0.001 , *mittelmäßiger P_L*) ein nicht hinterschnittenes Profil (*positiver Flankenwinkel*) und eine relativ große Verbreiterung, und bei geringen k (z.B. 0.0001 , *großer P_L*) eine Hinterschneidung und eine sehr große Verbreiterung. Diese Tendenz des Verlaufs der berechneten Profile in Abb.3-42 entspricht den experimentellen Ergebnissen in Abb.4-14.

Mit steigender P_L ist die starke Vergrößerung der Strukturbreite in Abb.4-14 erkennbar. Ab $P_L = 7.5 \text{ mW}$ weisen die Profile eine Hinterschneidung auf, während bei sehr geringer $P_L = 0.5 \text{ mW}$ die Seitenwände des Profils eine geringe Krümmung nach außen hin aufwiesen. Zwischen 1.0 mW und 3.0 mW tritt keine Hinterschneidung, aber eine Vergrößerung der Strukturbreite auf. Im Vergleich zu den berechneten Profilen in Abb.3-42 wird diese starke Verbreiterung der belichteten Resiststruktur vermutlich daran liegen, dass bei der Abschätzung die idealisierten Intensitätsverteilungen nur auf Basis eines Gaußeschen Strahles (Grundmode TEM_{00}) behandelt werden können. Wie bereits in Kapitel 3.3.1 erwähnt, können in der Realität mehrere Moden (z.B. TEM_{01} und TEM_{10} in Abb.3-35) gleichzeitig anschwingen. Mit steigender P_L können besonders idealisierten Intensitätsverteilungen (TEM_{00}) durch andere Moden (TEM_{01} und TEM_{10}) stark beeinflusst werden. Wie in Abb.3-35 gezeigt, sind die Intensitäten (Maxima oder Nebenmaxima) von TEM_{01} und TEM_{10} in Bezug auf Maxima von TEM_{00} seitlich verteilt. Dadurch kann mit steigender P_L die Intensitätsstärke von TEM_{01} und TEM_{10} für Reaktionen im Photoresist immer wirksamer werden, so dass die

Vergrößerung der Strukturbreite erscheinen kann.

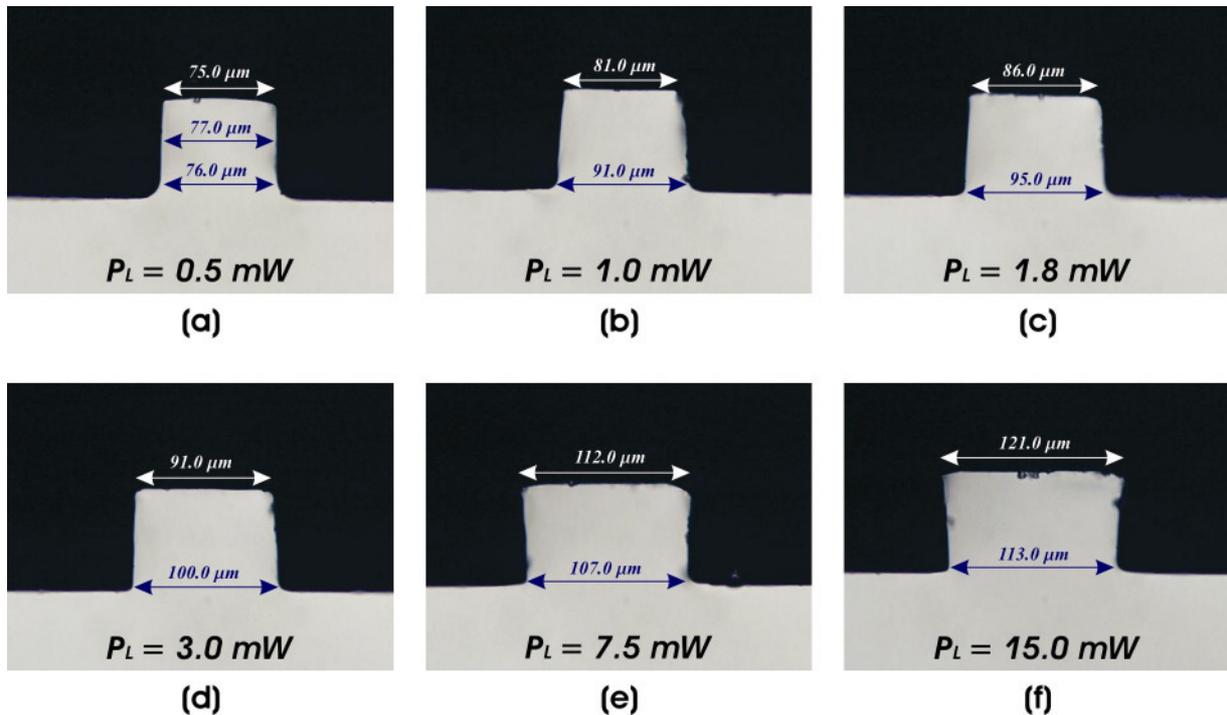


Abb.4-14 Profile (On-Focus) in Abhängigkeit der Leistung P_L :

Hinterschneidung ist bei (a) $P_L = 0.5 \text{ mW}$, (e) $P_L = 7.5 \text{ mW}$ und (f) $P_L = 15.0 \text{ mW}$ zu sehen, während keine Hinterschneidung (b) $P_L = 1.0 \text{ mW}$, (c) $P_L = 1.8 \text{ mW}$ und (d) $P_L = 3.0 \text{ mW}$. Jedoch weisen mit steigender P_L die Profile eine Verbreiterung der Struktur auf.

Photoresistprofile durch Belichtung in der Einstellung *Out-of-Focus*

In Abb.4-15 sind die Profile in Abhängigkeit von P_L gezeigt, wobei der Abstand g zwischen Strahlfokus und Resistoberfläche $50 \mu\text{m}$ (*Out-of-Focus* in Abb.3-40) ist.

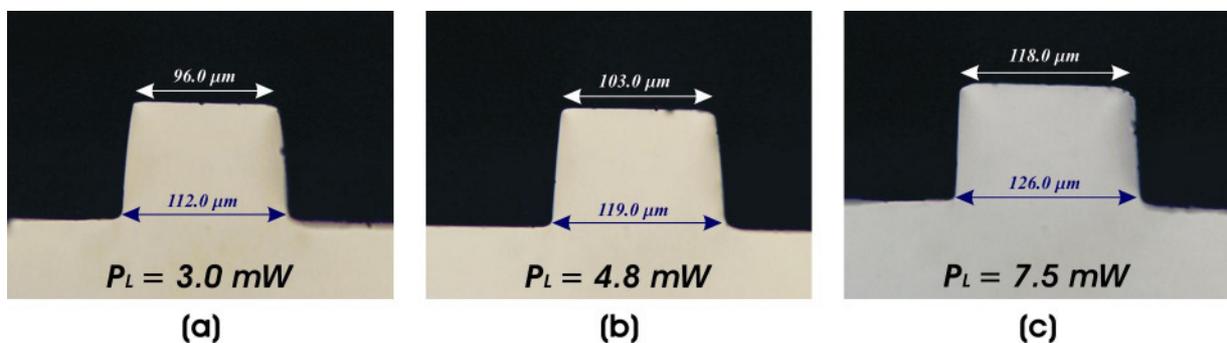


Abb.4-15 Profile (Out-of-Focus, $g = 50 \mu\text{m}$) in Abhängigkeit der Leistung P_L :

Keine Hinterschneidung ist bei (a) $P_L = 3.0 \text{ mW}$, (b) $P_L = 4.8 \text{ mW}$ und (c) $P_L = 7.5 \text{ mW}$ zu sehen. Bei der gleichen $P_L = 3.0 \text{ mW}$ ist die stärkere Verbreiterung im Vergleich zu On-Focus in Abb.4-14(d) erkennbar.

Mit steigender P_L weist der Verlauf der Profile in Abb.4-15 eine tendenzielle Übereinstimmung mit der Abschätzung in Abb.3-45 (keine Hinterschneidung und eine stärkere Vergrößerung der Strukturbreite) auf. Im Vergleich zu *On-Focus* in Abb.4-14 ist jedoch eine stärkere Vergrößerung der Strukturbreite bei gleicher Leistung wie z.B. $P_L = 3.0 \text{ mW}$ erkennbar. Dies liegt vermutlich daran, dass bei der Belichtung mit *Out-of-Focus* die Strahldivergenz (Abb.3-32) wegen des Abstandes g im Vergleich zu *On-Focus* stärker zu erwarten ist. Und vermutlich wird mit steigender P_L die Intensitäten von **TEM₀₁** und **TEM₁₀** auch zur Verbreiterung der belichteten Resiststruktur beitragen.

Zusammenfassung

Die durch die Belichtung mit *On-* und *Out-of-Focus* belichteten Resistprofile entsprechen der Abschätzungen in Abb.3-42(*On-Focus*) und Abb.3-45(*Out-of-Focus*): Mit steigender P_L ist eine Vergrößerung der belichteten Strukturbreite zu sehen und im Vergleich zu *On-Focus* weisen besonders die Profile bei der Belichtung mit *Out-of-Focus* aufgrund der abstandbedingten Strahldivergenz eine stärkere Verbreiterung auf.

Hinsichtlich der Vermeidung der Hinterschneidung und der Vergrößerung der belichteten Strukturbreite sollte die Belichtung mit *On-Focus* durch die Wahl nach einer geeigneten Leistung P_L verwendet werden.

4.3.2 Belichtungsmethode durch Verkleinerung der Soll-Breite

In diesem Abschnitt wird eine bereit in Kapitel 3.3.5 vorgestellte Belichtungsmethode auf Basis der verkleinerten Soll-Breite (Abb.3-46) experimentell untersucht. Diese Methode beruht auf der absichtlichen Verkleinerung der Soll-Breite der zu belichtenden Struktur bei der Erstellung mit einer CAD-Software, da der Laserstrahl von der Information (CAD-Zeichnung) direkt gesteuert wird.

In Abb.4-16(a) und (b) sind zwei Profile gezeigt, welche durch die oben vorgestellte Methode – *verkleinerte Soll-Breite* – belichtet werden, wobei statt der Soll-Breite $70.0 \mu\text{m}$ die verkleinerte Soll-Breite $50 \mu\text{m}$ verwendet wird. Im Vergleich zu Abb.4-16(a) ist die größere Verbreiterung der belichteten Resiststruktur in Abb.4-16(b) zu sehen: Boden-Breite ca. $80.0 \mu\text{m}$ bei *On-Focus* ($g = 0 \mu\text{m}$), während ca. $93.0 \mu\text{m}$ bei *Out-of-Focus* ($g = 50 \mu\text{m}$).

Unabhängig von der Fokusebene (*On-Focus* oder *Out-of-Focus*) liegt die Oberflächenrauheit (R_a) der Seitenwand ca. $20 - 40 \text{ nm}$. In Abb.4-16(c) ist die Oberflächenprofil exemplarisch gezeigt.

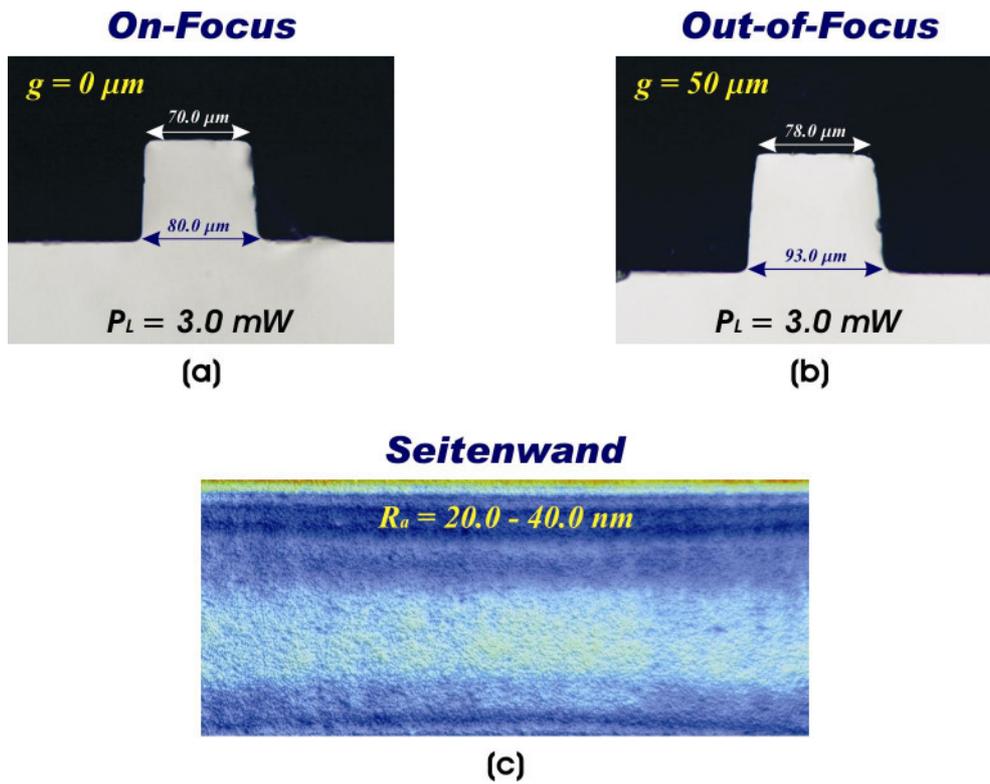


Abb.4-16 Profile und Seitenwand (Laserdirektbelichtung auf Basis der verkleinerten Soll-Breite)

Kapitel 5

Herstellung optischer 3D-Koppelemente auf Basis der Dickschicht-Mikrolithographie

In den Kapiteln 3, 4 und im Anhang werden durch theoretische Überlegungen und experimentelle Versuche die mikrolithographischen Verfahren auf Basis von Negativ-Fotoresist SU-8 zur Überwindung der Probleme – *Hinterschneidung* und *inkomplette Auflösung* des SU-8-Resists nach der galvanischen Abscheidung (Galvanoformung) – und zur Erzeugung der 3D-Strukturen vorgestellt. In diesem Kapitel wird zur Realisierung der zwei Koppelkonzepte in Abb.5-1 – 45° -integrierte Mikrospiegel und 45° -Mikroprisma als Ein- und Auskopplungselement bei einer optischen Übertragungsstrecke – auf die Anwendungen von vorgestellten mikrolithographischen Verfahren eingegangen.

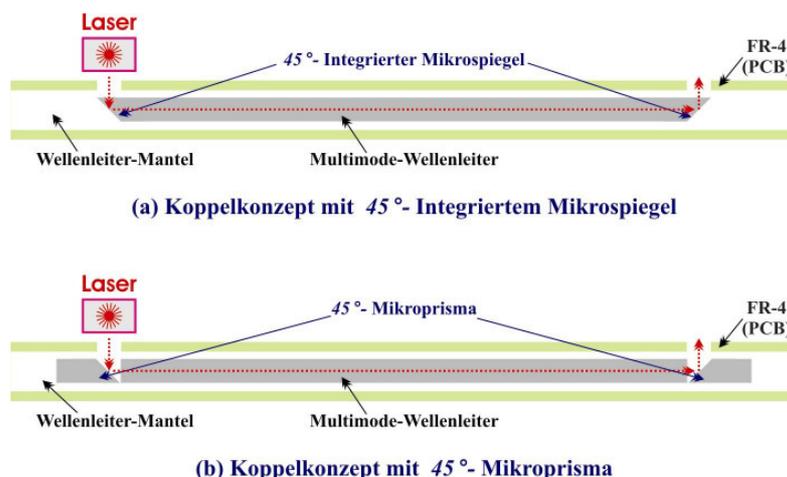


Abb.5-1 Zwei Koppelkonzepte in einer elektrisch-optischen Platine (PCB)

Die Erzeugung eines Formeinsatzes für Lichtwellenleiter, die mit einem Koppelement – 45° -integriertem Mikrospiegel – versehen werden, wird beschrieben. Anschließend wird auf die Strukturierung des 45° -Mikroprismas als das alternative Koppelkonzept eingegangen.

5.1 Wellenleiter mit integrierten Mikrospiegeln

Um die Wellenleiter mit integrierten Mikrospiegeln mittels Abformverfahren herstellen zu können, wird zunächst eine stabile und metallische Vorform wie z.B. eine Nickel-Vorform

benötigt, die mit Hilfe von galvanischem Verfahren abgeformt wird. Für die Galvanoformung ist eine Urvorform wie z.B. eine photolithographische Vorform (Resist-Vorform) erforderlich. Im Folgenden wird die Herstellung der Nickel-Vorform beschrieben. In Abb.5-2 ist der grobe Ablauf zur Herstellung der Nickel-Vorform schematisch dargestellt.

Auf Basis von Dicklacktechniken mit SU-8 wird zuerst die *Resist-Vorform* strukturiert, wobei durch die Reflexionsbelichtung (Kapitel 3.2.3) oder die Laserdirektbelichtung (Kapitel 3.3.5) die Hinterschneidung als ein typisches Problem für Negativ-Fotoresist vermieden wird. Dann werden die Mikrospiegel an angefertigten SU-8-Strukturen von Wellenleitern durch die Oberflächenstrukturierung mit dem 45°-profilierten Diamant-Mikrowerkzeug auf Basis von Mikrofrästechnik (Anhang A.1) integriert.

Anschließend wird mit Hilfe der Soft-Abformung (Anhang A.2.1) die *Gießharz-Vorform* als Zwischenvorform angefertigt. Zuletzt wird mittels Galvanoformung die *Nickel-Vorform* von der Gießharz-Vorform hergestellt.

