

**Untersuchung der UV-Nanoimprint-Lithografie  
als Strukturierungsverfahren für elektronische  
Bauelemente**

**Der Technischen Fakultät der  
Universität Erlangen-Nürnberg  
zur Erlangung des Grades**

**DOKTOR-INGENIEUR**

**vorgelegt von**

**Holger Schmitt**

**Erlangen - 2008**

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

Tag der Einreichung:	03.06.2008
Tag der Promotion:	06.11.2008
Dekan:	Prof. Dr. J. Huber
1. Berichterstatter:	Prof. Dr. H. Ryssel
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. P. Wellmann

## Zusammenfassung

Lithografieverfahren werden in vielen Arbeitsgebieten eingesetzt, um eine Oberfläche zu strukturieren. Im Bereich der Halbleitertechnik kommen für die lithografische Strukturierung zu meist optische Verfahren zum Einsatz, an die auf Grund der Miniaturisierung elektronischer Bauelemente immer höhere Anforderungen gestellt werden. Daher kosten moderne Belichtungsanlagen („Stepper“) mittlerweile bis zu 20 Millionen €, weshalb diese nur im industriellen Maßstab für hohe Durchsätze und Stückzahlen rentabel sind. Da die „Stepper“ zusätzlich die zukünftigen Anforderungen bzgl. des Auflösungsvermögens wahrscheinlich nicht mehr erreichen werden, ist man in der Forschung und Industrie auf der Suche nach Alternativverfahren zur Nanostrukturierung. Zu diesen zählen neben der EUV- und Elektronenstrahl-Lithografie die UV-Nanoimprint-Lithografie (UV-NIL), deren Potential als kostengünstiges Nanostrukturierungsverfahren für elektronische Bauelemente im Rahmen der Arbeit untersucht wurde.

Bei der UV-Nanoimprint-Lithografie wird das Auflösungsvermögen maßgeblich durch eine Prägeform bestimmt, deren Relief im optimalen Fall 1:1 in einen Prägelack übertragen wird. Aus diesem Grund wurde der Herstellungsprozess von Quarzprägeformen optimiert sowie ein neues Konzept entwickelt und umgesetzt, bei dem die Gesamtherstellungskosten von Prägeformen im Vergleich zum etablierten Konzept um eine Größenordnung geringer sind.

Um nach einem Prägevorgang eine defektfreie Trennung zwischen ausgehärtetem Prägelack und Prägeform zu erreichen, wurde die Haftung zwischen Prägelacken und verschiedenen Oberflächen (Substrat und Prägeform) optimiert. Dazu wurde die Prägeformoberfläche im Rahmen der Arbeit mit verschiedenen Antihafschichten modifiziert und mit einer optimalen Kombination aus Antihafschicht und Prägelack wurden 500 Prägungen ohne Degradation der Antihafschicht durchgeführt. Entscheidend bei der Haftungsoptimierung waren auch die Entwicklung einer neuen Auswertemethode zur Bestimmung der Oberflächenspannung von Prägelacken und die Untersuchung der Benetzung von Oberflächen durch Prägelacke. Auf Grund der Erkenntnisse der Arbeit wurde für die Lackaufbringung die Imprintanlage mit einem „Ink-Jet“-System (vorher Eintropfendosierer) erweitert und somit die beim Prägeprozess unvermeidbare Restlackschichtdicke um eine Größenordnung auf 31 nm reduziert. Dies war die Voraussetzung, um nachfolgende maßgetreue Substratätzprozesse zu entwickeln.

Schließlich wurde durch die Strukturierung von Poly-Si Gatefingern mittels UV-NIL und reaktivem Ionenätzen im Rahmen eines n-Kurzkanal MOSFET Prozesses sowie der anschließenden Charakterisierung der Transistoren das Potential der UV-NIL als ein kostengünstiges Nanostrukturierungsverfahren für elektronische Bauelemente demonstriert.

## **Abstract**

The patterning of substrate surfaces by lithography techniques is frequently used in different areas. Within the semiconductor industry, the optical lithography is the common technique for the definition of nanosized patterns. The ongoing shrinkage of electron device dimensions steadily increases the requirements for lithography. Therefore, state of the art lithography tools (steppers) cost up to 20 million € and are only running profitably for high throughput and high quantities. Additionally, steppers will probably not satisfy the requirements for the future electron device dimensions. For these reasons, alternative lithography techniques for nanopatterning are attracting more and more interest in research and industry. One of these lithography techniques, beside EUV- and electron beam lithography, is the UV-nanoimprint lithography (UV-NIL). Its capability as a cost-effective and high resolution patterning technique for electron devices was investigated within this work.

The resolution of the UV-nanoimprint lithography is mainly limited by the patterns on a mold that are transferred in the best case 1:1 into a resist. Therefore, the fabrication of molds with nanosized patterns was optimized and a concept for producing imprint molds was developed that resulted in a considerable cost-reduction compared to the established concept.

After imprinting, a defect-free release of the mold from the cured resist is mandatory. Therefore, the adhesion between different resists and surfaces (substrate and mold) was optimized. For defect-free imprinting, the mold's surface had to be modified with an antisticking layer. Different combinations of antisticking layers and resists were under test to finally evaluate an optimum combination to perform 500 imprints without a measurable degradation of the antisticking layer. Also measurements of the wetting behavior of resists with respect to different substrate surfaces and the determination of the surface tensions of the resists by a method that is presented for the first time were essential. Investigations on the dispensing of resists resulted in the integration of an ink-jet system (before single drop dispenser) into the imprint tool. With the ink-jet system, the residual layer thickness, which is unavoidable for the imprint process, could be reduced by one order of magnitude to 31 nm. This result was the prerequisite to develop subsequent etching processes to pattern substrates with high dimensional accuracy.

Finally, a process for short channel n-MOSFETs was developed with the poly-Si gates being patterned by UV-NIL and reactive ion etching. The resulting transistors were characterized and their functionality was demonstrated. With these results, the capability of the UV-nanoimprint lithography as a cost-effective and high resolution patterning technique for electron devices was successfully proven.

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Nanostrukturierungsverfahren</b>	<b>3</b>
2.1	Lithografieverfahren	3
2.1.1	Optische Lithografie	4
2.1.2	Elektronenstrahl-Lithografie	8
2.1.3	UV-Nanoimprint-Lithografie	11
2.2	Reaktives Ionenätzen	22
2.2.1	Reaktive Ionenätzanlagen	27
2.2.2	Chromätzprozess	29
2.2.3	Quarzätzprozess	30
<b>3</b>	<b>Verwendete Charakterisierungsverfahren</b>	<b>33</b>
3.1	Kontaktwinkelmessung	33
3.2	Stufenhöhenmessverfahren	37
3.3	Rasterkraftmikroskopie	37
<b>4</b>	<b>Herstellung von Quarzprägeformen für die UV-Nanoimprint-Lithografie</b>	<b>41</b>
4.1	Konzepte und Anforderungen zur Herstellung von Quarzprägeformen	42
4.1.1	Etabliertes Konzept zur Herstellung von Quarzprägeformen	42
4.1.2	Entwickeltes Konzept zur Herstellung von Quarzprägeformen	43
4.2	Elektronenstrahlaufdampfen der Metallschichten	46
4.3	Strukturdefinition durch Lithografieverfahren	47
4.3.1	Optische Lithografie	48
4.3.2	Elektronenstrahl-Lithografie	49
4.4	Strukturierung durch reaktives Ionenätzen	49
4.4.1	Maskenauswahl für den Quarzätzprozess	49
4.4.2	Optimierung der Chromstrukturierung	52
4.4.3	Optimierung der Quarzstrukturierung	55
4.5	Reinigung, Oberflächenmodifikation und Fertigstellung	69

---

<b>5</b>	<b>Auswahl optimaler Prägelacke für die UV-Nanoimprint-Lithografie</b>	<b>73</b>
5.1	Verfügbarkeit und Eigenschaften von Prägelacken	73
5.2	Haftung zwischen Prägelacken und Oberflächen	76
5.2.1	Benetzung von Oberflächen durch Prägelacke	76
5.2.2	Bestimmung der Oberflächenspannung von Prägelacken	77
5.2.3	Charakterisierung der Haftung	81
5.3	Untersuchung der Restlackschichtdicke	83
5.4	Wechselwirkung mit Antihafschichten	87
<b>6</b>	<b>Strukturübertragung und Anwendung</b>	<b>91</b>
6.1	Prinzipieller Aufbau und Funktion von MOSFETs	92
6.2	Entwickelter Herstellungsprozess für n-Kurzkanal MOSFETs	96
6.2.1	Auswahl der Ätzmaskierung für den Poly-Si Gatefinger	96
6.2.2	Prozessierung	100
6.3	Elektronenmikroskopische und elektrische Charakterisierung der n-Kurzkanal MOSFETs	102
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>109</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>113</b>
	<b>Anhang</b>	<b>120</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>123</b>

# 1 Einleitung

Die Herstellung von elektronischen Bauelementen geht mit zahlreichen lithografischen Prozessschritten einher, deren Anteil an den gesamten Herstellungskosten stetig ansteigt [Lin03][Muz00]. Dies ist darin begründet, dass die Aufwendungen für die optischen Belichtungseinheiten, die Maskensätze und die Lacksysteme immer größer werden, je kleiner die physikalischen Abmessungen der Bauelemente werden. Trotzdem ergeben sich aus der fortschreitenden Miniaturisierung von z.B. Transistoren sowohl eine Kostenreduktion für deren Herstellung als auch eine Erhöhung von deren Taktfrequenz. Die Kostenreduktion wird erreicht, indem mehr Bauelemente pro Fläche integriert werden, und die Erhöhung der Taktfrequenz ist eine Folge der reduzierten Bauelementekapazität und der Möglichkeit einer erhöhten parallelen Aufgabebearbeitung [Iwa04]. Prognosen bezüglich der Entwicklungen zukünftiger Bauelementeabmessungen (Technologieknoten) sind in der sogenannten „International Technology Roadmap for Semiconductors“ (ITRS) [WWW1] aufgeführt. Die ITRS gilt in der Halbleitertechnologie als Leitfaden für Geräte- und Chiphersteller.

Aktuell werden in der Halbleiterindustrie zur Erzeugung kleinster Strukturen bis weit unter 100 nm optische Belichtungseinheiten, sogenannte „Stepper“, eingesetzt, die mit einer Belichtungswellenlänge  $\lambda$  von 193 nm arbeiten. Durch den Einsatz von Phasenschiebermasken werden mit „Steppern“ Strukturen für den 65 nm Technologieknoten übertragen. Mittels Doppelbelichtung [Dra07] oder Immersions-Lithografie [Nak07] sollen zukünftig Strukturen für den 45 nm und evtl. auch für den 32 nm Technologieknoten realisiert werden.

Trotz dieser Prognosen wird intensiv an zur optischen Lithografie alternativen bzw. nachfolgenden Lithografieverfahren geforscht, die in der ITRS unter der Bezeichnung „Next Generation Lithography“ zusammengefasst sind [WWW1]. Die Motivation hierfür liegt zum einen darin, dass zukünftig die optische Lithografie trotz innovativer Weiterentwicklungen an ihre Auflösungsgrenze stoßen wird und daher für die fortschreitende Miniaturisierung neue Verfahren eingesetzt werden müssen. Zum anderen sind die optischen Belichtungseinheiten sehr kostenintensiv, weshalb allgemein sehr starkes Interesse an kostengünstigen Alternativen zur Nanostrukturierung in Forschung und Industrie besteht. Zu den möglichen Alternativen zählen die Belichtung mit extrem ultraviolettem Licht (EUV-Lithografie) [Wur07][Har07], die parallele Elektronen- [Ede06] oder Ionenstrahl-Lithografie [Bru07] und die Nanoimprint-Lithografie (NIL) [Cho95]. Mit allen drei Verfahren wird man bzw. kann man bereits heute kleinste Strukturen unter 50 nm übertragen, allerdings sind hierfür stark unterschiedliche Investitionskosten notwendig. So betragen diese für EUV-Anlagen 35 Millionen bis 70 Millionen €

und für industrierelevante Elektronen- oder Ionenstrahl-Lithografieanlagen mindestens 20 Millionen € [Muz00]. Da Imprintanlagen bereits für unter 1 Millionen € zu erwerben sind, kommt somit nur die NIL als kostengünstiges Nanostrukturierungsverfahren in Betracht, vor allem für kleine und mittlere Firmen sowie für Forschungseinrichtungen.