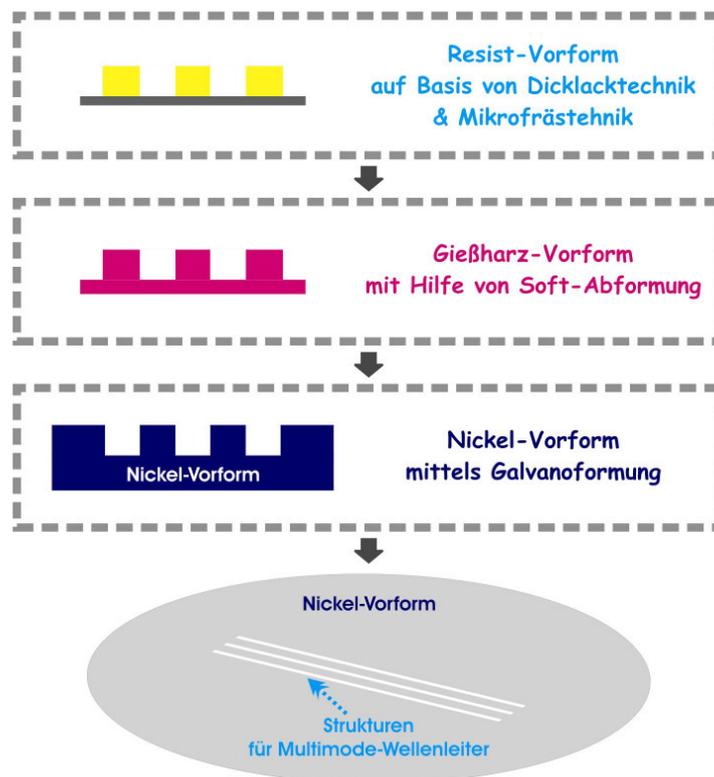


Abb.5-2 Grober Ablauf zur Herstellung der Nickel-Vorform

5.1.1 Resist-Vorform

In Abb.5-3 ist der Prozessablauf zur Herstellung der Resist-Vorform dargestellt. Die Prozessschritte werden im Folgenden beschrieben.



Abb.5-3 Ablauf des Herstellungsprozesses einer Resist-Vorform

Zu Beginn des Prozesses wird der Wafer gereinigt und dehydriert. Wegen der schlechten Haftung auf dem Wafer wird zuerst der dünnflüssige Resist SU-8-2 als eine ca. $2\ \mu\text{m}$ dicke Haftvermittlungsschicht aufgebracht. Nach der Beschichtung wird die flüssige Haftschrift im Umluftofen für $20\ \text{min}$ bei $90\ \text{°C}$ getrocknet (Soft-Bake). Anschließend wird die Haftschrift komplett von oben belichtet (Flutbelichtung). Danach wird im Umluftofen für $5\ \text{min}$ bei $90\ \text{°C}$ das Post Exposure Bake (PEB, weitere Trocknung durch Erwärmen) durchgeführt, um die durch die Belichtung gestarteten Vernetzungsreaktionen vollständig ablaufen zu lassen.

Nach der Beschichtung der Haftschrift wird der höherviskose Resist SU-8-50 als eine Strukturschicht aufgebracht. Anschließend wird die Strukturschicht im Umluftofen für $60\ \text{min}$ bei $90\ \text{°C}$ getrocknet. Nach der Trocknung wird die durch die Oberflächenspannung des Resists am Rand des Wafers entstehende Randwulst beseitigt, um den Abstand zwischen Resistoberfläche und Maske bei der folgenden Belichtung möglichst zu minimieren. Dann wird der randwulstfreie Wafer durch die Maske belichtet, wobei zur Vermeidung der Hinterschneidung die Reflexionsbelichtung durchgeführt wird.

Nach der Belichtung der Strukturschicht wird das PEB auf der Hot-Plate – ein dreistufiger Prozess gemäß den Empfehlungen des Herstellers – durchgeführt. Die Temperatur wird zuerst für $2\ \text{min}$ auf $50\ \text{°C}$, dann für $8\ \text{min}$ auf $90\ \text{°C}$ gehalten. Anschließend wird das Heizelement abgeschaltet, und Hot-Plate kühlt langsam ab. Das Aufheizen geschieht mit etwa $25\ \text{°C/min}$, das Abkühlen mit etwa $0.67\ \text{°C/min}$. Der Abkühlvorgang ist durch die Wärmekapazität der Hot-Plate bestimmt und kann nicht variiert werden.

Nach dem PEB muss abschließend der belichtete Wafer entwickelt werden. Die Entwicklung erfolgt im Tauchverfahren mithilfe der Entwicklungsanlage, welche mit einer Pumpe zur Umwälzung des Entwicklers versehen ist. Die Entwicklung dauert etwa $15\ \text{min}$ bei Raumtemperatur. Danach folgt eine Säuberung des entwickelten Wafers mittels Spin-Coater, um die bei der Entwicklung entstehenden Partikel auf dem Wafer zu beseitigen.

Nach der photolithographischen Anfertigung der SU-8-Struktur von geraden Multimode-Wellenleitern kommt die Mikrofrästechnik zum Einsatz, um an der SU-8-Struktur die Mikrospiegel anfräsen zu lassen. In Abb.5-4 ist der grobe Ablauf zur Herstellung von integrierten Mikrospiegeln dargestellt.

Zuerst wird ein Substrat wie z.B. Si-Wafer, auf dem die Strukturen für Wellenleiter photolithographisch angefertigt sind, hergestellt. Anschließend wird eine dünne metallische Schutzschicht ca. $200\ \text{nm}$ wie z.B. Cu-Schicht durch Sputtern aufgebracht, um den gefrästen Bereich vor den durch die Zerspannung entstehenden Partikeln wie z.B. Frässpänen zu schützen. Dann werden die Mikrospiegel mit Hilfe des profilierten Diamant-Mikrowerkzeuges gemäß des Verlaufs (Abb.5-5) an den Wellenleitern integriert, wobei die Drehzahl $25000\ \text{rpm}$

Kapitel 5. Herstellung optischer 3D-Koppelemente

beträgt und der Vorschub $0.2 - 0.3 \text{ mm/min}$ liegt. Abschließend werden die gefrästen Strukturen mit Hilfe von chemischen Verfahren gesäubert – die Cu-Schicht wird geätzt, um die unerwünschten Partikel auf der Cu-Schicht zu entfernen.

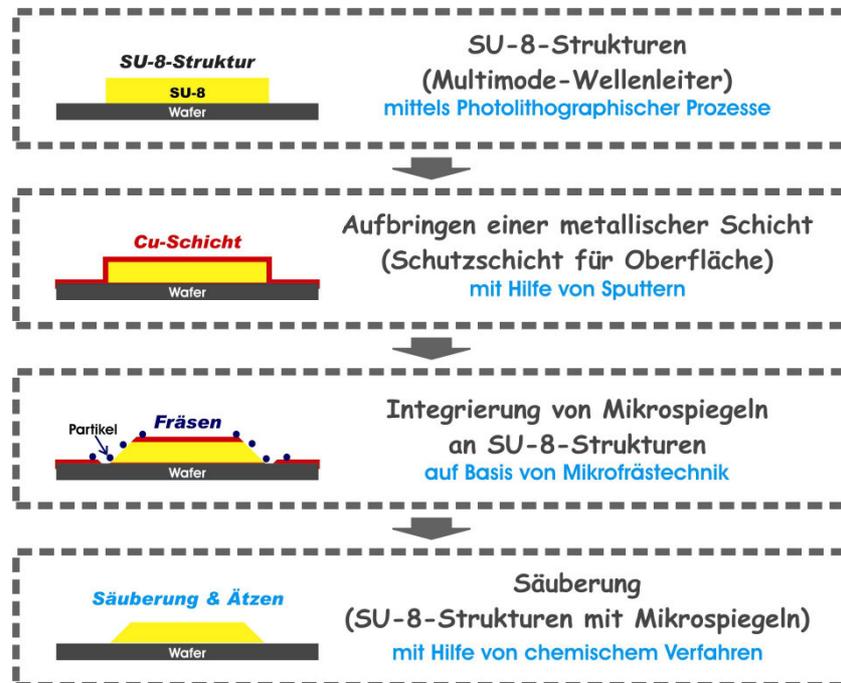


Abb.5-4 Grober Ablauf zur Herstellung von integrierten Mikrosiegeln

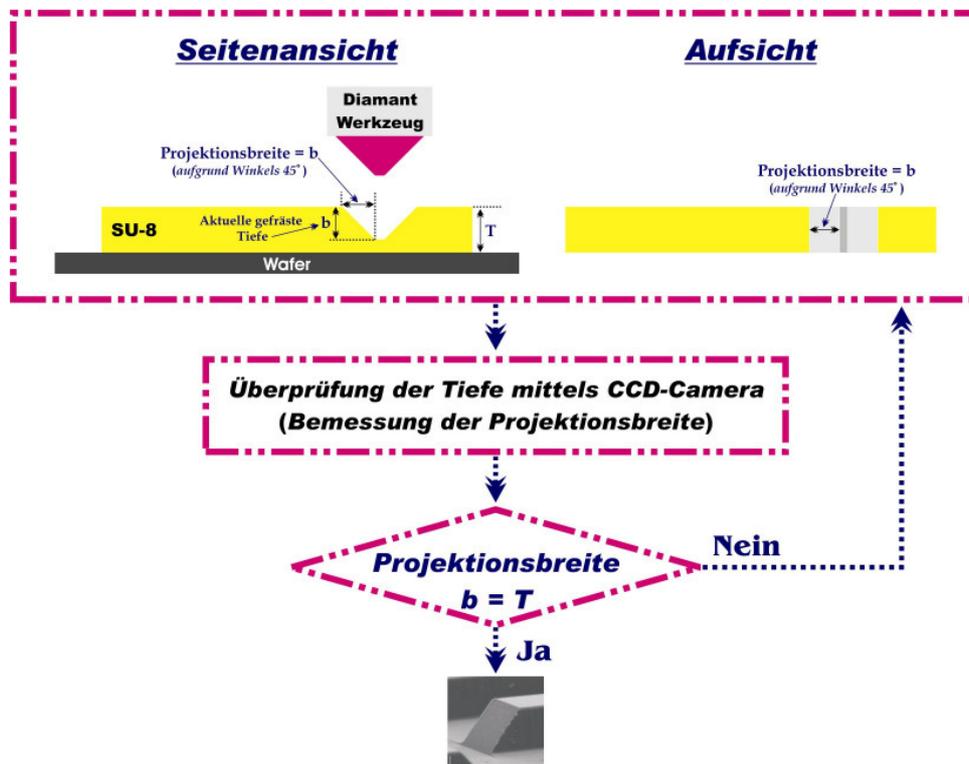


Abb.5-5 Grober Verlauf zur Strukturierung von Mikrosiegeln

Kapitel 5. Herstellung optischer 3D-Koppelemente

Wie bereits in Abb.5-5 dargestellt, muss der Fräsvorgang zur Integrierung von Mikrosiegeln durch die Kontrollierung der aktuell gefrästen Tiefe wiederholt werden: Aufgrund des Winkels 45° des profilierten Diamant-Mikrowerkzeuges entspricht immer die aktuell gefräste Tiefe der *Projektionsbreite* b . Durch die Bemessung von b ist die aktuelle Tiefe beim Fräsen zu bestimmen, so dass die Mikrosiegel an den photolithographisch angefertigten Wellenleitern möglichst genau angefräst werden können. Jedoch weisen die gesamten Vorgänge eine Zeitaufwendigkeit auf.

In Abb.5-6 sind zwei Fotos im gefrästen Bereich vor und nach Säuberung exemplarisch gezeigt. In Abb.5-6(links) sind die durch die Zerspanung entstehenden Partikel auf der Cu-Schicht deutlich erkennbar. In Abb.5-6(rechts) zeigt die Cu-Schicht eine Erfüllung der Funktion einer Schutzschicht. Sie lässt sich nasschemisch zusammen mit anhaftenden Frässpänen entfernen.

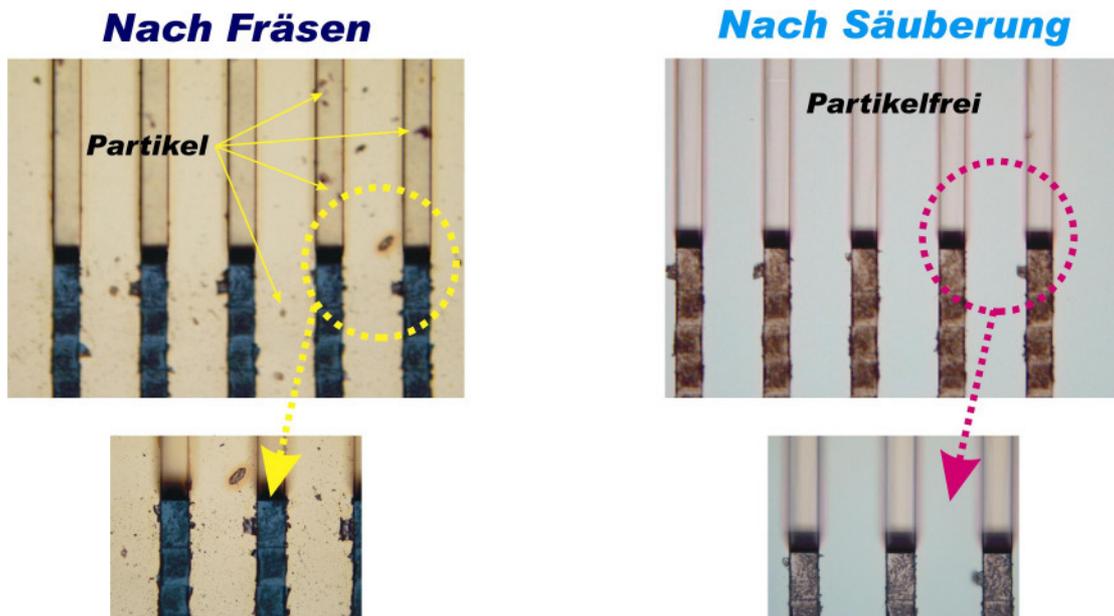


Abb.5-6 Gefräster Bereich nach Fräsen (links) und nach Säuberung (rechts)

In Abb.5-7 sind das Foto und die REM-Aufnahmen der photolithographisch und mikrofrästechnisch angefertigten Resist-Vorform für Multimode-Wellenleiter mit den 45° integrierten Mikrosiegeln gezeigt.

Das Profil von Strukturen der geraden Multimode-Wellenleiter, welche durch die *Reflexionsbelichtung* erzeugt werden, zeigt keine Hinterschneidung. Die Seitenwand weist mit den geringen Rauheitswerten ($40 - 50 \text{ nm}$) eine gute Qualität auf.

Der Winkel des integrierten Mikrosiegels liegt ca. $45^\circ \pm 2^\circ$ und die Oberfläche des gefrästen Mikrosiegels weist auch eine gute Qualität (ca. 80 nm) auf.

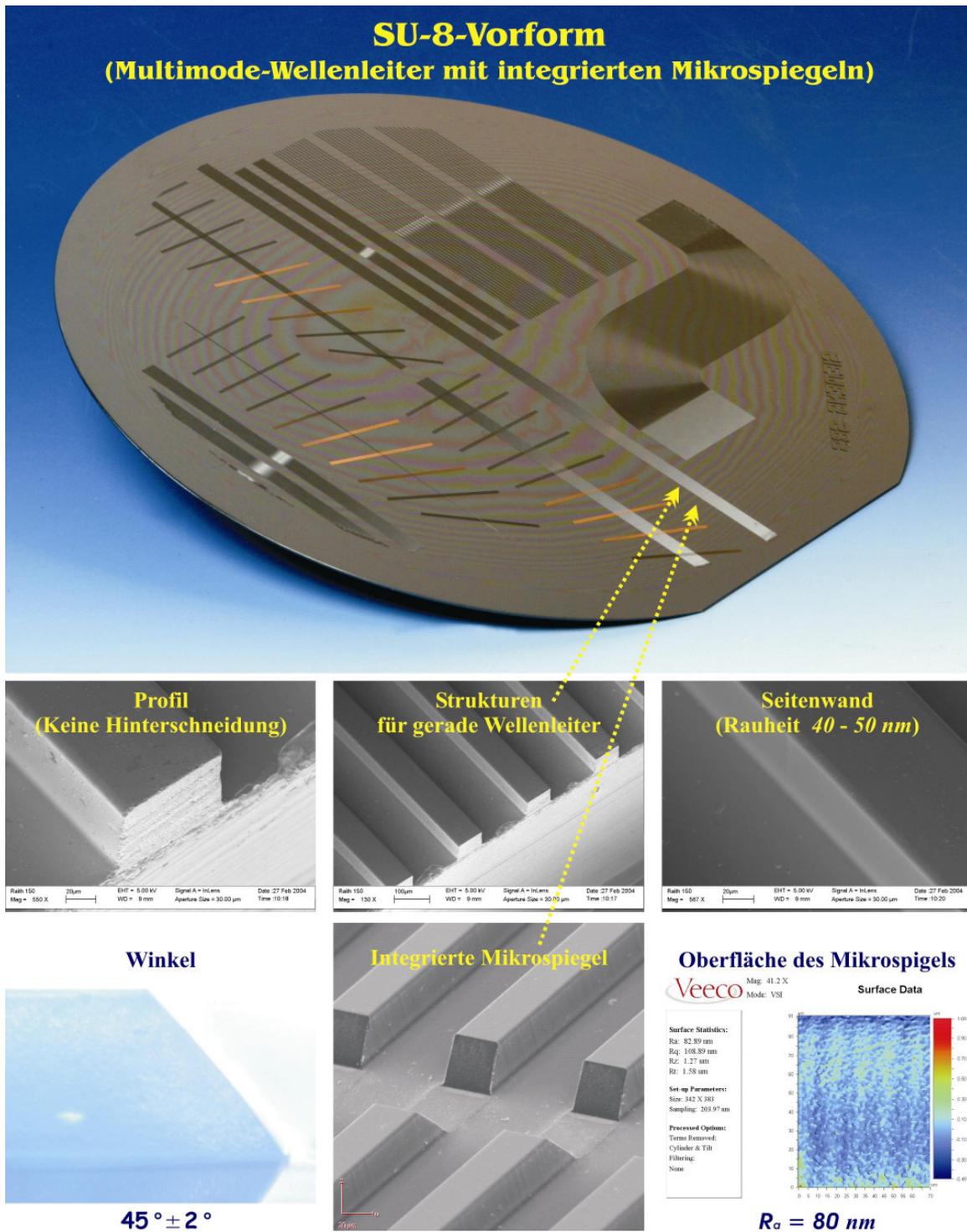


Abb.5-7 Resist-Vorform für Multimode-Wellenleiter mit 45°-integrierten Mikrospiegeln

5.1.2 Gießharz-Vorform

Wegen des Problems, dass sich der Fotoresist SU-8 nicht vollständig von einer galvanisch hergestellten Nickel-Vorform ablöst, kann die SU-8-Vorform nicht direkt galvanisiert werden. Daher wird eine Gießharz-Kopie der SU-8-Vorform mit Hilfe einer Soft-Abformung (Anhang A.2.1) erzeugt, wobei ein leicht abzulösendes Gießharz-Material wie z.B.