Bei der Nanoimprint-Lithografie handelt es sich um ein Prägeverfahren, wobei bei dem aktuellen Entwicklungsstand die Auflösung durch die minimale Strukturbreite auf einer Prägeform bestimmt wird, deren Relief in einen Prägelack übertragen wird. Für die Art der Strukturübertragung gibt es hauptsächlich 2 Ansätze, die im Fokus der Halbleiterindustrie und anderer Industriezweige stehen, das Heißprägen und die UV-Nanoimprint-Lithografie. Beim Heißprägen wird ein Thermoplast, das zuvor auf ein Substrat aufgeschleudert wurde, durch eine harte Prägeform, die zumeist aus Silicium oder Nickel besteht, mechanisch verformt. Nach dem Prägeprozess bleibt das negative Relief der Prägeformstrukturen im Prägelack zurück, welches für die weitere Prozessierung verwendet wird. Für die Strukturübertragung ist ein Prägedruck größer als 20 bar und zumeist eine hohe Temperatur notwendig. Der hohe Prägedruck und die Temperaturwechsel stellen die Nachteile dieses Verfahrens dar, da sich hieraus zum einen relativ lange Prozesszeiten ergeben und zum anderen Beschädigungen an bereits existierenden Substratstrukturen auftreten können.

Da ein hoher Druck und Temperaturwechsel für die Bauelementeherstellung nachteilig sind, wurde im Rahmen der Arbeit intensiv der zweite Ansatz, die UV-Nanoimprint-Lithografie, untersucht. Bei der UV-Nanoimprint-Lithografie ist es nicht notwendig, hohe Temperaturen oder einen hohen Prägedruck für die Strukturübertragung einzusetzen, da die Aushärtung des Prägelacks in den Strukturen der Prägeform mittels UV-Licht erfolgt und der Prägelack selbst bei Raumtemperatur so niederviskos ist, dass ein Prägedruck von 1 bar ausreichend ist. Um das Potential der UV-Nanoimprint-Lithografie als Strukturierungsverfahren für elektronische Bauelemente zu untersuchen, wurden die Schwerpunkte der Arbeit auf folgende Punkte gelegt:

- Die Herstellung von UV-transparenten Prägeformen mit Strukturbreiten von 50 nm bis zu einigen hundert  $\mu\text{m}$ .
- Die Auswahl, Charakterisierung und Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Prägelacken und verschiedenen vorbehandelten Silicium-Substraten sowie Antihafschichten.
- Die Optimierung zahlreicher Prozessparameter, um die Kompatibilität der UV-NIL mit etablierten Halbleitertechnologien im Hinblick auf die Herstellung von n-Kurzkanal MOSFETs zu untersuchen.

## 2 Nanostrukturierungsverfahren

Nanostrukturierungsverfahren stellen einen entscheidenden Faktor bei der Miniaturisierung elektronischer Bauelemente dar. G. Moore, einer der Gründer von INTEL, beschrieb 1965 bezüglich der Miniaturisierung einen Zusammenhang, nach dem sich die Anzahl der Bauelemente pro integriertem Schaltkreis jedes Jahr verdoppeln werde [Moo65]. 1975 korrigierte er diese Vorhersage auf einer Konferenz des „Institute of Electrical and Electronics Engineers“ auf einen Zeitraum von zwei Jahren, die bis heute Gültigkeit besitzt.

Die Folgen der stetigen Verkleinerung der Bauelementedimensionen sind immer komplexer werdende Herstellungsprozesse und die Notwendigkeit einer steigenden Prozessstabilität für die aktuell eingesetzten Strukturierungsverfahren wie die optische und die Elektronenstrahl-Lithografie sowie das reaktive Ionenätzen. So werden z.B. die hochauflösenden Masken für die Bauelementeherstellung mittels Elektronenstrahl-Lithografie belichtet, die Strukturübertragung erfolgt mittels reaktiver Ionenätzverfahren und die Vervielfältigung der Maskeninformationen auf Silicium (Si) Substrate erfolgt mittels optischer Lithografie.

Neben den etablierten Lithografieverfahren erfährt die UV-Nanoimprint-Lithografie (UV-NIL) als Nanostrukturierungsverfahren ein immer stärker werdendes Interesse. Dies ist zum einen darin begründet, dass die Anwendungsmöglichkeiten der UV-NIL im Bereich der Optik und der elektronischen Bauelemente als ein hochauflösendes und kostengünstiges Lithografieverfahren zunehmend anerkannt werden. Zum anderen basieren viele Prozesse, die für die Strukturierung mittels UV-NIL notwendig sind, auf etablierten Halbleitertechnologien, weshalb Synergien genutzt werden können.

Synergien treten vor allem bei der Herstellung von Prägeformen auf. Für deren Herstellung müssen neben den oben genannten etablierten lithografischen Strukturierungsverfahren vor allem auch die Vorgänge bei der Strukturübertragung im sub-100 nm Bereich mittels reaktiver Ionenätzverfahren optimiert werden. So muss durch eine geeignete Wahl der Ätzparameter eine maßhaltige, reproduzierbare und defektfreie Strukturierung für alle Prozessschritte gewährleistet sein, um die UV-NIL als Strukturierungsverfahren für sowohl elektronische Bauelemente als auch für andere Applikationen zu etablieren.