Kapitel 5. Herstellung optischer 3D-Koppelemente

Polyester verwendet wird. Der grobe Prozessablauf zur Erzeugung von Gießharz-Vorform ist in Abb.5-8 dargestellt.

Zuerst wird eine PDMS (Polydimethylsiloxan: Sylgard 184, Firma Dow Corning)-Kopie als ein Formeinsatz für Gießharz von der SU-8-Vorform hergestellt: Das auf die SU-8-Vorform gegossene PDMS-Material wird zur strukturtreuen Abformung durch die Beseitigung der unerwünschten Luftblasen evakuiert und dann im Umluftofen für ca. *2 Tage* bei *50 °C* ausgehärtet. Die Dauer der Temperung ist meistens von der Menge des PDMS abhängig. Nach der Aushärtung wird die PDMS-Kopie auf eine stabile Platte wie z.B. PCB-Platte mit Silikon-Kleber (Firma Dow Corning) geklebt und anschließend im Umluftofen für ca. *2 Tage* bei *50 °C* getrocknet, um die Deformation des PDMS-Formeinsatzes möglichst zu minimieren. Abschließend wird das Gießharz nach dem Mischen (mit Härter) auf die PDMS-Kopie aufgegossen und durch Schwenken ganzflächig verteilt. Dann wird das gegossene Gießharz zur Austreibung der Luftblasen evakuiert und im Umluftofen für ca. *10 – 12 Tage* bei *50 °C* ausgehärtet. Hierbei ist die Dauer der Temperung meistens von der Menge des Gießharzes und/oder des Härters abhängig.

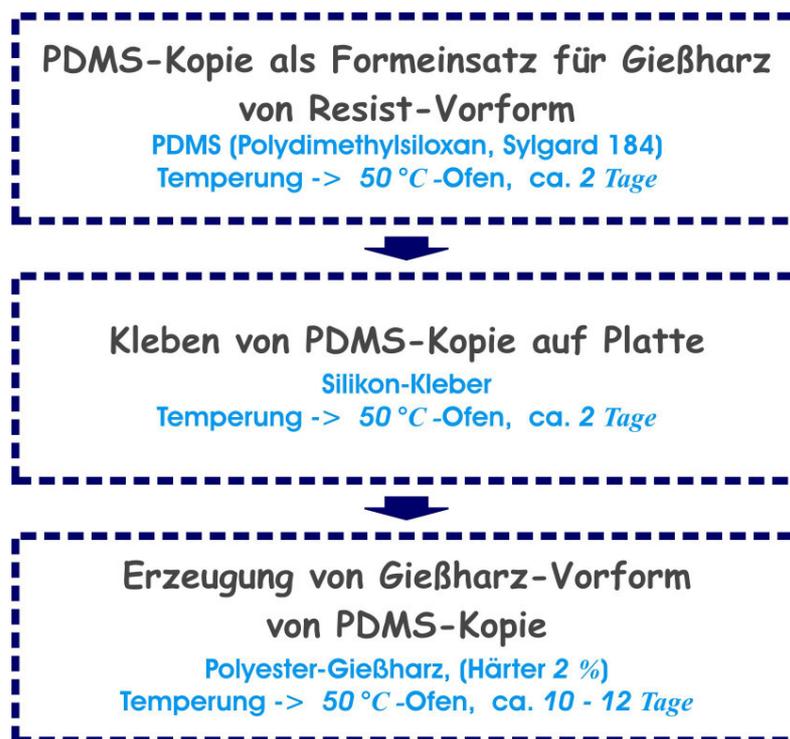


Abb.5-8 Prozessablauf von Soft-Abformung

In Abb.5-9 sind zwei Profile gezeigt: Das linke Profil stammt von einer SU-8-Vorform und das rechte Profil von einer Gießharz-Vorform nach Soft-Abformung mit Polyester-Gießharz. Zwischen beiden Profilen sind die großen Unterschiede wie z.B. Deformation nicht

bemerkbar. Neben der guten Abformung liefert die Soft-Abformung einen Glättungseffekt der Oberfläche, der sich für Wellenleiter positiv auswirken kann.

In Abb.5-10 sind einige REM-Aufnahmen gezeigt. Im Vergleich mit Abb.5-7 zeigt die Seitenwand die geringeren Rauheitswerte ($20 - 30 \text{ nm}$). Durch die Soft-Abformung wird die Rauheit verbessert.



Abb.5-9 Profil von SU-8 (links) und Profil von Gießharz (rechts) nach Soft-Abformung

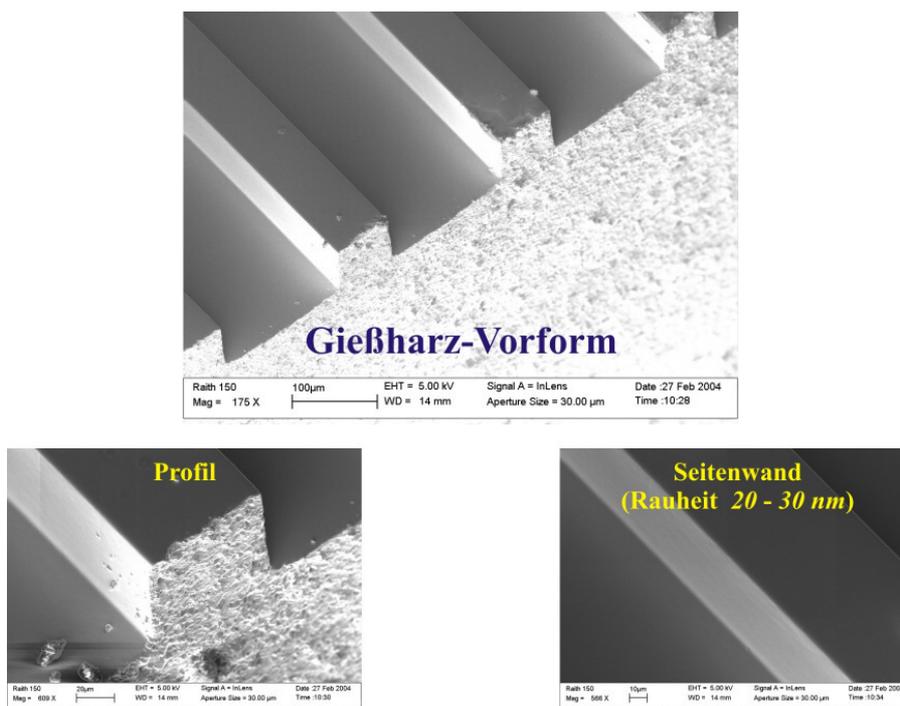


Abb.5-10 REM-Aufnahmen für Wellenleiter von Gießharz-Vorform

5.1.3 Nickel-Vorform als metallischer Formeinsatz

Im letzten Schritt wird die Nickel-Vorform (Abb.5-11) hergestellt. Dies geschieht dadurch, dass zuerst eine dünne Metallschicht wie z.B. Silber als Galvanikstartschicht auf die Gießharz-Vorform durch Sputtern aufgebracht wird und anschließend Nickel auf der aufgesputterten Metallschicht abgeschieden (Galvanoformung) wird.

Die Nickel-Galvanoformung wird bei einem pH-Wert von 3.7 ± 0.2 betrieben. Die Gesamtladungsmenge wird so gewählt, dass die abgeschiedene Nickel-Schicht eine Dicke von 1.4 mm aufweist. Diese Dicke reicht aus, um eine Stabilität beim folgenden Prozess zu gewährleisten. Die Badtemperatur beträgt $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Stromstärke wird in drei Intervallen verändert: Im ersten Intervall wird die Stromstärke linear auf den Maximalwert gefahren. Dieser Prozess dauert zwei Stunden und führt zu einer durchbiegungsfreien Oberfläche. Im zweiten Intervall wird dann bei einer konstanten Stromstärke der Großteil von Nickel-Schicht aufgebaut. Die Dauer dieses Intervall ist abhängig von der Fläche der Struktur und liegt bei 20 bis 30 Stunden. Im letzten Intervall wird die Stromstärke innerhalb von fünf Minuten heruntergefahren. Hierbei beträgt die maximale Stromstärke für 6-Zoll-Wafer 10 A [06].

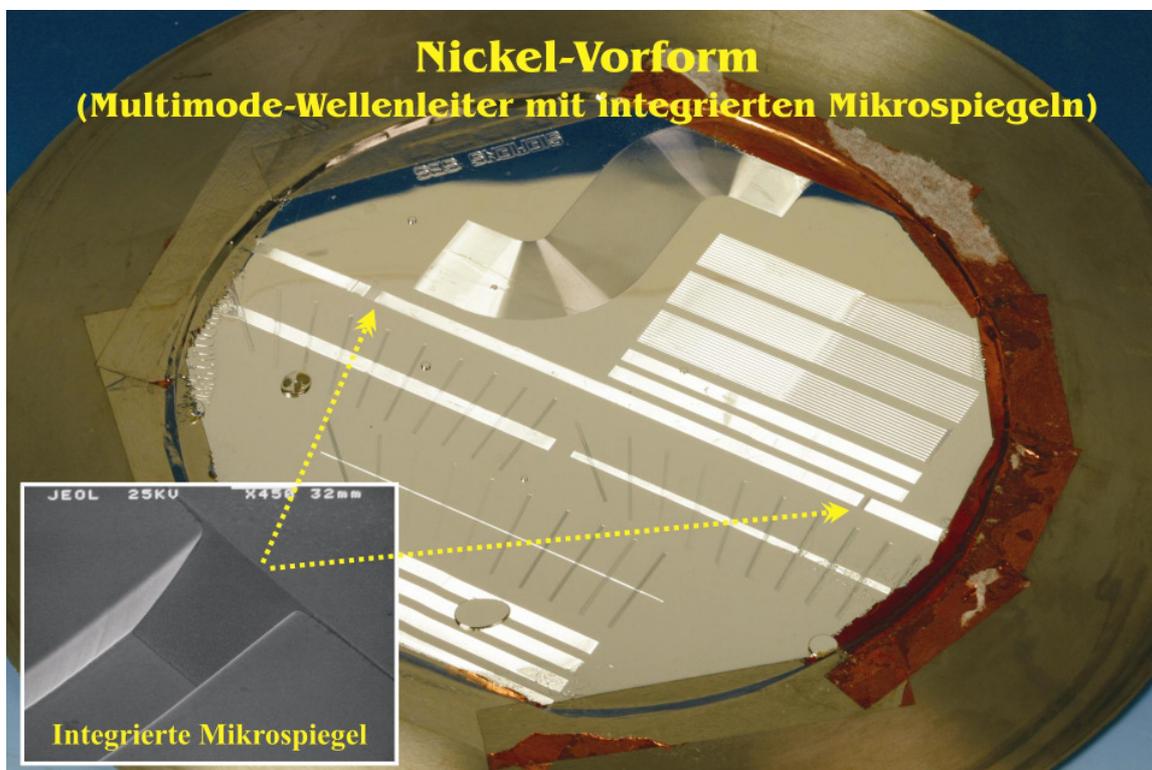


Abb.5-11 Nickel-Vorform

5.1.4 Koppelstelle mit integrierten Mikrospiegeln

Mit Hilfe des erzeugten Formeinsatzes in Abb.5-11 wird eine Koppelstelle mit 45° integrierten Mikrospiegeln hergestellt, und anschließend wird die Erfüllung der Funktion von integrierten Mikrospiegeln durch Experimente betrachtet.

In Abb.5-12(a) sind der schematische Aufbau zur Betrachtung der Funktion und das Foto der realisierten Koppelstelle zur 90° Strahlungsumlenkung in Multimode-Wellenleitern gezeigt. Wie schon in Abb.5-12(b) gezeigt, ist die (rote) Beleuchtung der Oberfläche eines

integrierten Mikrosiegeln zu sehen.

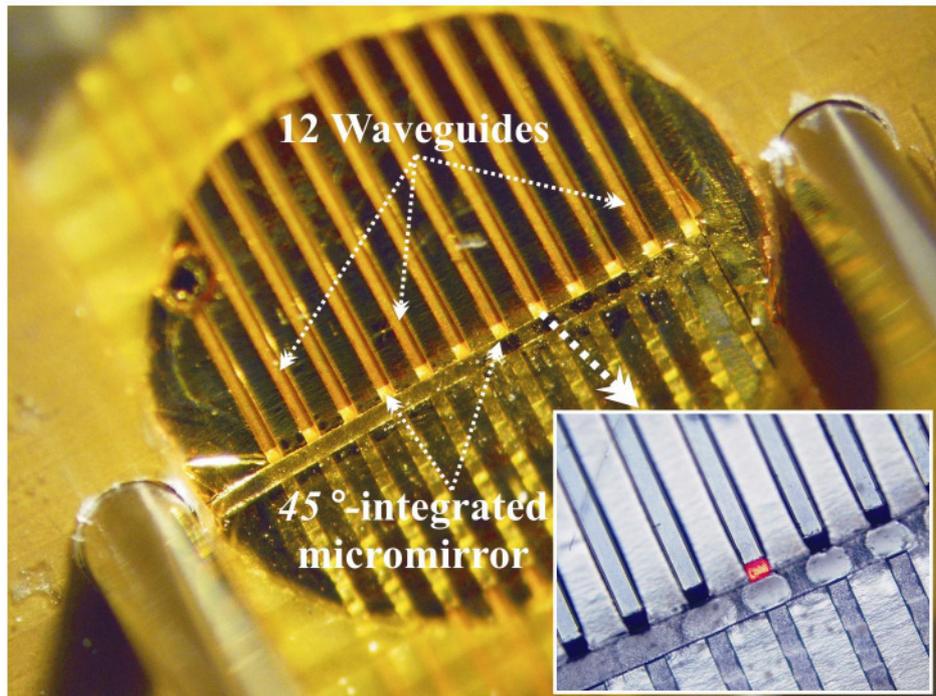
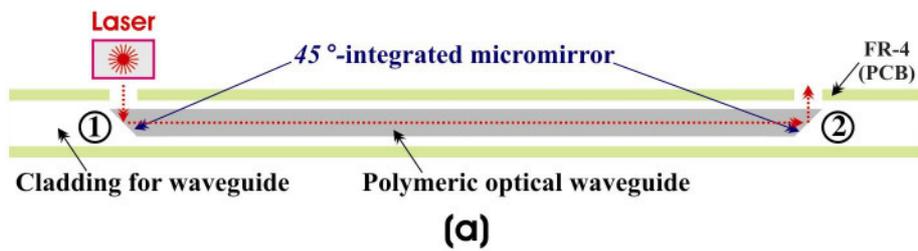


Abb.5-12 Koppelstelle mit 45°-integrierten Mikrosiegeln

5.2 Mikroprismen

Gegenüber dem Koppelkonzept mit 45°-integrierten Mikrosiegeln bietet das alternative Koppelkonzept auf Basis des 45°-Mikroprismas eine kostengünstige Herstellungsmöglichkeit (Abb.5-1(b)). Durch eine separate Anfertigung des Mikroprismas, das später durch Pick-and-Place-Automaten einfach eingesetzt werden kann, vereinfacht sich die Prozessierung bei der Herstellung eines Formeinsatzes für Lichtwellenleiter. Aus diesem Grund wird zur Realisierung des Koppelkonzeptes auf zwei Herstellungsverfahren von Mikroprismen eingegangen: Das eine auf Basis der Mikrofrästechnik und das andere auf Basis der optischer Lithographie.

5.2.1 Herstellung der Mikroprismen durch Mikrofrästechnik

In diesem Abschnitt wird eine Anfertigungsmethode des Mikroprismas auf Basis der Mikrofrästechnik beschrieben. In Abb.5-13 ist der grobe Ablauf zur Herstellung des Mikroprismas dargestellt.

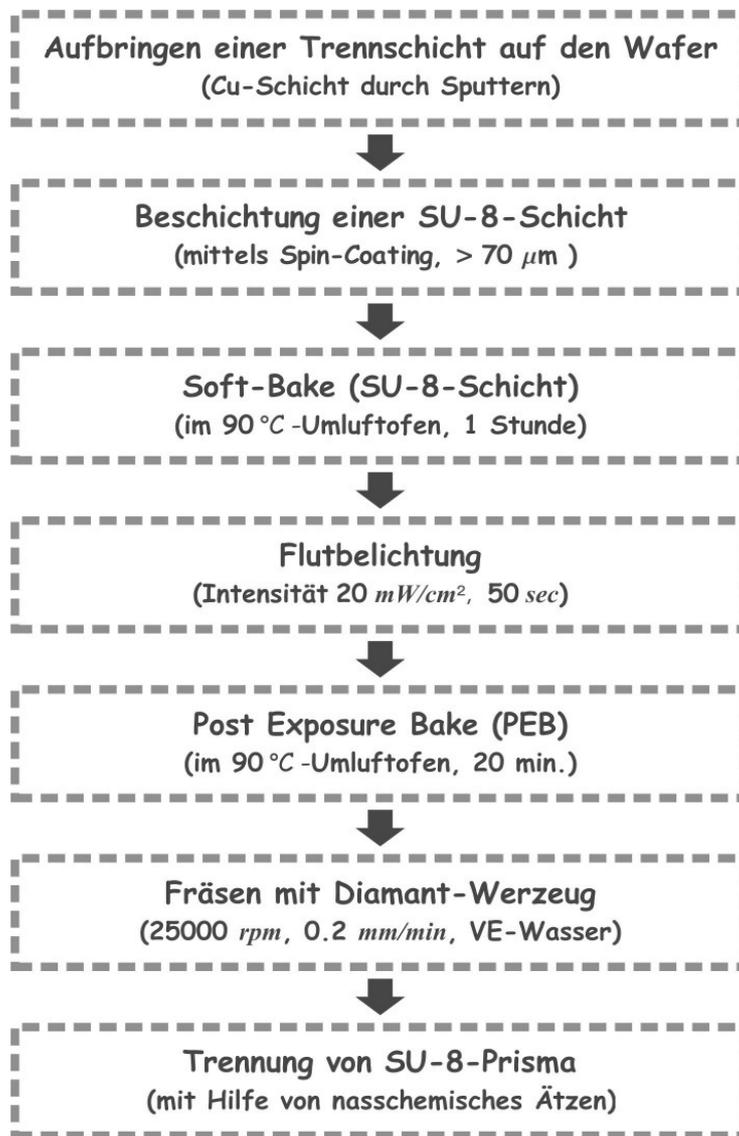


Abb.5-13 Grober Ablauf zur Herstellung des Mikroprismas (Mikrofrästechnik)

Im ersten Arbeitsschritt wird eine dünne Trennschicht ca. 200 nm wie z.B. Cu-Schicht durch Sputtern auf ein Substrat wie z.B. Si-Wafer aufgebracht, um das strukturierte Mikroprisma nasschemisch später leicht trennen zu lassen. Dann wird eine SU-8-Schicht auf den mit Cu metallisierten Wafer mittels Spin-Coating aufgebracht, wobei die Schichtdicke über ca. $70\text{ }\mu\text{m}$ liegt. Anschließend wird der belackte Wafer für ca. 60 min in einem $90\text{ }^\circ\text{C}$ heißen Umluftofen stabilisiert (Soft-Bake). Nach Soft-Bake wird der Wafer ohne Maske

komplett von oben belichtet (Flutbelichtung) und Post Exposure Bake (PEB) wird ca. 20 min in einem 90 °C heißen Umluftofen durchgeführt. Nach der Aushärtung der SU-8-Schicht wird das Mikroprisma mit dem 45°-profilierten Diamant-Mikrowerkzeug strukturiert (Abb.5-14). Abschließend wird das angefertigte Mikroprisma nasschemisch vom Si-Wafer getrennt.

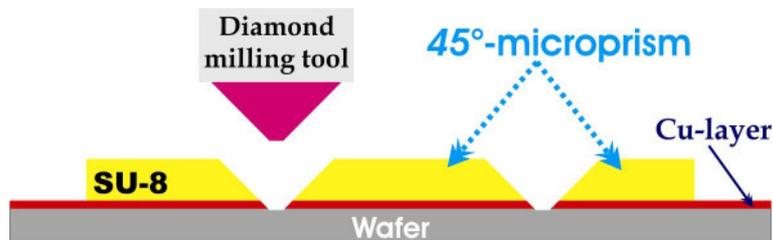


Abb.5-14 Schematische Darstellung der Herstellung des Mikroprismas

Das mit dem 45°-profilierten Diamant-Mikrowerkzeug hergestellte SU-8-Mikroprisma ist in Abb.5-15 exemplarisch gezeigt.

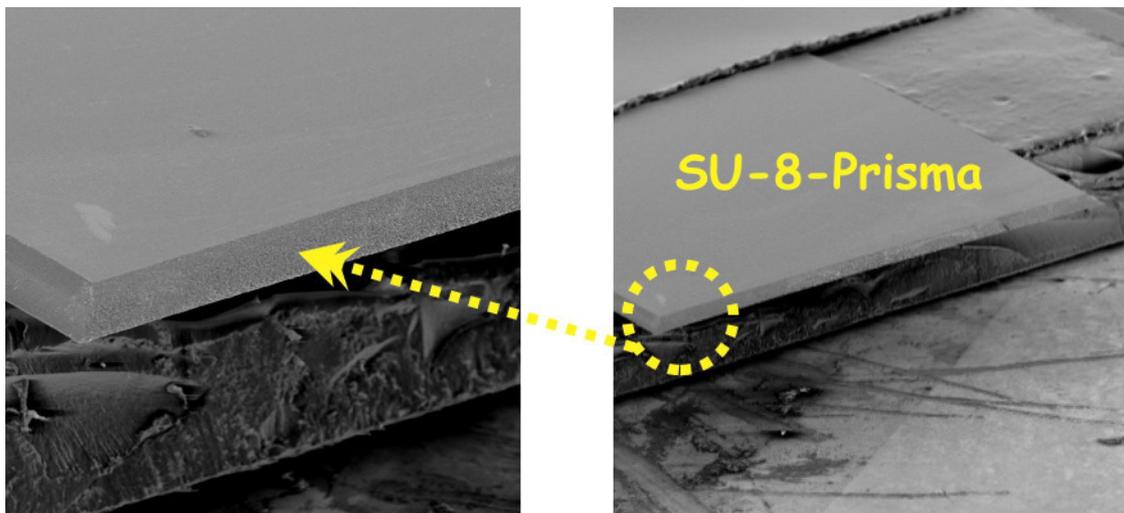


Abb.5-15 Hergestelltes Mikroprisma (Mikrofrästechnik)

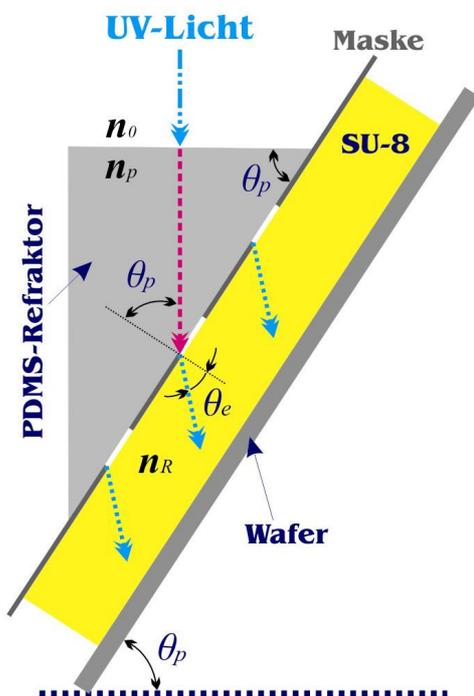
5.2.2 Herstellung der Mikroprismen durch optische Lithographie

In diesem Abschnitt wird die Herstellung des Mikroprismas durch die optische Lithographie auf Basis des stark gerichteten Belichtungswinkels θ_e , der auf der optischen Eigenschaft – *Refraktion* – beruht, vorgestellt. Dabei wird eine besondere Maske verwendet, die mit dem Refraktor aus PDMS (Sylgard 184, Dow Corning) versehen ist. Mithilfe der Maske mit PDMS-Refraktor wird der starke Belichtungswinkel 45° erzeugt, so dass der Fotoresist SU-8 schräg belichtet wird.

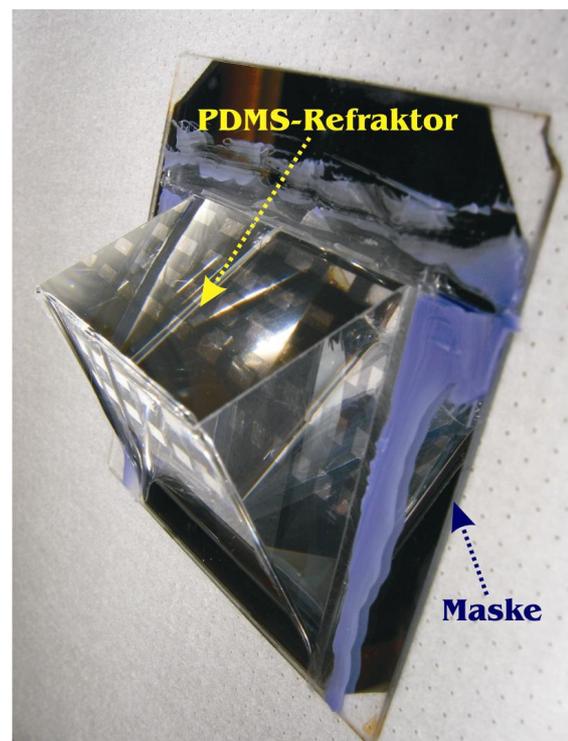
Kapitel 5. Herstellung optischer 3D-Koppelemente

Ohne Verwendung des Refraktors ist der Belichtungswinkel 45° wegen des hohen Brechzahlssprungs zwischen Luft ($n_0 = 1.0$) und SU-8 ($n_R = 1.67$) nicht erreichbar. Durch den PDMS-Refraktor ($n_p = 1.42$) zwischen Luft und SU-8 wird der Brechzahlssprung vermindert, so dass sich der Belichtungswinkel 45° durch die Geometrie des PDMS-Refraktors auf Basis des Snelliusschen Brechungsgesetzes ableiten lässt.

In Abb.5-16(a) ist zur Erzeugung des gezielten Belichtungswinkels 45° im Resist SU-8 die Ablenkung des UV-Lichtes auf Basis der Refraktion schematisch dargestellt. Dabei wird die Geometrie des PDMS-Refraktors auf der Maske skizziert und die hergestellte Maske mit dem PDMS-Refraktor ist in Abb.5-16(b) exemplarisch gezeigt.



(a) Belichtungskonfiguration



(b) Hergestellte Maske mit PDMS-Refraktor

Abb.5-16 Erzeugung des Belichtungswinkels 45° in SU-8 durch Maske mit PDMS-Refraktor

Wie bereits in Abb.5-16(a) dargestellt, findet keine Brechung beim Übertritt von Luft in PDMS-Refraktor statt, da das UV-Licht vertikal, d.h., Einfallswinkel 0° zu der Grenzfläche von Luft zu PDMS-Refraktor einfällt. Daher bewegt sich das UV-Licht ohne die Brechung im PDMS-Refraktor fort. Dann trifft das UV-Licht mit dem Einstrahlwinkel θ_p (hier, ca. 57°) auf die Grenzfläche von PDMS-Refraktor zu SU-8, und dort findet die Brechung statt, so dass schräg mit dem gebrochenen Winkels θ_e (hier, ca. 45°) – Belichtungswinkel – der Fotor resist SU-8 belichtet wird.

Kapitel 5. Herstellung optischer 3D-Koppelemente

Wie bereits in Abb.5-16(a) skizziert, wird hier dann der Einstrahlwinkel θ_p durch das Snelliussche Brechungsgesetz wie folgt beschrieben:

$$\theta_p = \sin^{-1} \left\langle \frac{n_R}{n_P} \sin \theta_e \right\rangle \quad (5-1)$$

Aufgrund der unterschiedlichen Dicke des PDMS-Refraktor ist hier besonders winkelbedingt eine stärkere Asymmetrie der Intensitätsverteilung sicherlich denkbar. Aus diesem Grund müssen die zu belichtenden Strukturen in der Mitte der Maske liegen, so dass die winkelbedingt negative Auswirkung möglichst vermieden werden kann. Im Folgenden wird die Herstellung des Mikroprimas auf Basis von optischer Lithographie kurz erläutert. In Abb.5-17 ist der grobe Ablauf zur Herstellung des Mikroprimas gezeigt.

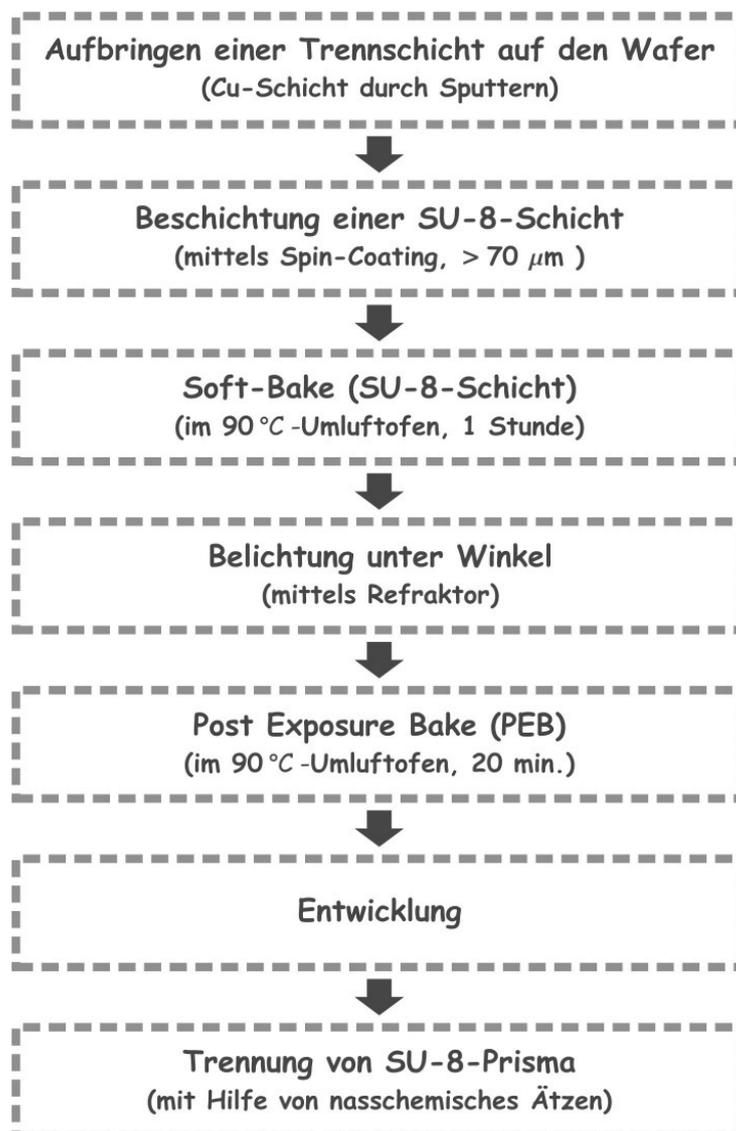


Abb.5-17 Grober Ablauf zur Herstellung des Mikroprimas (optische Lithographie)

Im Vergleich mit der Anfertigungsmethode auf Basis der Mikrofrästechnik befinden sich keine großen und prozesstechnischen Unterschiede. Nur statt der Mikrofrästechnik mithilfe des 45° -profilierten Diamant-Mikrowerkzeuges wird das Mikroprisma durch eine Modifizierung der Belichtungskonfiguration auf Basis der Refraktion angefertigt. Exemplarisch ist in Abb.5-18 das SU-8-Mikroprisma gezeigt, welches durch die Erzeugung des Belichtungswinkels 45° hergestellt wird.

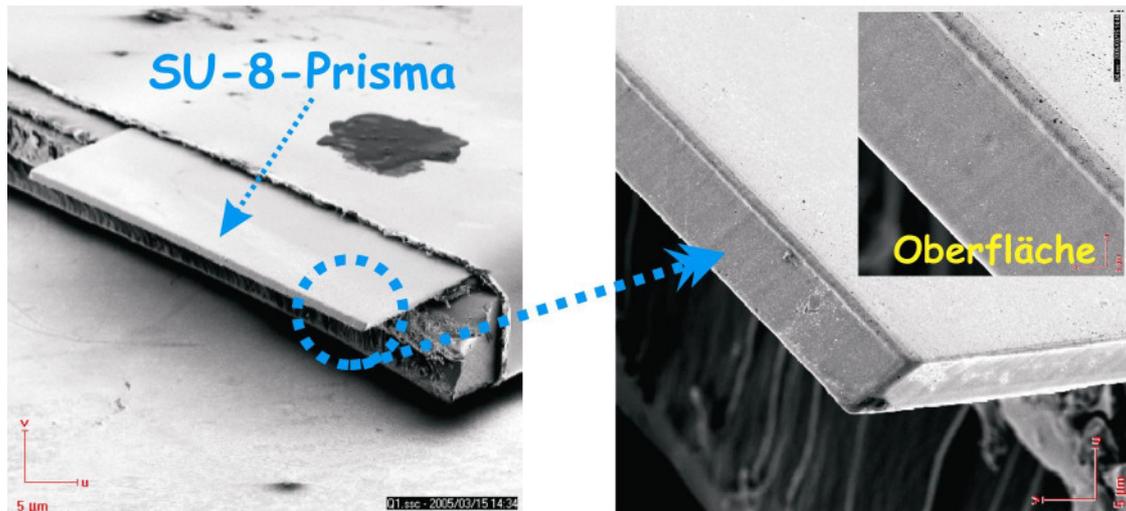


Abb.5-18 Hergestelltes Mikroprisma (optischer Lithographie)

Hinsichtlich der kostengünstigen Massenfabrikation weist die Herstellungsmethode auf Basis der optischen Lithographie eine bessere Perspektive auf, da die mechanische Mikrofertigung auf Basis der Mikrofrästechnik einen technischen Aufwand zeigt und außerdem die Anfertigungskosten des 45° -profilierten Diamant-Mikrowerkzeuges momentan zurecht hoch sind.