### 2.1 Lithografieverfahren

Die Möglichkeit zur gezielten Strukturierung von Oberflächen war in den letzten Jahrzehnten ein entscheidender Faktor für den rasanten Fortschritt in der Mikro- und Nanoelektronik. Die eingesetzten Lithografieverfahren ermöglichten immer höhere Auflösungen und einen steigen-

den Durchsatz und stellen schon immer eine Schlüsseltechnologie bei der Herstellung von Bauelementen dar. Im Folgenden sollen deshalb die wichtigsten aktuell und evtl. zukünftig in der Halbleitertechnologie eingesetzten Lithografieverfahren, die optische, die EUV- und die Elektronenstrahl-Lithografie, vorgestellt werden. Dem schließt sich die Beschreibung der UV-NIL an, wobei die wichtigsten Aspekte der UV-NIL als Strukturierungsverfahren für elektronische Bauelemente erläutert werden.

### 2.1.1 Optische Lithografie

Bei der optischen Lithografie treffen Photonen auf einen lichtempfindlichen Lack, der zuvor auf ein Substrat aufgebracht wurde, und verändern dabei dessen chemische Struktur. Die chemisch veränderten Bereiche lassen sich nach der Belichtung in einem Entwicklerbad entweder herauslösen (Positiv-Prozess) oder bleiben als Maskierung auf dem Substrat erhalten (Negativ-Prozess).

Die Definition der belichteten Bereiche im Fotolack erfolgt bei der konventionellen optischen Lithografie mit Hilfe einer Maske. Die quadratische Maske besteht aus UV-transparentem Quarz, das mit einer strukturierten, lichtundurchlässigen Chromschicht bedeckt ist. Auf Grund der Anordnung der Maske im Strahlengang der Lichtquelle unterscheidet man drei Verfahren: die Nahfeld-, Kontakt- und Projektions-Lithografie.

Bei der Nahfeld-Lithografie wird die Maske, wie in Abb. 2.1 a) dargestellt, im Abstand  $d$  zur Lackoberfläche justiert und anschließend mit Licht homogen ausgeleuchtet. Bei diesem Verfahren berührt die Maske das Substrat nicht, wodurch die Maske nicht beschädigt wird. Das Auflösungsvermögen  $w_{min}$  ist bei diesem Verfahren allerdings begrenzt und wird unter anderem durch den Belichtungsabstand  $d$  laut Gl. (2.1) bestimmt [Wid96].

Um eine höhere Auflösung zu erhalten, wird die Kontakt-Lithografie eingesetzt (siehe Abb. 2.1 b)). Bei diesem Verfahren wird die Maske in direkten Kontakt zur Fotolackschicht gebracht und mit Licht über ein optisches System homogen ausgeleuchtet. Nachteil dieses Verfahrens ist die Abnutzung der Maske auf Grund des Kontaktes zwischen Maske und Lack-schicht, wodurch es zu Chromablösungen kommen kann und daraus resultierend nachfolgende Belichtungen nicht mehr defektfrei erfolgen. Des Weiteren können durch das Kontaktverfahren Lackpartikel an der Maske haften bleiben, die ebenfalls zu Defekten in der nachfolgenden Belichtung führen. Das Auflösungsvermögen  $w_{min}$  der Nahfeld- und der Kontakt-Lithografie wird durch die Lichtbeugung an der Maskenkante (Fresnel-Beugung) [Wid96], der Lack-schichtdicke  $g$ , dem Belichtungsabstand  $d$  zwischen Maske und Lackschicht, sowie des Vor-

faktors  $k_1$ , der die Lackeigenschaften berücksichtigt und einen Wert von etwa 1,5 hat, bestimmt:

$$w_{\min} = k_1 \sqrt{\left(g + \frac{d}{2}\right) \lambda}. \quad (2.1)$$

Geht man bei der Nahfeld-Lithografie von einer Belichtungswellenlänge  $\lambda$  von 400 nm, einem Belichtungsabstand  $d$  von 15  $\mu\text{m}$  und einer Lackschichtdicke  $g$  von 1,5  $\mu\text{m}$  aus, so ergibt sich eine minimal übertragbare Strukturbreite von etwa 3,8  $\mu\text{m}$ . Bei der Kontakt-Lithografie ergibt sich für die gleichen Bedingungen, allerdings mit einem Abstand  $d$  von 0  $\mu\text{m}$ , eine minimal übertragbare Strukturbreite von etwa 0,8  $\mu\text{m}$ . Bei beiden Verfahren muss berücksichtigt werden, dass Rückreflexionen von der Substratoberfläche das Auflösungsvermögen weiter reduzieren können. Aus diesem Grund ist es oft erforderlich, zwischen Substrat und Lack eine zusätzliche Antireflexionsschicht aufzubringen.

Auf Grund des beschränkten Auflösungsvermögens oben genannter Lithografieverfahren und der möglichen Partikelgeneration bei der Kontakt-Lithografie wird vor allem in der Halbleitertechnologie die Projektions-Lithografie eingesetzt, die in Abb. 2.1 c) dargestellt ist. Die Auflösungsgrenze dieses Verfahrens ist durch das Rayleigh-Kriterium gegeben, da der Strahlengang des Lichts dem eines umgekehrten Mikroskops entspricht [Hop98]. Somit gilt für das Auflösungsvermögen  $w_{\min}$ :

$$w_{\min} = k_2 \frac{\lambda}{NA}. \quad (2.2)$$

Hier entspricht  $NA$  der numerischen Apertur des Projektionslinsensystems und  $k_2$  einem lack- und prozessabhängigen Vorfaktor, für den aktuell ein minimaler Wert von 0,27 angegeben wird [Set07]. In diesem Wert sind die charakteristischen Kenngrößen des optischen Systems wie z.B. Linsenfehler und Kohärenzgrad der Lichtquelle, die Art der optischen Masken und die Lackeigenschaften enthalten. Aus Gl. (2.2) folgt, dass mit geringerer Wellenlänge das Auflösungsvermögen steigt. Gleichzeitig nimmt aber die Rayleightiefe  $\Delta f$ , also die maximal zulässige Tiefenschärfe und somit die maximal verwendbare Lackdicke sowie die maximale Topografie, nach Gl. (2.3) ab [Hop98]:

$$\Delta f = k_3 \frac{\lambda}{(NA)^2}. \quad (2.3)$$

Hier ist  $k_3$  ähnlich wie  $k_2$  ein prozessabhängiger Vorfaktor.