Jedoch hat hinsichtlich der Automatisierung für die Massenproduktion die mechanische Mikrofertigung eine bessere Möglichkeit, da die Prozessschritte bei der mikrofrästechnischen Strukturierung zu programmieren sind.

5.2.3 Koppelstelle mit Mikroprisma

Wie in Abb.5-19 gezeigt, wird das strukturierte 45° -Mikroprisma am Ende von Multimode-Wellenleiter mit 12 Kanälen integriert, um die Erfüllung des Koppelkonzeptes zu betrachten. In Abb.5-19(a) ist der schematische Aufbau zur Betrachtung der Funktion gezeigt. Abb.5-19(b) zeigt, dass 12 Beleuchtungen der reflektierenden Oberfläche des Mikroprismas zu sehen ist. Innerhalb des Fotos (oben) in Abb.5-19(b) ist eine Beleuchtung eines Kanals

exemplarisch gezeigt.

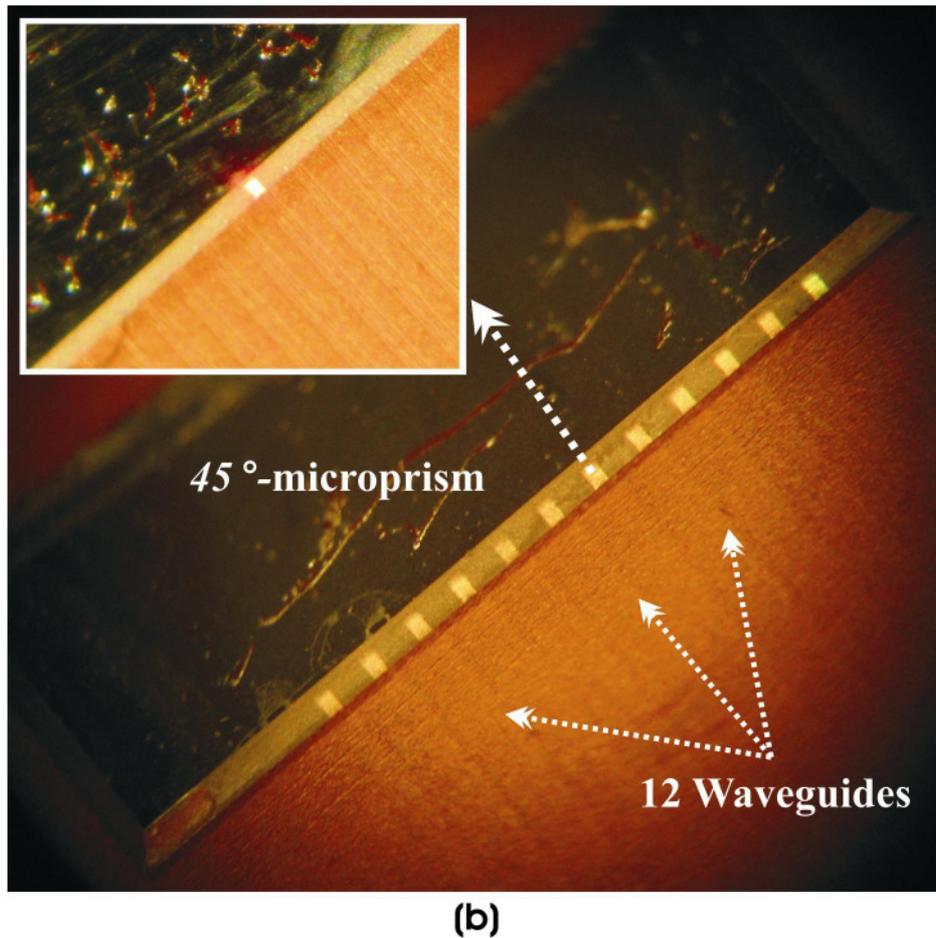
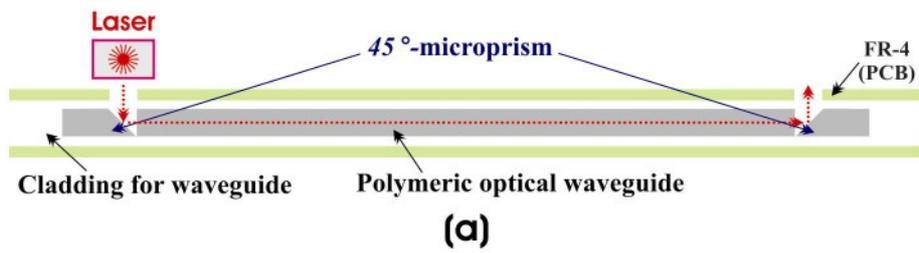


Abb.5-19 Koppelstelle mit 45°-Mikroprisma

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden mikrolithographischen Verfahren auf der Basis des Negativ-Fotoresists SU-8 für die kostengünstige Massenfabrikation von optischen 3D-Koppelementen wie z.B. integrierten Mikrosiegeln und Mikroprismen zur Anwendung in der optischen Übertragungstechnik vorgestellt. Gegenüber LIGA-Verfahren mittels Synchrotronstrahlung bieten die entwickelten mikrolithographischen Verfahren auf Basis von SU-8 als eine kostengünstige Alternative zur Herstellung von Mikrostrukturen oder Mikrokomponenten.

Der Fotoresist SU-8 zeichnet sich durch hohe Empfindlichkeit, hohe Transparenz und chemische Beständigkeit aus. Im Vergleich mit anderen Fotoresists weist der SU-8 ein relativ hohes Aspektverhältnis und eine hervorragende Oberflächenqualität auf. Jedoch zeigt der SU-8 neben ausgezeichneten Eigenschaften auch einige Nachteile: Die für Negativ-Fotoresists typische Hinterschneidung und die inkomplette Auflösung des SU-8 nach der galvanischen Abscheidung. Diese Probleme treten häufig auf, so dass sich der Fotoresist SU-8 nur eingeschränkt nutzen lässt.

Aus diesem Grund wurde durch theoretische Überlegungen und experimentelle Versuche die Prozessierung des SU-8 zur Überwindung der oben genannten Hindernisse in dieser Arbeit untersucht und entwickelt, um die potenziellen Möglichkeiten des Fotoresist SU-8 weiter zu erschließen.

Zur Vermeidung der Hinterschneidung wurden zwei Belichtungsmethoden, die *Reflexions-* und die *Laserdirektbelichtung*, theoretisch untersucht und experimentell überprüft. Das Auflösungsproblem des SU-8 nach der Galvanoformung wurde durch ein Abformverfahren auf Basis von PDMS/Gießharz-Materialsystemen – Soft-Abformung – umgangen: Bei der Galvanoformung wurde das Metall nicht direkt auf die SU-8-Vorform abgeschieden, sondern auf ein Gießharz-Replikat, um einen sauberen und metallischen Formeinsatz anfertigen zu können.

Schließlich wurden zwei Koppelkonzepte durch 90° Strahlungsumlenkung auf Basis von integrierten Mikrosiegeln oder Mikroprismen realisiert und demonstriert: Als erstes Konzept wurde der metallische Formeinsatz für Multimode-Wellenleiter mit 45° integrierten Mikrosiegeln auf Basis von den entwickelten mikrolithographischen Verfahren hergestellt. Dabei wurden die integrierten Mikrosiegel mit Hilfe der Mikrofrästechnik angefertigt, die auf der Oberflächenstrukturierung durch Präzisionszerspannung beruht. Anschließend wurden die

aus diesem Formeinsatz realisierten Wellenleiter mit integrierten Mikrosiegeln demonstriert. Daneben wurde das zweite Koppelkonzept auf Basis des Mikroprismas realisiert, und seine Funktion wurde auch unter Beweis gestellt. Dabei wurden zur Anfertigung der Mikroprismen Verfahren der Mikrofrästechnik und der optischen Lithographie vorgestellt.

Die vorgestellten mikrolithographischen Verfahren zeigen, dass der Negativ-Fotoresist SU-8 hervorragend für den Einsatz in der Mikrostrukturtechnik geeignet ist. Die Strukturierung des SU-8 weist gegenüber LIGA-Verfahren mittels Synchrotronstrahlung eine sehr gute Perspektive zur kostengünstigen Herstellung von Mikrostrukturen oder Mikrokomponenten auf. Jedoch ist es nötig, die vorgestellten Verfahren auf Basis von SU-8 weiter zu optimieren.

Das vorgestellte Abschätzungsmodell auf Basis der Intensitätsverteilung zeigt eine tendenzielle Übereinstimmung zwischen Berechnungen und Experimenten. Mit Hilfe dieses Modells sind die belichteten Resistprofile nicht exakt vorherzusagen, jedoch ist eine Tendenz in Abhängigkeit von Parametern (z.B. der Belichtungs-dosis, des Abstand zwischen Maske und Resistoberfläche, oder des Reflexionsgrads) näherungsweise zu bestimmen, d.h., die Abschätzung auf Basis dieses Modells kann als Design-Regel für den Belichtungsprozess verwendet werden.

Literatur

- [01] W. Menz, J. Mohr : „**Mikrosystemtechnik für Ingenieure**“, 2. Erw. Auflage, VCH-Verlag, 1997
- [02] E. Hecht : „**Optik**“, 3. Auflage, Oldenbourg Verlag, 2001
- [03] M. Born, E. Wolf : „**Principles of Optics**“, 6. Edition, Cambridge University Press, 1997
- [04] H-J, Eichler : „**Bergmann-Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik - Band 3 Optik**“, 9. Auflage, Walter de Gruyter, 1993
- [05] B. Wittmann : „**Optische Kurzstreckenverbindung auf der Basis polymeroptischer Komponenten**“, Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Dortmund, 2003.
- [06] E. Rabe : „**Herstellung und Charakterisierung von vielwelligen Lichtwellenleiterkomponenten aus Polymerwerkstoffen**“, Diplomarbeit an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Dortmund, 2001.
- [07] J. Jankowski : „**Polymere Multimode-Wellenleiter für die Integration in Multilayer-Platinen**“, Diplomarbeit an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Dortmund, 1999.
- [08] Y.-J. Chuang, F.-G. Tseng, W.-K. Lin : „**Reduction of diffraction effect of UV exposure on SU-8 negative thick photoresist by air gap elimination**“, Microsystem Technologies 8, 2002, 308 – 313.
- [09] Y.-J. Chuang, F.-G. Tseng, J.-H. Cheng, W.-K. Lin : „**A novel fabrication method of embedded micro-channels by using SU-8 thick-film photoresists**“, Sensor and Actuators A 103, 2003, 64 – 69.
- [10] Y. Cheng, C.-Y. Lin, D.-H. Wei, B. Loechel, G. Gruetzner : „**Wall Profile of Thick Photoresist Generated via Contact Printing**“, IEEE Journal of Microelectrochemical Systems Vol. 8, No. 1, 1999, 18 – 26.
- [11] J.M. Shaw, J.D. Gelorme, N.C. LaBianca, W.E. Conley, S.J. Holmes : „**Negative photoresists for optical lithography**“, IBM Journal of Research and Development, Vol. 41, No. ½, 1997, 81 – 94.
- [12] J. Zhang, MB. Chan-Park, S.R. Conner : „**Effect of exposure dose on the replication fidelity and profile of very high aspect ratio microchannels in SU-8**“, Lap Chip, 4, 2004, 646 – 653.

- [13] H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, N. LaBianca, P. Renaud, P. Vettiger : „**SU-8: a low-cost negative resist for MEMS**“, J. Micromech. Microeng., 7, 1997, 121 – 124.
- [14] „**NANO™ SU-8 Negative Tone Photoresist**“, Data Sheet, MicroChem.
- [15] <http://www.shimadzu.com.br/analitica/aplicacoes/book/ind81.pdf>
- [16] M.H. Han, W.S. Lee, S.K. Lee, S.S. Lee : „**3D microfabrication with inclined/rotated UV Lithography**“, Sensor and Actuators A 111, 2004, 14 – 20.
- [17] K.Y. Hung, H.T. Hu, F.G. Tseng : „**Application of 3D glycerol-compensated inclined-exposure technology to an integrated optical pick-up head**“, Journal. Micromech. Microeng., 14, 2004, 975 – 983.
- [18] Y.K. Yoon, J.H. Park, F. Cros, M.G. Allen : „**Integrated Vertical Screen Microfilter System Using Inclined SU-8 Structures**“, Proceeding of IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2003, Kyoto, Japan, 227 – 230.
- [19] H. Sato, T. Kakayuki, J.S. Go, S. Shoji : „**A novel fabrication of in-channel 3-D micromesh structure using maskless multi-angle exposure and its microfilter application**“, Micro Electro Mechanical Systems, 2003. MEMS-03 Kyoto. IEEE The Sixteenth Annual International Conference, 2003, 223 – 226.
- [20] H. Sato, Y. Houshi, S. Shoji : „**Three-dimensional micro-structures consisting of high aspect ratio inclined micro-pillars fabricated by simple photolithography**“, Microsystem Technologies 10, 2004, 440 – 443.
- [21] K.S. Kim, S.W. Park, H. Manohara, J.B. Lee : „**Polydimethylsiloxane (PDMS) for High Aspect Ratio Three-dimensional MEMS**“, 2000 International Symposium on Mechatronics and Intelligent Mechanical System for 21 Century (ISIM2000), Oct. 4 - 7, 2000, KyongSangNam-Do, Korea.
- [22] K.S. Kim, S.W. Park, J.B. Lee, H. Manohara, Y. Desta, M. Murphy, C.H. Ahn : „**Rapid Replication of Polymeric and Metallic High Aspect Ratio Microstructures using PDMS and LIGA Technology**“, presented in **HARMST 2001** , Jun. 17-19, 2001, Baden-Baden, Germany.
- [23] S.W. Park, K.S. Kim, H. Manohara, J.B. Lee : „**Massive Replication of Polymeric High Aspect Ratio Microstructures Using PDMS Casting**“, SPIE 2001 Smart Electronics and MEMS, Mar.4 - 8, 2001, Newport Beach, CA, USA.
- [24] R. Feng, R.J. Farris : „**Influence of processing conditions on the thermal and mechanical properties of SU8 negative photoresist coatings**“, Journal. Micromech. Microeng., 13, 2003, 80 – 88.
- [25] Y. Xia, G.M. Whitesides : „**Soft Lithography**“, Ann. Rev. Mater. Sci., 1998, 153 – 184.

- [26] <http://aveclafaux.freesevers.com/SU-8.html>
- [27] <http://idw-online.de/pages/de/news70635>
- [28] B.T. Lee, M.S. Kim, J.B. Yoon, S.Y. Shin : „**Fabrication of Polymeric Large-Core Waveguides for Optical Interconnects Using a Rubber Molding Process**“, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 12, No. 1, 2000, 62 – 64.
- [29] http://www.polytechsilimed.info/company/cms/front_content.php?idcat=57&lang=1
- [30] B. Dancen : „**Rapid Fabrication of Microfluidic Devices by Photocopying**“, Semiconductor International, January 01, 2002.
- [31] <http://www.vs-c.de/vsengine/fulltext.html?query=Gie%DFharz>
- [32] Donald R. Askeland : „**Materialwissenschaften**“, Spektrum Akademischer Verlag, 1996
- [33] W. Ludeck : „**Handbuch der Kleb-, Giess- und Laminieretechnik**“, VEB Deutscher Verlag Für Brundstoffindustrie, 1985
- [34] „**XOR-Polyester-Gießharz**“, Data Sheet, Glorex.
- [35] S. Kopetz, E. Rabe, W.J. Kang, A. Neyer : „**Polysiloxane optical waveguide layer integrated in printed circuit board**“, Electronics Letters, Vol. 40, No. 11, 2004, 668 – 669.
- [36] H. Schröder, E. Starke, A. Himmler : „**Heißgeprägte Polymerwellenleiter für elektrisch-optische Schaltungsträger (EOCB) – Technologie und Charakterisierung**“, DVS/GMM-Tagung “Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Fertigungstechnik“, 2002, Fellbach, Germany.
- [37] C.H. Lin, G.B. Lee, B.W. Chang, G.L. Chang : „**A new fabrication process for ultra-thick microfluidic microstructures utilizing SU-8 photoresist**“, Journal. Micromech. Microeng., 12, 2002, 590 – 597.
- [38] H. Altenburg, J. Plewa, G. Plesch, O. Shpotyuk : „**Thick films of ceramic, superconducting and electro-ceramic materials**“, Pure Appl. Chem., Vol. 11, No. 11, 2002, 2083 – 2096.
- [39] UBM Messtechnik GmbH : „**Optisches Messsystem Microfocus**“, Manual
- [40] „**Wyko NT1000**“, Setup Guide und Technical Reference Manual.
- [41] D. Siepe : „**Mikrofluidisches Analysesystem zur Untersuchung von wässrigen Lösungen**“, Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Dortmund, 2003.