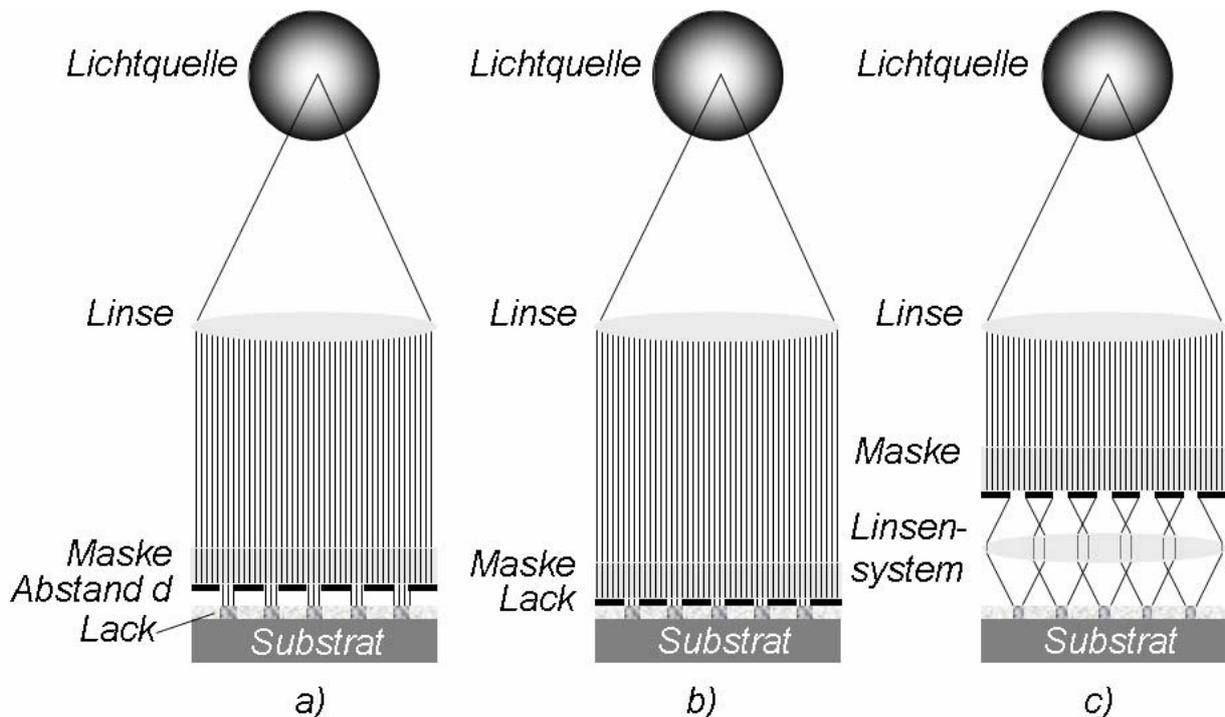


Abb. 2.1: Anordnung der Maske im Strahlengang für die drei optischen Lithografieverfahren: a) Nahfeld-Lithografie, b) Kontakt-Lithografie und c) Projektions-Lithografie

Bei der Projektions-Lithografie wird das Maskenbild typischerweise verkleinert im Verhältnis von 4:1 in die Lackschicht projiziert. Diese Verkleinerung wird über ein Linsensystem realisiert, das umso komplexer ist, je kleiner die kritischen Dimensionen skaliert werden. Dies hat zur Folge, dass eine moderne Projektions-Lithografieanlage, wie sie in Abb. 2.2 gezeigt ist, bis 20 Millionen € kostet. Hierfür werden allerdings auch minimale Strukturbreiten bis 65 nm garantiert, bei einem Durchsatz von mehr als 143 Si-Scheiben mit einem Durchmesser von 300 mm pro Stunde [WWW2]. Als Lichtquelle in einer Projektions-Lithografieanlage kommt ein ArF Laser zum Einsatz, der bei einer Belichtungswellenlänge  $\lambda$  von 193 nm emittiert. Neben den Investitionskosten müssen für solche Anlagen auch die hohen Kosten für die notwendigen Masken in Betracht gezogen werden, weshalb der Betrieb solcher Anlagen nur für einen hohen Durchsatz an Si-Scheiben rentabel ist.



Abb. 2.2: Moderne Projektions-Lithografieanlage Twinscan 1250 von ASML (Quelle: ASML)

Bei der geplanten fortschreitenden Miniaturisierung elektronischer Bauelemente (2013 ist der 32 nm und 2016 der 22 nm Technologieknoten geplant) [WWW1] wird die Projektions-Lithografie und somit die konventionelle optische Lithografie an ihre Auflösungsgrenze stoßen. An deren Stelle könnte die EUV-Lithografie treten [Wur07][Har07]. Auf diese Technik hat sich bislang als einziger Chiphersteller Intel festgelegt, der Chips für den 32 nm Technologieknoten bis spätestens 2010 angekündigt hat. Bei der EUV-Lithografie wird zur Belichtung der Si-Scheiben weiche Röntgenstrahlung (Zinn Gasentladungsquelle) mit einer Wellenlänge  $\lambda$  von 13,5 nm eingesetzt [Har07]. Da Quarzglaslinsen für diese Wellenlänge intransparent sind, müssen an ihre Stelle spiegeloptische Abbildungssysteme in Verbindung mit völlig neuen Masken- und Lackmaterialien treten. Die Spiegel bestehen hierbei aus einer großen Anzahl von Molybdän/Silicium Schichtpaaren an deren Ebenheit, Oberflächenrauheit (notwendig: 0,25 nm) und Qualität extrem hohe Anforderungen gestellt werden [Kin05]. Die theoretisch erreichbare Reflektivität dieser Spiegel liegt bei etwa 70 %, weswegen in einem typischen 6-Spiegelsystem mehr als 90 % der Strahlung verloren geht. Die Masken bestehen ebenfalls aus Mehrschichtspiegeln, deren Oberfläche die herzustellende Struktur beinhaltet. Die Investitions- und Betriebskosten dieser Anlagen werden wesentlich größer sein als für die Projektions-Lithografie, weshalb sich diese Technik nur wenige Chiphersteller leisten können.

### 2.1.2 Elektronenstrahl-Lithografie

Die Elektronenstrahl-Lithografie ist ein Verfahren, mit dem noch kleinere Strukturbreiten als bei der Projektions-Lithografie realisiert werden können. Bei der Belichtung trifft ein beschleunigter Elektronenstrahl, der durch elektrische und magnetische Felder auf die Probenoberfläche fokussiert und positioniert wird, auf eine Lackoberfläche und verändert dabei dessen chemische Struktur. Nach diesem Vorgang können, analog zur optischen Lithografie, die belichteten Bereiche in einem Entwicklerbad entweder entfernt werden (Positiv-Prozess) oder sie bleiben als Strukturen auf dem Substrat erhalten (Negativ-Prozess). Der schematische Aufbau einer Elektronenstrahl-Lithografieanlage ist in Abb. 2.3 dargestellt.

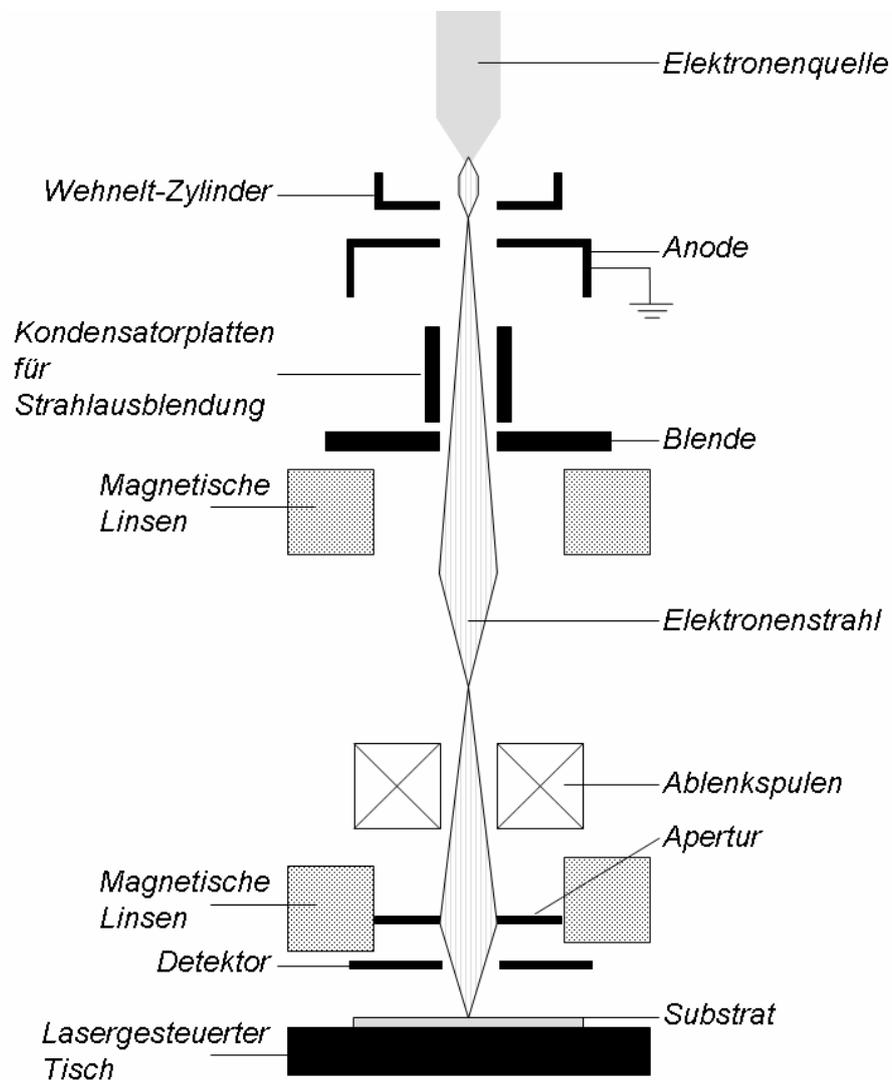


Abb. 2.3: Schematischer Aufbau einer typischen Elektronenstrahl-Lithografieanlage [Bro92]

Da die Reichweite der Elektronen in der Atmosphäre zu gering ist, muss der Bereich der Elektronenstrahlausbreitung stets unter Vakuum stehen. Die Elektronen selbst treten entweder unter thermischem Einfluss (Glühkathode) oder mittels Feldemission aus der Elektronenquelle aus. Mit Hilfe des Wehnelt-Zylinders, der im Vergleich zur Elektronenquelle auf negativem Potential liegt, wird der Elektronenstrahl gebündelt und dessen erster Kreuzungspunkt („cross over“) erzeugt. Der Durchmesser dieses ersten Kreuzungspunkts ist für das nachfolgende optische System entscheidend, da von diesem ausgehend der Elektronenstrahl auf die Probenoberfläche über das Linsensystem verkleinert wird. Für Glühkathoden liegt dieser Durchmesser zwischen 20  $\mu\text{m}$  und 50  $\mu\text{m}$ , für Feldemissionsquellen zwischen 1  $\mu\text{m}$  und 10  $\mu\text{m}$  [Rei77]. Durch Anlegen einer Spannung an die Anode wird der Elektronenstrahl beschleunigt. Nach dem Verlassen der Anode tritt der Elektronenstrahl in das elektronenoptische System ein. Hier wird dieser nicht mehr weiter beschleunigt, sondern nur noch abgelenkt. Mit Hilfe eines elektrischen Feldes, das von zwei Kondensatorplatten erzeugt wird, kann der Strahl ausgeblendet werden, bevor dessen Fokussierung durch magnetische Linsen erfolgt. Die Positionierung des Elektronenstrahls auf die Substratoberfläche erfolgt mittels Ablenkspulen. Bevor der Elektronenstrahl allerdings auf die Substratoberfläche trifft, wird dieser noch einmal über eine Anordnung von magnetischen Linsen auf einen Strahldurchmesser von bis zu unter 1 nm fokussiert. Das Substrat, das üblicherweise mit Polymethylmethacrylat (PMMA) als elektronenstrahl-empfindlicher Positiv- oder mit „Hydrogen Silsesquioxan“ (HSQ) als Negativlack bedeckt ist, befindet sich auf einem Tisch, der hochpräzise verfahren werden kann. Die Ansteuerung der Tischposition, wie auch die Strahlablenkung, erfolgt computergesteuert.