- [42] S. Tombrink : „**Herstellung und Charakterisierung passiver Multimode-Lichtwellenleiterkomponenten auf der Basis von Polysiloxanen**“, Studienarbeit an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Dortmund, 2004.
- [43] Harry. J. Levinson : „**Principles of Lithography**“, SPIE Press, 2001.
- [44] S. Kopecz : „**Auslegung und Herstellung dämpfungsarmer Polymerwellenleiter mit Koppелеlementen zur Integration in Multilayer-Platinen**“, Diplomarbeit an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Dortmund, 2000.
- [45] V. Kudryashov, X.-C. Yuan, W.-C. Cheong, K. Radhakrishnan : „**Grey scale structures formation in SU-8 with e-beam and UV**“, Microelectronic Engineering, Vol. 67-68, 2003, 306 – 311.
- [46] R. Yoshimura, M. Hikita, M. Usui, S. Tomaru, S. Imamura : „**Polymeric optical waveguide films with 45 °mirrors formed 90 °V-shaped diamond blade**“, Electronics Letters, Vol. 33, 1997, 1311 – 1312.
- [47] B.S. Rho, S.Y. Kang, H.S. Cho, H.H. Park, S.W. Ha, B.H. Rhee : „**PCB-Compatible optical interconnection using 45 °Ended connection rods and via-holed waveguides**“, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 22, 2004, 2128 – 2134.
- [48] K.B. Yoon, I.K. Cho, S.H. Ahn, M.Y. Jeong, D.J. Lee, Y.U. Heo, B.S. Rho, H.H. Park, B.H. Rhee : „**Optical Backplane System using waveguide-embedded PCBs and optical slots**“, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 22, 2004, 2119 – 2127.
- [49] S.P. Han, J.T. Kim, S.W. Jung, S.H. Ahn, C.G. Choi, M.Y. Jeong : „**A reflective curved mirror with low coupling loss for optical interconnection**“, IEEE Photonics, Vol. 16, No.1, 2004, 185 – 187.
- [50] J. Gan, L. Wu, H. Luan, B. Bihari, R.T. Chen : „**Two-Dimensional 45 ° surface-normal microcoupler array for guided-wave optical clock distribution**“, IEEE Photonics, Vol. 11, No.11, 1999, 1452 – 1454.
- [51] L. Wang, J.H. Choi, X. Wang, R.T. Chen : „**Thin film optical waveguide and optoelectronic device integration for fully embedded board level optical interconnects**“, Proc. SPIE, Vol. 5556, 2004, 1 – 14.
- [52] J. Marcou : „**Plastic optical Fibers**“, John Wiley & Sons, 1997
- [53] W. Karthe, R. Müller : „**Integrierte Optik**“, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig, 1991
- [54] H. Sorg : „**Praxis der Rauheitsmessung und Oberflächenbeurteilung**“, Carl Hanser Verlag, München, 1995

- [55] T.A. Brunner, R.A. Ferguson : „**Approximate models for resist processing effects**“, Proc. SPIE Optical Microlithography IX, Vol. 2726, 1996, 198 – 207.
- [56] H. Moritz : „**High Resolution Lithography with Projection Printing**“, IEEE Transaction on Electron Devices, Vol. ED-26, 1979, 705 – 710.
- [57] M.D. Smith, C.A. Mack : „**Process Sensitivity and Optimization with Full and Simplified Resist Models**“, Proc. SPIE Optical Microlithography XVI, Vol. 5040, 2003, 1509 – 1520.
- [58] A. Donges, R. Noll : „**Lasermesstechnik**“, Hüthig Buch Verlag, 1993
- [59] B. Li, H. Yu, A. Sharon, X. Zhang : „**Rapid three-dimensional manufacturing of microfluidic structures using a scanning laser system**“, Applied Physics Letters, Vol. 85, No. 12, 2004, 2426 – 2428.
- [60] Y. Cheng, T. Huang, C.-C. Chieng : „**Thick-film lithography using laser write**“, Microsystem Technologies 9, 2002, 17 – 22.
- [61] H. Yu, O. Balogun, B. Li, T.W. Murray, X. Zhang : „**Building embedded microchannels using a single layered SU-8, and determining Young’s modulus using a laser acoustic technique**“, Journal. Micromech. Microeng., 14, 2004, 1576 – 1584.
- [62] <http://www.tu-chemnitz.de/physik/POM/Pages/Lecture2.pdf>
- [63] <http://www.spiricon.com/techinfo/publications/scientific>
- [64] <http://www.bjlaser.com/literatures/laser%20mode%20and%20spectra.pdf>
- [65] C.N. Ahn, H.B. Kim, K.H. Baik : „**A Novel Approximate Model for Resist Process**“, Proc. SPIE Optical Microlithography XI, Vol. 3334, 1998, 752 – 763.
- [66] Heidelberg Instruments : „**DWL66 Manual**“
- [67] <http://www.ece.cmu.edu/~mems/resources/HH1216/dwl66.shtml>

Anhang

Hilfsverfahren zur Herstellung eines mikrostrukturierten Formeinsatzes

In diesem Anhang werden die Hilfsverfahren, die in dieser Arbeit zum Einsatz kommen, zur Herstellung eines mikrostrukturierten Formeinsatzes beschrieben. Zur 3D-Strukturierung wird auf eine Mikrofrästechnik als eine Oberflächenstrukturierung durch die Zerspanung mit einem profilierten Mikrowerkzeug eingegangen. Anschließend wird ein Abformverfahren auf Basis von Elastomer/Gießharz, so genannte *Soft-Abformung*, dargestellt.

A.1 Mikrofrästechnik

Die optische Lithographie wird bereits erfolgreich zur Herstellung von Mikrostrukturen und/oder Mikrokomponenten eingesetzt. Neben der optischen Lithographie ist heutzutage eine Mikrofrästechnik auch struktur- oder/und zielbedingt sicherlich vorstellbar. Neuere Methoden der spanabhebenden Bearbeitung erlauben eine Strukturierung von Bauteilen mit Abmessung im Mikrometerbereich, da Mikrofräsmaschinen in der Lage sind, Bauteile mit Maß- und Formgenauigkeiten durch Präzisionszerspanung mit *profilierten Mikrowerkzeugen* zu bearbeiten. Mit Hilfe der Mikrozerspanung können Kleinserien von mikrostrukturierten Teilen und Prototypen kostengünstig hergestellt werden. Jedoch erweist sich dieses Verfahren in vielen Fällen aus Kostengründen für eine direkte Produktionsfertigung weniger geeignet. Hiermit lassen sich aber Abformwerkzeuge für Heißpräge- und Spritzgussverfahren sehr gut herstellen [01].

In diesem Abschnitt wird eine Mikrofrästechnik zur Herstellung einer 3D-Mikrokomponente wie z.B. *Mikrospiegel* beschrieben, die auf der Oberflächenstrukturierung von Substraten – photolithographisch angefertigten SU-8-Strukturen für Multimode-Wellenleiter – durch Präzisionszerspanung mit *profilierten Mikrowerkzeugen* aus Diamant beruht.

In Abb.A-1 ist eine präzise Mikrofräsmaschine (*PFM 24*, Firma Primacon GmbH) gezeigt, die in dieser Arbeit verwendet wird. Im Folgenden wird die Mikrofräsmaschine kurz vorgestellt: Die *PFM 24* hat Fahrwege in die x -, y - und z -Richtung ($240 \times 240 \times 240 \text{ mm}$) und wird durch CNC (Computer Numeric Control; *Heidehain TNC 430*) gesteuert. Dabei bietet die Maschine in der Achs-positionierung eine Absolut-Genauigkeit von $\pm 2 \mu\text{m}$ und

eine Wiederhol-Genauigkeit von $\pm 0.5 \mu\text{m}$, ein Arbeitsvorschub kann zwischen 0.02 und 5000 mm/min eingestellt werden. Diese Maschine ist mit einer Hochfrequenzspindel ausgestattet, der eine stufenlose Drehzahl zwischen 300 und 40000 rpm erlaubt, außerdem mit einem Wasser-Kühlsystem versehen.

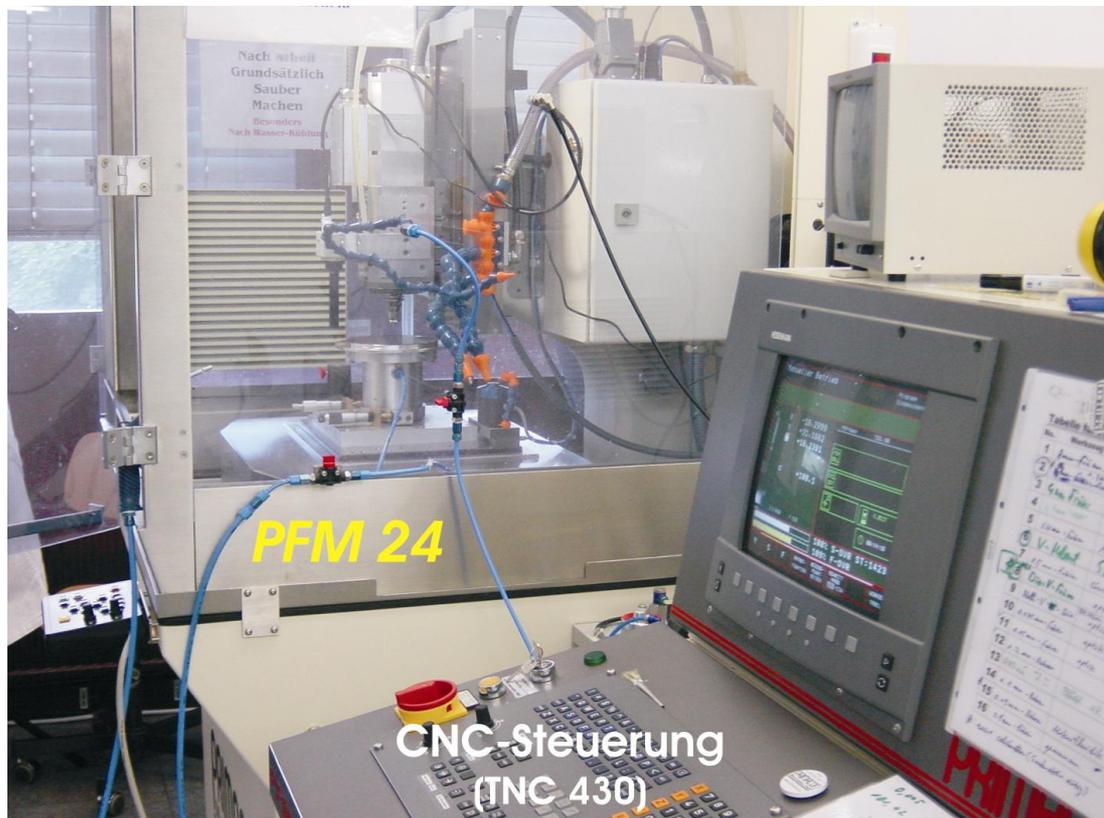


Abb.A-1 Mikrofräsmaschine (PFM 24 und CNC-Steuerung)

Um Mikrospiegel als optische 3D-Koppelemente an den photolithographisch hergestellten SU-8-Strukturen für Multimode-Wellenleiter auf dem Wafer integrieren zu können, ist eine Vorrichtung, mit welcher möglichst exakt der Wafer in Bezug auf den Fräskopf (hier Hochfrequenzspindel) zu justieren ist, unbedingt erforderlich; die Mikrospiegel müssen senkrecht – *Parallelität* – zu Wellenleitern integriert werden, und der Winkel des Mikrospiegels muss 45° – *Nivellierung* oder *Keilkorrektur* – betragen.

In Abb.A-2 sind ein Foto und eine schematische Darstellung der entwickelten Vorrichtung zur Justierung des Wafers gegen den Fräskopf gezeigt: Diese Vorrichtung besitzt einen Vakuumteller (1) in Abb.A-2 zur Haltung des Wafers für 6-Zoll-Größe und ist auch mit einem Kugellager (4) ausgestattet, um den Vakuumteller für die Parallelität mit Hilfe von zwei Mikrometerschrauben (2) und zwei Flügel (5) drehen zu können. Die Keilkorrektur kann mittels vier Schrauben (3) unter dem Vakuumteller durchgeführt werden.

Anhang Hilfsverfahren

Der Fräskopf ist mit einer CCD-Kamera versehen, so dass bei der Korrektur der Parallelität durch die Überprüfung mittels CCD-Kamera der Wafer möglichst parallel zu dem Fräskopf ausgerichtet werden kann. Der Keilfehler wird durch die Verwendung einer Messuhr korrigiert (In Abb.A-3).

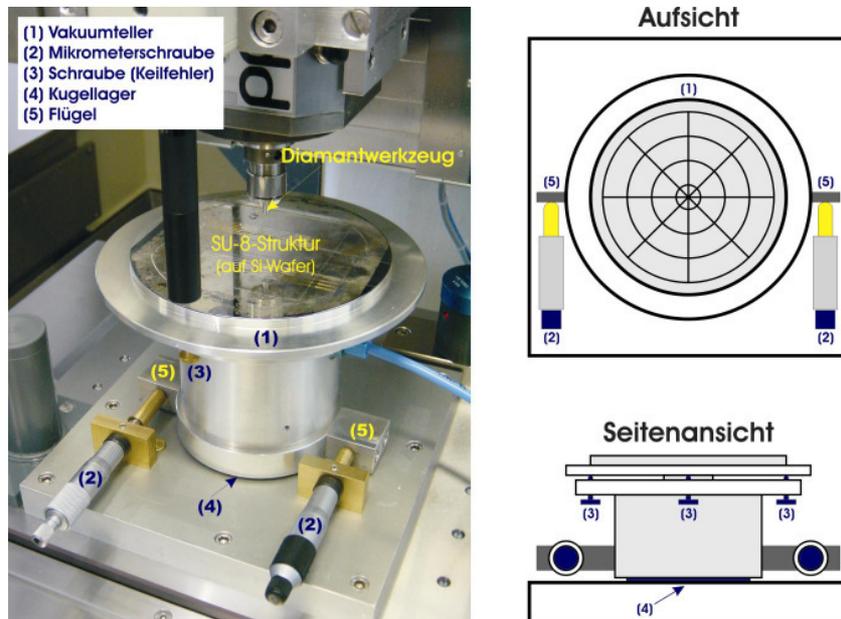


Abb.A-2 Foto (links) und schematische Darstellung (rechts) der entwickelten Vorrichtung

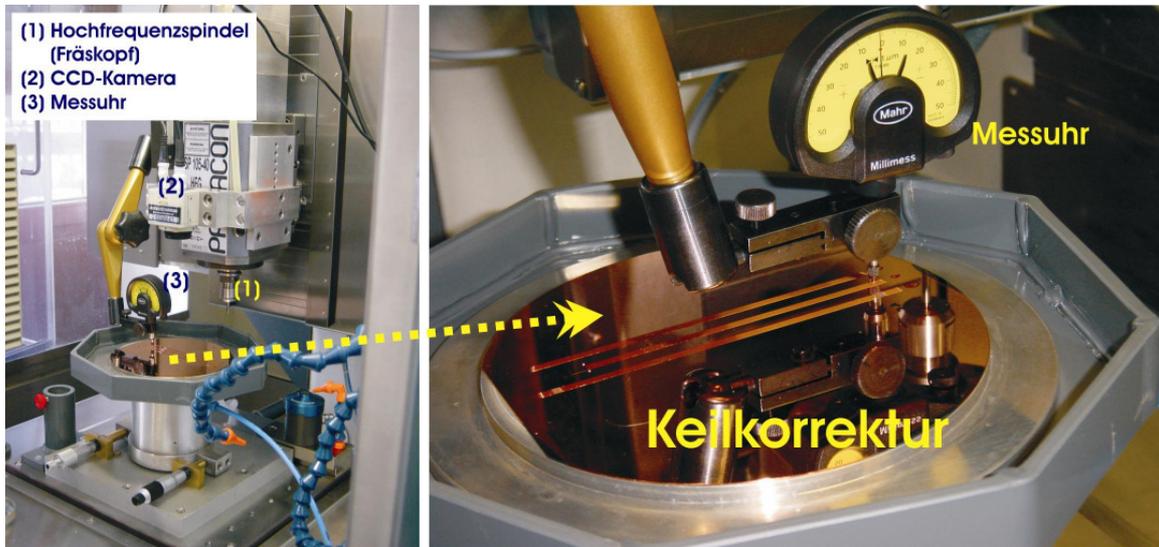


Abb.A-3 Keilkorrektur mit Hilfe einer Messuhr

Bei der Strukturierung der integrierten Mikrospiegel wird vorzugsweise ein *profiliertes* Diamantwerkzeug (Firma Contour Fine Tooling BV) eingesetzt, das an der Spitze mit einem Winkel 45° versehen ist, da die Werkzeugqualität von entscheidender Bedeutung für die

Qualität der Spiegelflächen ist, welche sich direkt auf die Streuverluste an den Spiegeln auswirkt. In Abb.A-4 sind das in dieser Arbeit verwendete profilierte Diamantwerkzeug und die damit strukturierten Mikrospiegel am Ende der Wellenleiter exemplarisch gezeigt. Die genaue Beschreibung zur Herstellung des Mikrospiegels folgt im Kapitel 5.1.

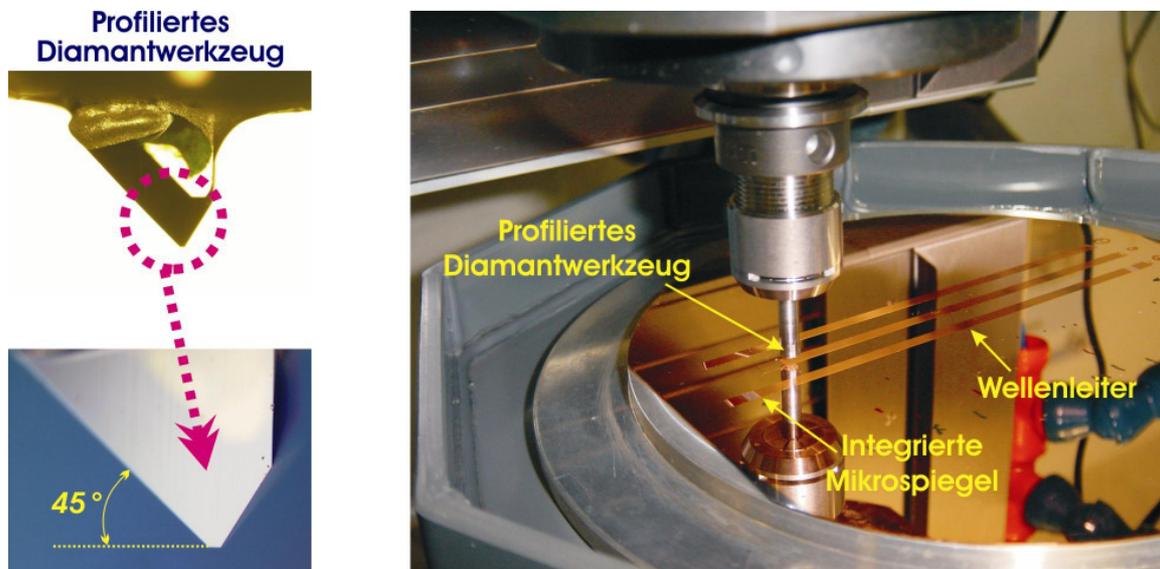


Abb.A-4 Profiliertes Diamantwerkzeug und integrierte Mikrospiegel am Ende der Wellenleiter

Wie bereits erwähnt, muss die mit dem Diamantwerkzeug gefräste Oberfläche eine optische Qualität – *niedrige Rauheit* – aufweisen. Daher muss vor der Strukturierung zuerst das Diamantwerkzeug charakterisiert werden, so dass die Mikrospiegel mit den gefundenen Fräsparametern wie z.B. *Drehzahl* und *Vorschub* hergestellt werden können. Hierbei werden PMMA (Polymethylmethacrylat) und SU-8 als ein zu zerspanendes Material verwendet, um gefräste Profile wie z.B. *Oberflächenrauheit* und geschnittene *Kante* zu untersuchen.

In Abb.A-5 ist die Rauheit R_a der gefrästen Oberfläche von PMMA und SU-8 in Abhängigkeit der Drehzahl bei einem konstanten Vorschub von 10 mm/min gezeigt, wobei beim Fräsen als Kühlungsmedium Wasser verwendet wird. Bei beiden Materialien neigt das experimentelle Resultat dazu, dass bei der schnelleren Drehzahl die gefräste Oberfläche eine verbesserte Rauheit aufweist. Jedoch ist für beiden Materialien die Rauheit R_a ab 20000 rpm quasi konstant geblieben (gesättigt). Im Vergleich zu SU-8 weist die Oberfläche bei PMMA die bessere Rauheit auf. Dies wird vermutlich daran liegen, dass PMMA weich ist, während SU-8 spröde ist.

Für Kunststoffe zeigt das experimentelle Resultat, dass die gefräste Oberfläche ohne Verwendung eines Kühlungsmediums wie z.B. Wasser fast materialunabhängig meistens das schlechte Oberflächenprofil – *die schlechtere oder verdoppelte Rauheit* – aufweist. Dies

liegt wahrscheinlich daran, dass beim Fräsen eine Friktion zwischen einem verwendeten Werkzeug und einem zu zerspanenden Material entsteht und eine Wärmeenergie erzeugt wird, so dass diese Wärmeenergie die gefräste Oberfläche beeinträchtigen kann. Dies kann sich auf einige Kunststoffe, welche eine niedrige Glasübergangstemperatur besitzen, besonders stark negativ auswirken.

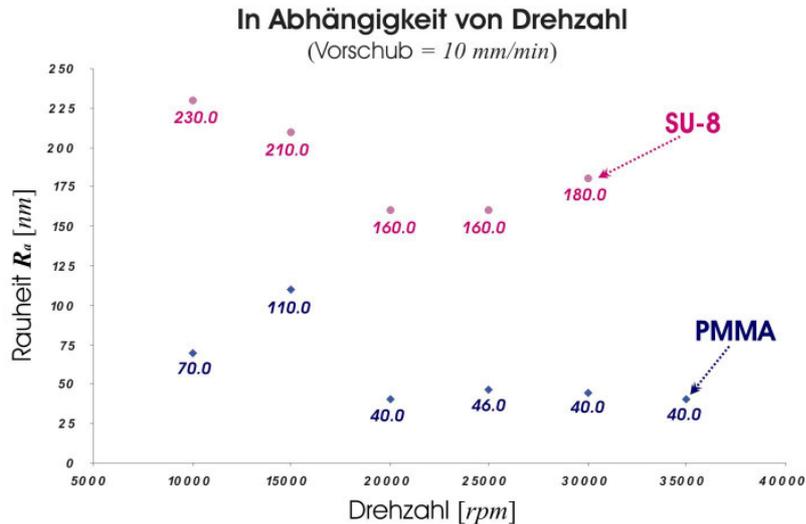


Abb.A-5 Rauheit R_a in Abhängigkeit von Drehzahl bei PMMA und SU-8

In Abb.A-6 ist die Oberfläche von PMMA, die ohne Verwendung der Wasserkühlung gefräst wurde, exemplarisch gezeigt. Hier ist erkennbar, dass die schlechte Oberfläche auf die Nicht-ableitung der entstehenden Wärmeenergie durch Wasserkühlung zurückzuführen ist. Daraus resultiert, dass bei Bearbeitung eines Kunststoffes auf Basis von Mikrofrästechnik die Verwendung eines Kühlungsmediums unverzichtbar ist.

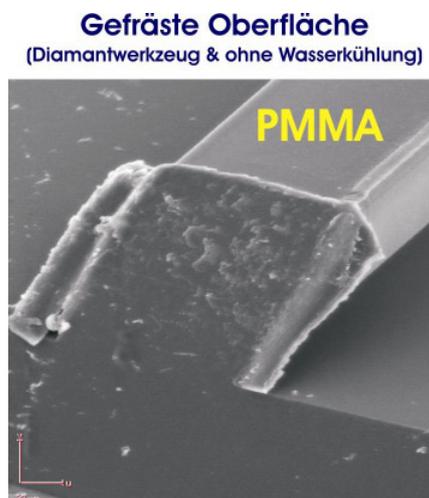


Abb.A-6 Gefräste Oberfläche von PMMA ohne Wasserkühlung

Gemäß Abb.A-5 wird eine Drehzahl von 25000 rpm ausgewählt, und damit wird noch mal die Rauheit R_a der gefrästen Oberfläche von SU-8 in Abhängigkeit des Vorschubes untersucht.

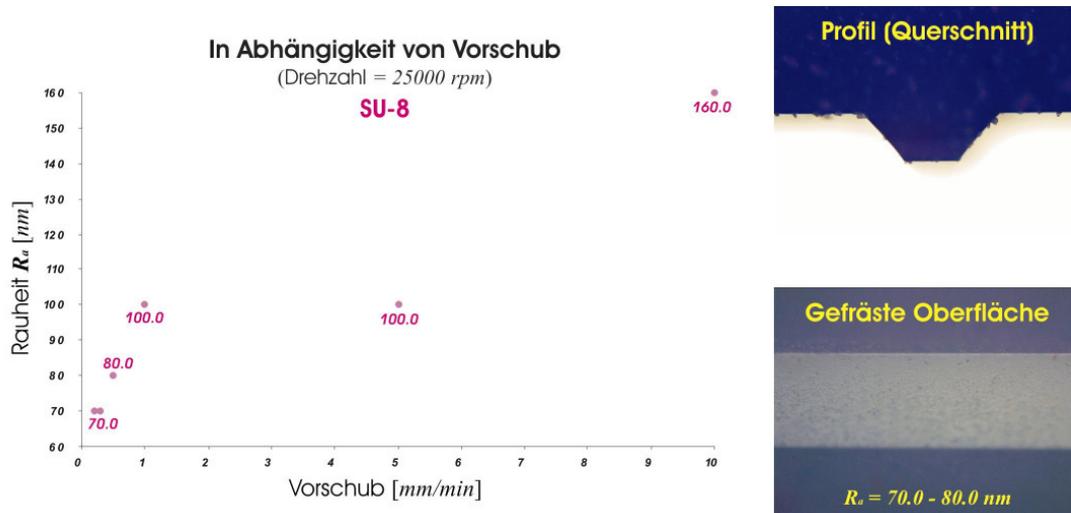


Abb.A-7 Rauheit in Abhängigkeit von Vorschub, Profil und gefräste Oberfläche bei SU-8

In Abb.A-7(links) ist der Zusammenhang zwischen der Rauheit und dem Vorschub bei einer konstanten Drehzahl von 25000 rpm dargestellt. Die gefräste Oberfläche verbessert sich bei dem langsamer werdenden Vorschub und weist bei einem Vorschub unter ca. 5 mm/min eine gute Qualität ca. 100 nm auf.

In Abb.A-7(rechts) sind das Profil (Querschnitt) und das Foto der gefrästen Oberfläche von SU-8 gezeigt. Hier beträgt der Winkel $45^\circ \pm 2^\circ$ und die Rauheit liegt bei ca. $70 - 80 \text{ nm}$ bei einer Drehzahl von 25000 rpm und einem Vorschub von $0.2 - 0.3 \text{ mm/min}$.

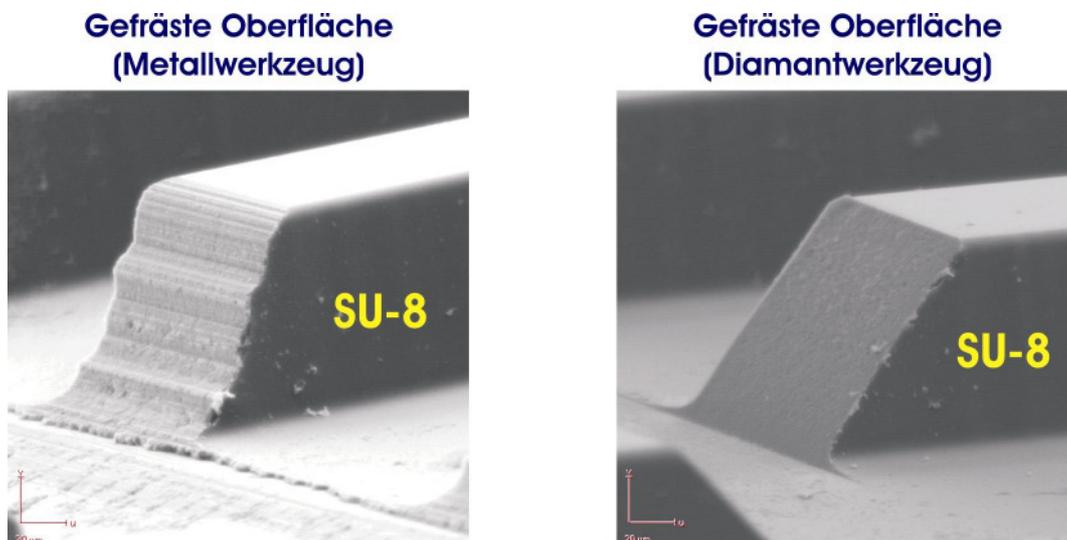


Abb.A-8 Gefräste Oberfläche bei SU-8 (Vergleich zwischen Metall- und Diamantwerkzeug)

In Abb.A-8 sind zwei gefräste Profile zum Vergleich zwischen Metall- und Diamantwerkzeug exemplarisch gezeigt. Das eine (links) wurde mit einem profilierten Metallwerkzeug gefräst, das andere (rechts) mit einem Diamantwerkzeug (Abb.A-4). Hierbei sind die Unterschiede wie z.B. geschnittene Kante, Winkel und Oberflächenprofil deutlich zu erkennen: Beim Diamantwerkzeug sind die saubere Kante, die bessere Oberfläche und der Winkel sicherlich zu sehen im Vergleich zum Metallwerkzeug.

A.2 Abformverfahren auf Basis von Elastomer/Gießharz

Für die abformtechnischen Verfahren auf Basis von Heißpräge oder Spritzguß kommt ein stabiler und metallischer Formeinsatz als ein Abformwerkzeug zum Einsatz. Der metallische Formeinsatz wird durch eine galvanische Abscheidung (Galvanoformung) erzeugt, wobei eine mikrolithographisch hergestellte Vorform, wie z.B. SU-8-Vorform, verwendet wird. Jedoch zeigt der prozessierte Fotor resist SU-8 nach der Galvanoformung neben der hervorragenden Eigenschaften und Strukturierungsmöglichkeiten ein Problem – nach dem Galvanikprozess können die SU-8-Reste von der Nickel-Vorform (metallischen Vorform) nicht komplett entfernt werden, sondern sind zum Teil hängengeblieben (In Abb.A-9). Dieses Ablösungsproblem tritt häufig auf, so dass sich der SU-8 nur eingeschränkt nutzen lässt.

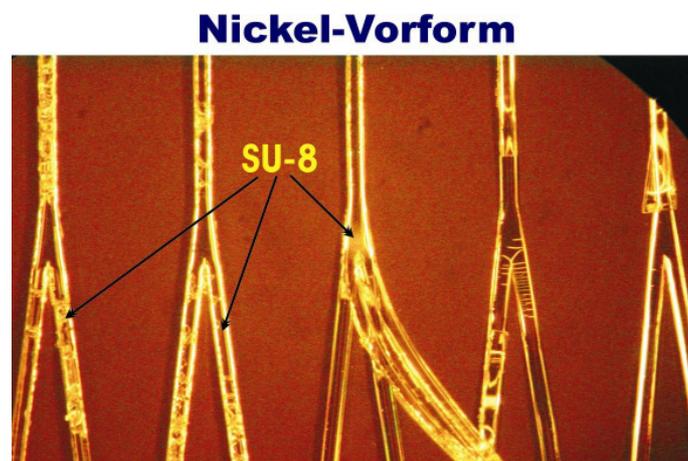


Abb.A-9 Nicht komplett zu entfernende SU-8-Reste von Nickel-Vorform

In der Literatur [13, 26, 27] wird zur Entfernung von SU-8-Reste aus einer galvanisch erzeugten Struktur von verschiedenen Verfahren wie z.B. nasschemisches Ätzen, thermische Belastung und O_2 -Plasma-Behandlung berichtet. Jedoch können sie struktur-oder/und zielbedingt anwendbar sein, da die Oberfläche der galvanisch erzeugten Struktur durch solche Behandlung beschädigt werden kann.

Neben solchen Verfahren wird eine Methode [21, 22] von *Kim* und *Park* berichtet: Durch ein Replikat der SU-8-Struktur mit Hilfe eines Elastomers (PDMS; Polydimethylsiloxan) kann eine metallische Struktur galvanisch erzeugt werden. Hierbei gibt es jedoch Probleme; die Oberfläche des PDMS-Replikates kann während des Sputterns und der Galvanik deformiert werden – in der lokalen Bildung von submikrometer hohen Wellen –. In Abb.A-10 ist die Wellenbildung als die Deformation der Oberfläche auf PDMS-Replikat exemplarisch gezeigt. Nach experimentellen Untersuchungen zeigt jedoch dieser Effekt eine starke Abhängigkeit des Prozesses (Sputtern und Galvanik) und der Strukturgeometrie.



Abb.A-10 Wellenbildung von PDMS bei Sputtern und Galvanik

Um diese Deformationen zu vermeiden, besteht die Möglichkeit, mit Hilfe eines PDMS-Replikates als Formeinsatzes einen festen Kunststoff wie z.B. Gießharz abzuformen und dieses Gießharz-Replikat anschließend zu galvanisieren, d.h. auf Basis von PDMS/Gießharz-Materialsystemen wird ein Abformverfahren – *Soft-Abformung* – konzipiert. Hierbei wird ein möglichst leicht abzulösendes Gießharz-Material ausgewählt, so dass eine saubere und metallische Struktur galvanisch erzeugt wird. In [25, 28] werden ähnliche Verfahren zur Herstellung von Mikrokomponenten wie z.B. Multimode-Wellenleitern berichtet.

Bei diesem Verfahren liegen Nachteile in den zusätzlich nötigen Replikationsschritten, die in der Regel mit einem gewissen Qualitätsverlust verbunden sind. Jedoch gibt es den Vorteil, dass die photolithographische SU-8-Struktur oder eine mit anderer Strukturierungsmethode angefertigte Original-Struktur ohne Zerstörung mehrfach zu verwenden ist.

In Abb.A-11 ist ein grober Ablauf des Abformverfahrens auf Basis von PDMS/Gießharz dargestellt. Hierbei wird zuerst das PDMS-Replikat von der Original-Struktur erzeugt, das Gießharz-Replikat wird anschließend mittels PDMS-Replikates abgeformt.

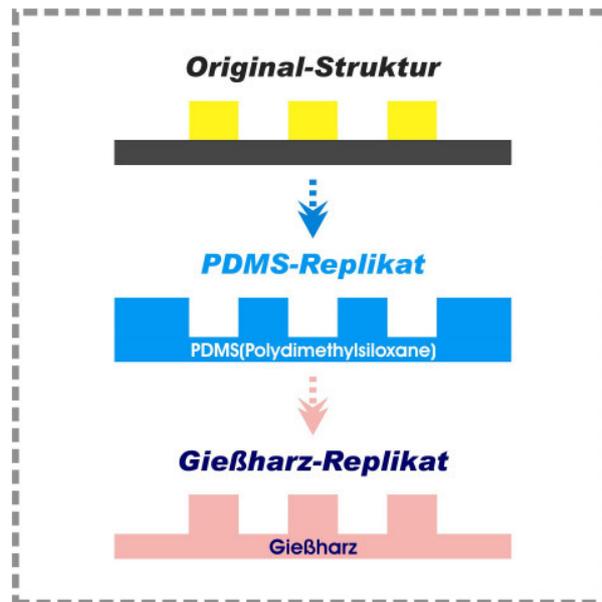


Abb.A-11 Grober Ablauf des Abformverfahren auf Basis von PDMS/Gießharz

Bei der Soft-Abformung wird PDMS (Sylgard 184) von der Firma Dow Corning verwendet, das unter Raumtemperatur additionsvernetzende 2-komponentig ist [42]. In Abb.A-12 ist ein PDMS-Replikat von einer SU-8-Struktur exemplarisch (gute Abformbarkeit) gezeigt.