Um den Strahl zu fokussieren und die Position auf der Probe zu bestimmen, wird ein Probenbild benötigt. Die Erzeugung des Probenbilds basiert auf der Ausnutzung von Sekundärelektronen, die in Folge des Elektronenbeschusses durch inelastische Stöße in der Probenoberfläche generiert werden, diese verlassen und von einem Detektor gesammelt und verstärkt werden. Dieses Signal wird mit dem Ablenkmechanismus für den Elektronenstrahl synchron geschaltet und an einem Bildschirm dargestellt. Beim Fokussieren auf die Probenoberfläche, bei der Aufnahme eines Probenbilds und beim Navigieren über die Probe muss beachtet werden, dass es nicht zu einer Belichtung des Elektronenstrahl-lacks kommen darf.

Auf Grund des Strahlenganges, der dem eines umgekehrten Mikroskops entspricht, wird nach Gl. (2.2) die theoretische Auflösung der Elektronenstrahl-Lithografie durch das Rayleigh-Kriterium und somit durch die Wellenlänge  $\lambda$  und  $NA$  bestimmt. Die Wellenlänge  $\lambda$  des Elektronenstrahls wird nach Gl. (2.4) wie folgt berechnet [Her99]:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2eU_B m}}. \quad (2.4)$$

Hierbei entsprechen  $U_B$  der Beschleunigungsspannung der Elektronen in Volt,  $h$  dem Planckschen Wirkungsquantum,  $e$  der Elementarladung und  $m$  der Elektronenmasse. Für eine Beschleunigungsspannung  $U_B$  von 50 kV ergibt sich somit eine Wellenlänge  $\lambda$  von 5,5 pm. Die numerische Apertur der elektronenoptischen Abbildung ist durch das Linsensystem bestimmt und etwa 100mal kleiner als bei der lichtoptischen Abbildung für Projektionssysteme [Wid96]. Insgesamt ergibt sich somit eine minimal erreichbare Strukturweite auf Grund des Rayleigh-Kriteriums von ca. 0,5 nm. Diese hohe Auflösung wird allerdings in der Praxis nicht erreicht, da die Auflösung durch die Abbremsung und die damit verbundene Streuung der Elektronen im Lack bzw. im Substrat limitiert wird. Die Streuung der Elektronen kann zum einen elastisch an den Atomkernen des Lackes erfolgen, was zu einer Aufweitung des Elektronenstrahls führt. Zum anderen können durch Wechselwirkungen zwischen dem einfallenden Elektronenstrahl und den Elektronen des Lackes Sekundärelektronen über inelastische Streuprozesse erzeugt werden, die zu einer Belichtung des Lacks außerhalb des gewünschten Bereiches führen. Trotz dieser Beschränkungen können mit modernen Elektronenstrahlbelichtern z.B. in HSQ als Lack auf Si-Substraten minimale Strukturweiten bis 6 nm aufgelöst werden [Wor03], was aktuell etwa eine Größenordnung unter dem liegt, was moderne Projektions-Lithografieanlagen erreichen. Weiterer Vorteil der Elektronenstrahl-Lithografie gegenüber optischen Lithografieverfahren ist die Flexibilität, mit der Strukturen geschrieben werden können. So wird jede Struktur belichtet, falls diese mit einem geeigneten Programm erzeugt werden kann und im Bereich des Auflösungsvermögens der Anlage liegt.

Ein Nachteil der Elektronenstrahl-Lithografie ist die lange Belichtungszeit, die sich aus dem seriellen Schreibvorgang ergibt. Daher ist dieses Verfahren nicht für Prozesse mit hohen Durchsätzen geeignet. Allerdings kommen serielle Belichtungen z.B. im Herstellungsprozess für hochauflösende Maskensätze (Projektions-Lithografie) zum Einsatz. Auch für die Testfertigung neuester Technologien mit kleinsten kritischen Dimensionen stellt die Elektronenstrahl-Lithografie ein wichtiges Instrument dar. Auf Grund der hohen Auflösung und der Flexibilität bei der Strukturierung wurde die Elektronenstrahl-Lithografie in dieser Arbeit zur Definition der Prägeformstrukturen gewählt.

### 2.1.3 UV-Nanoimprint-Lithografie

Die bisher vorgestellten Lithografieverfahren zur Nanostrukturierung, die Projektions- und die Elektronenstrahl-Lithografie, stellen in vielen Bereichen der Halbleitertechnologie den Stand der Technik dar, geraten in manchen Bereichen aber auch an ihre Grenzen. So ist die Projektions-Lithografie auf Grund der erheblichen Investitions- und Betriebskosten für die Belichtungsanlagen und der notwendigen Maskensätze nur für hohe Durchsätze und Stückzahlen rentabel und die minimal erreichbare Strukturbreite ist durch die optische Auflösung limitiert. Die Elektronenstrahl-Lithografie ist ein höchstauflösendes Verfahren, aber auf Grund der seriellen Belichtung nur für geringste Durchsätze geeignet. Daher wird intensiv an alternativen Strukturierungsverfahren geforscht, welche höhere Auflösungen als die Projektions-Lithografie und höhere Durchsätze als die Elektronenstrahl-Lithografie erlauben. Eines dieser Verfahren ist die Nanoimprint-Lithografie (NIL), auf die im Folgenden eingegangen wird.