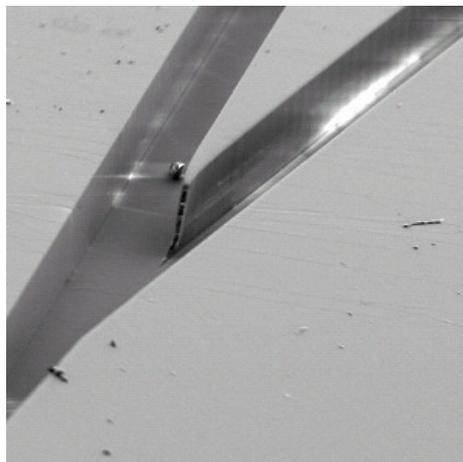


Abb.A-12 PDMS-Replikat (Spitze im Y-Verzweiger)

Bei der Suche nach einem geeigneten Gießharz-Material für die Soft-Abformung soll zuerst von einer Eigenschaft – *chemischer und/oder thermischer Resistenz* – ausgegangen werden, da das Gießharz-Replikat von dem galvanisch erzeugten Replikat leicht zu entfernen ist.

Aus diesem Grund wird nach experimentellen Untersuchungen Polyester-Gießharz ausgewählt. Das Polyester-Gießharz (XOR-Gießharz, h-621001-3) von der Firma Glorex wird verwendet, wobei das Gießharz 2-komponentig (Harz / Härter-System) ist und die Aushärtung durch Zugabe von 0.6 bis 4.0 % des flüssigen Härters erfolgt [34]. In Abb.A-13 ist ein Gießharz-Replikat von PDMS-Replikat exemplarisch (gute Abformbarkeit) gezeigt.

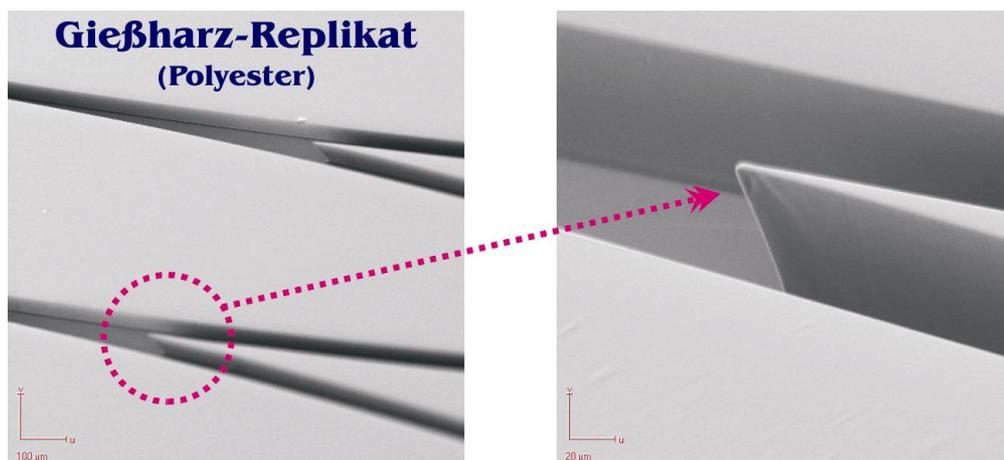


Abb.A-13 Polyester-Replikat (Spitze im Y-Verzweiger)

A.2.1 Soft-Abformung

Im vorherigen Abschnitt wird Allgemeines zum Abformverfahren – *Soft-Abformung* – kurz vorgestellt, das auf der Replikation mit Hilfe von Elastomer/Gießharz-Materialsystemen beruht. Hier wird diese Soft-Abformung auf Basis von PDMS/Polyester durch Experimente betrachtet.

In Abb.A-14 ist der grobe Ablauf der Soft-Abformung schematisch dargestellt. Als erster Schritt wird PDMS als Formeinsatz für Gießharz von der Resist-Vorform repliziert. Nach der Aushärtung wird das PDMS-Replikat auf eine stabile Platte mit Silikon-Kleber geklebt, um die Deformation des PDMS-Formeinsatzes möglichst zu minimieren. Abschließend wird das Gießharz-Replikat mit Hilfe des PDMS-Formeinsatzes angefertigt.

Bei der thermischen Aushärtung von PDMS und Gießharz ist die Temperungsdauer meistens von der verwendeten Menge und von dem verwendeten Härter stark abhängig. Außerdem soll für die strukturtreue Replikation die Evakuierung von PDMS und Gießharz, welche mit einem Härter gemischt sind, zur Austreibung der Luftblasen durchgeführt werden.

Im allgemein muss zur Galvanoformung eine dünne Metallschicht wie z.B. Silber (Ag) als Glavanikstartschicht auf ein Substrat aus einem Kunststoff aufgebracht werden. Dies geschieht durch Sputtern. Während des Sputterprozesses kann das zu metallisierende

Substrat materialeigenschaftenbedingt wie z.B. eine niedrige Glasübergangstemperatur besonders *thermisch* belastet werden, so dass die Strukturen auf dem Substrat deformiert werden können. Daher muss das Substrat während des Sputternvorgangs gelegentlich abgekühlt werden, um diese Deformation möglichst zu verhindern [41].

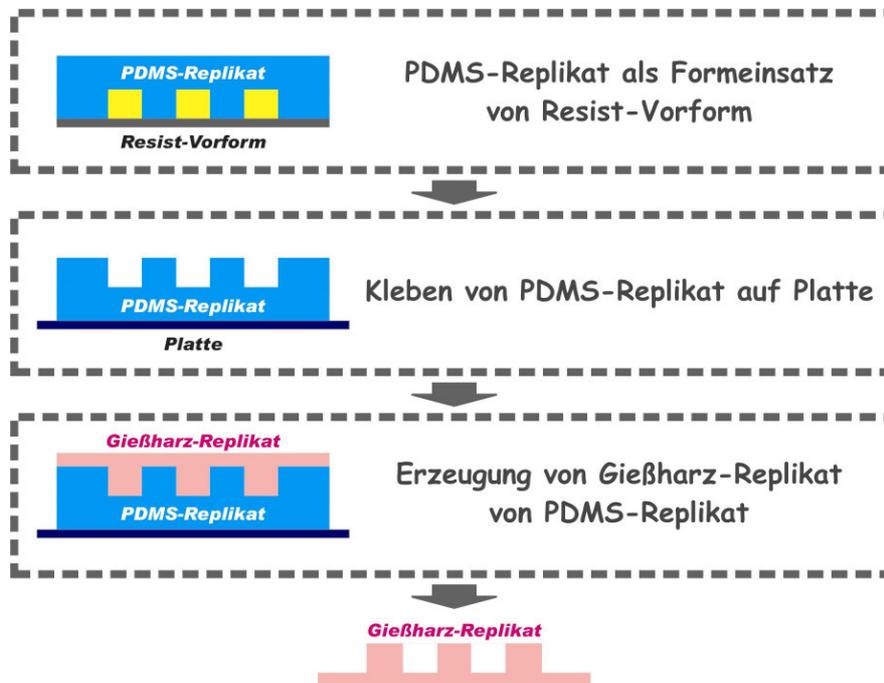


Abb.A-14 Grober Ablauf der Soft-Abformung

Wie bereits erwähnt, um nach der Galvanik das Gießharz-Replikat von dem galvanisch erzeugten Replikat leicht entfernen zu lassen, muss das Gießharz-Material, das eine schwach chemische und thermische Resistenz besitzt, ausgewählt werden. Hierbei wird Polyester-Gießharz für die Replikation verwendet. Das verwendete Gießharz Polyester weist durch experimentelle Untersuchungen die sehr schwache Resistenz gegen die thermische Belastung auf. Daher muss das Polyester-Replikat während des Sputterprozesses durch mehrfache Unterbrechungen metallisiert werden.

Zur Galvanoformung ist die Dicke der Silberschicht ca. 200 nm erforderlich, um eine ausreichende Leitfähigkeit zu gewährleisten [06]. Hierbei werden zwei Sputterprozesse durchgeführt, um die Änderung der Oberflächen des Substrates nach der thermischen Belastung zu überprüfen: Der eine ist *Dauer-Sputtern* und der andere *On-Off-Sputtern*. Bei Dauer-Sputtern wird die Silberschicht (Dicke ca. 200 nm) ohne Unterbrechung auf einmal beschichtet, während bei *On-Off-Sputtern* die Silberschicht auf das Substrat durch mehrfache Beschichtungen und mehrmalige Unterbrechungen – 1 min Sputtern und 5 min Pause – aufgebracht wird.

In Abb.A-15 sind exemplarisch die durch Sputtern metallisierten Strukturen auf dem Substrat (hier, Polyester-Replikat) gezeigt: In Abb.A-15(a) ist eine Deformation wegen der thermischen Belastung bei Dauer-Sputtern deutlich erkennbar. Im Gegensatz dazu sind in Abb.A-15(b) deformierte Profile kaum bemerkbar.

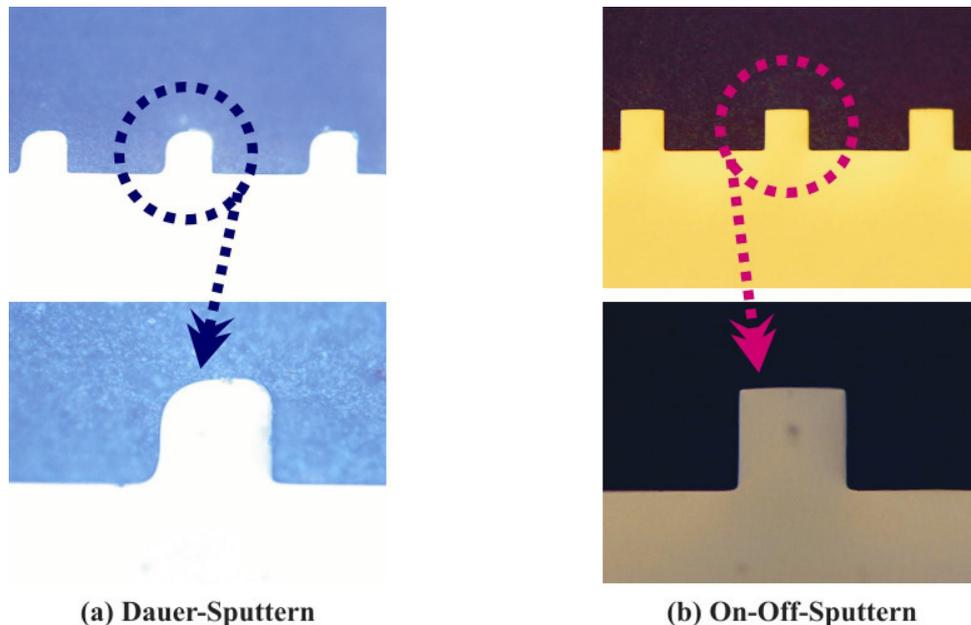


Abb.A-15 Profile von Polyester-Replikat in Abhängigkeit von Sputterprozess

Neben der strukturtreuen Replikation weist das Polyester-Replikat eine Modifizierung der Oberfläche auf. Dies führt zu einer Verbesserung des Oberflächenprofils durch ein *Glättungseffekt* der Oberfläche.

In Abb.A-16 sind die Änderungen (Fotos und gemessene Oberflächenprofile) vor und nach der Soft-Abformung exemplarisch gezeigt: In Abb.A-16(c) ist die Oberfläche der Seitenwand der mikrofrästechnisch hergestellten Cu-Vorform für Multimode-Wellenleiter gezeigt. Abb.A-16(d) zeigt die Oberfläche der mittels der Soft-Abformung replizierten Polyester-Vorform. Die Oberfläche des Polyester-Replikats weist die verbesserte Rauheit R_a $20.0 - 40.0 \text{ nm}$ (vorher $30.0 - 60.0 \text{ nm}$) auf. Weiterhin ist die *Ebnung* des Oberflächenprofils – *Glättungseffekt* – besonders erkennbar.

Vermutlich liegt dieser Glättungseffekt darin, dass aufgrund der Oberflächenspannung bei der thermischen Aushärtung Polyester das PDMS-Material verformen kann. Experimente zeigen, dass die Struktur der Polyester-Replikat in Abb.A-16(b) eine geringfügig größere Breite ($3 - 5 \mu\text{m}$) im Vergleich zu der originalen Strukturbreite in Abb.A-16(a) besitzt. In Abb.A-17 ist eine Erscheinung des Glättungseffekts schematisch dargestellt.

Soft-Replication

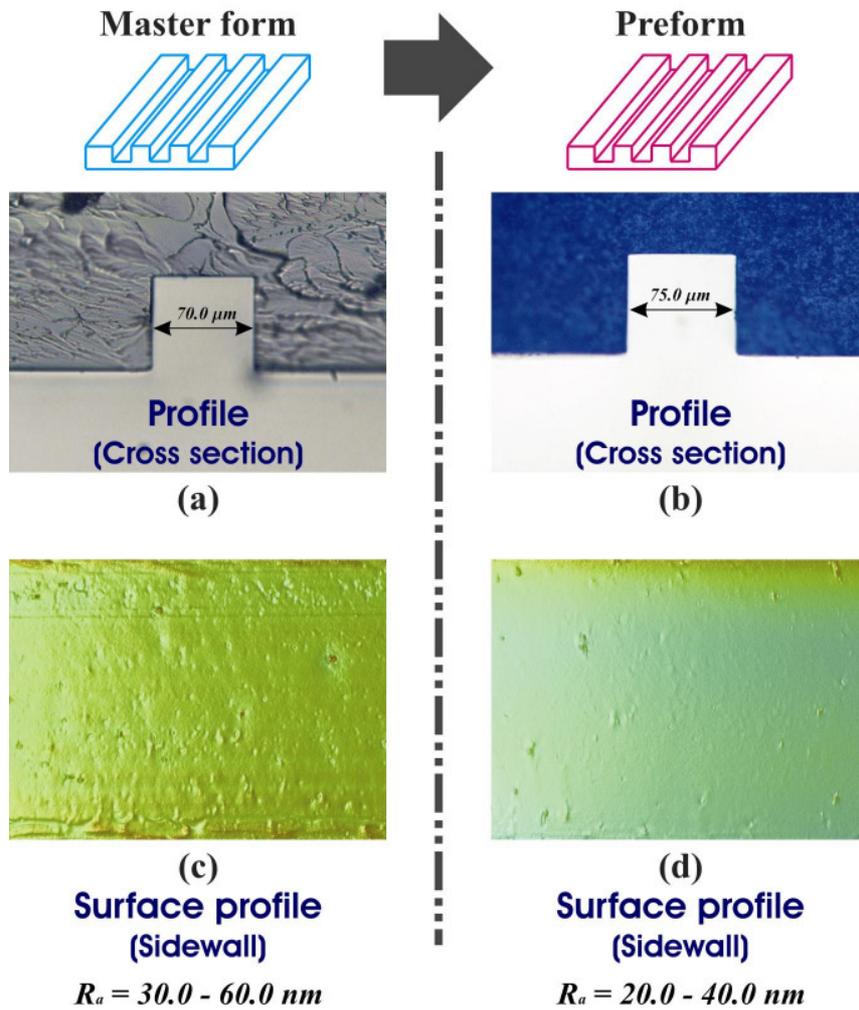


Abb.A-16 Modifizierung des Oberflächenprofils (Oberflächenglättung) durch Soft-Abformung

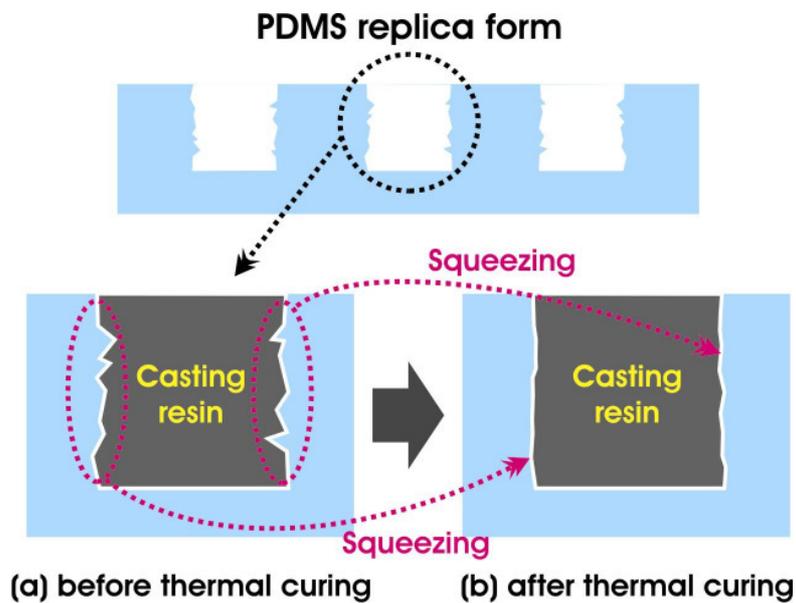


Abb.A-17 Schematische Darstellung der Oberflächenglättung

Es ist gezeigt, dass die Soft-Abformung sowohl als eine Replikationsmethode zur Anfertigung des metallischen Formeinsatzes aus SU-8-Strukturen als auch als eine Glättungsmethode der Oberfläche dienen kann: Beispielsweise kann die Vorform für lange (über *40 cm*) Multimode-Wellenleiter heutzutage mikrofrästechnisch hergestellt werden. Anschließend kann durch die Soft-Abformung die geglättete Vorform wieder angefertigt werden. Dies kann für lange und dämpfungsarme Wellenleiter sowohl zu einer Herstellungsmöglichkeit als auch zu einem kostengünstigen Verfahren führen.

Jedoch bleiben noch einige folgende Probleme bei der Soft-Abformung auf Basis von Polyester-Gießharz: Eine Schwierigkeit zur Abformung einer großen Flächen und eine potentielle Deformierbarkeit des Polyester-Replikates während der Prozessierung wegen der thermischen Beständigkeit. Solche Probleme sind durch weitere prozesstechnische Optimierungen und durch Auswahl anderes Gießharz-Materials zu beheben.