Die NIL ist ein Prägeverfahren, bei dem das Relief einer Prägeform in einen Lack übertragen wird, der auf einem Substrat aufgebracht ist. Je nach Anwendung werden die geprägten Lackstrukturen entweder als Maskierung für nachfolgende Prozesse (Ätzen, Implantation) oder als fertiges Produkt (Mikrolinsen) verwendet. Historisch gesehen ist die NIL kein neues Verfahren, da es vergleichbar mit dem Prägen von Wachs mit einem Siegel ist. Neu bzw. innovativ an dem Verfahren ist die Möglichkeit der gezielten Strukturübertragung im sub-10 nm Bereich [Cho95]. Diese hohe Auflösung bei der Strukturübertragung wird erreicht, da die minimale übertragbare Strukturgröße von der minimalen Dimension auf einer Prägeform abhängt und nicht durch Streuprozesse limitiert ist. Neben der hohen Auflösung kann auch ein hoher Durchsatz erzielt werden. Der Durchsatz ergibt sich aus der sich wiederholenden Übertragung der Prägeformstrukturen, wobei je nach Bearbeitungsmethode pro Imprint Flächen von wenigen Quadratmillimetern bis zu einigen hundert Quadratzentimetern geprägt werden können. So kann man das Substrat ganzflächig mit einer Prägeform in einer Prägung, oder Feld für Feld mit einer kleineren Prägeform strukturieren. Bei der ganzflächigen Strukturierung erhält man einen sehr hohen Durchsatz, wobei die Notwendigkeit des vollflächigen und planparallelen Kontakts sowie die Kräfte, die zur Trennung von Lack und Prägeform aufgebracht werden müssen, limitierend wirken. Zusätzlich ist das Erreichen einer hohen Überlagegenauigkeit zwischen Prägeform und einem bereits strukturierten Substrat über die komplette Prägefläche kaum möglich. Die Überlagegenauigkeit beschreibt, in welchem Maße zwei Ebenen (Prägeform und strukturiertes Substrat) zur Deckung gebracht werden können. Tritt hierbei z.B. ein zu großer Versatz zwischen zwei Ebenen eines elektronischen Bauelements auf, so führt dies

entweder zu einem fehlenden elektrischen Kontakt oder zu einem Kurzschluss. Beide Möglichkeiten sorgen dafür, dass die Funktionalität des Bauelements nicht mehr gegeben ist.

Bei der zweiten Methode, die auch als „step and repeat“ Verfahren bezeichnet wird und welche in der Projektions-Lithografie zum Einsatz kommt, wird das Substrat Feld für Feld strukturiert. Diese Art der Bearbeitung kommt auch im Rahmen der Arbeit zum Einsatz, da hiermit jedes Feld vor der Strukturierung justiert werden kann, wodurch hohe Überlagegenauigkeiten erreicht werden und die Anforderungen sowohl an die Planparallelität als auch an die Trennkräfte geringer sind.

Neben der Herstellung kleinster Strukturen ist ein weiterer Vorteil der NIL, dass man dreidimensionale Strukturen in einem Prägeschritt übertragen kann. Diesbezüglich könnte im Bereich der Metallisierung elektronischer Bauelemente eine interessante Anwendung der NIL liegen. Bei der Metallisierung elektronischer Bauelemente wird momentan die sogenannte „dual damascene“ Technologie eingesetzt. Hierbei sind zur Strukturierung von Leiterbahnen und Kontaktlöchern einer Metallisierungsebene zwei optische Lithografieschritte notwendig. Mittels NIL und einer geeigneten Prägeform können dagegen die Leiterbahnen und Kontaktlöcher in einem Schritt strukturiert werden. Dies wird erreicht, indem eine Prägeform mit dem Relief für die Kontaktlöcher und Leiterbahnen in ein Prägepolymer mit niedriger Dielektrizitätskonstante geprägt wird. Nach dem Aushärten des Prägepolymers bleibt die dielektrische Schicht mit den Vertiefungen für die Kontaktlöcher und für die Leiterbahnen zurück, die dann mit der aktuellen Technologie weiterprozessiert werden können. Studien zeigen, dass sich daraus eine erhebliche Kostenreduktion gegenüber der Strukturierung mittels optischer Lithografie ergibt, da bis zu 15 Prozessschritte pro Metallisierungsebene eingespart werden können [Mac05]. Um die NIL zukünftig zur Strukturierung in den Metallisierungsebenen einsetzen zu können, wird aktuell an Prägepolymeren geforscht, die sich durch eine niedrige Dielektrizitätskonstante auszeichnen und die thermisch und mechanisch ausreichend stabil gegenüber nachfolgenden Prozessschritten, wie der galvanischen Kupferabscheidung und dem chemisch-mechanischen Polieren, sind [Pal07]. Des Weiteren wird die Herstellung geeigneter Prägeformen sowie der dazugehörigen Prozesse intensiv untersucht [Jen07][Ro07]. Um die Strukturübertragung in ein Prägepolymer zu erreichen, gibt es hauptsächlich zwei Ansätze, die im Fokus der Halbleitertechnologie stehen: Das Heißprägen und die UV-NIL.

Beim Heißprägen wird ein Thermoplast, das zuvor auf ein Substrat aufgeschleudert wurde, durch einen harten Stempel, der zumeist aus Si oder Nickel besteht, mechanisch verformt (siehe Abb. 2.4). Um dies zu erreichen wird in einem ersten Schritt PMMA als Lack auf das Substrat aufgeschleudert. Anschließend wird das Lösungsmittel, welches für eine geringe

Viskosität des PMMA's beim Aufschleudern und somit für dünne Schichtdicken sorgt, thermisch entfernt. Das PMMA bildet nach dem Temperaturschritt eine wenige hundert nm dicke und mechanisch sehr stabile Schicht. Im nächsten Schritt wird die Prägeform zu dem Substrat planparallel ausgerichtet und justiert. Nachfolgend wird die Viskosität der Prägeschicht reduziert, in dem diese über deren Glasübergangstemperatur erwärmt wird. Für den eigentlichen Prägeprozess wird die Prägeform mit einem Druck größer als 20 bar in die PMMA-Schicht gepresst.

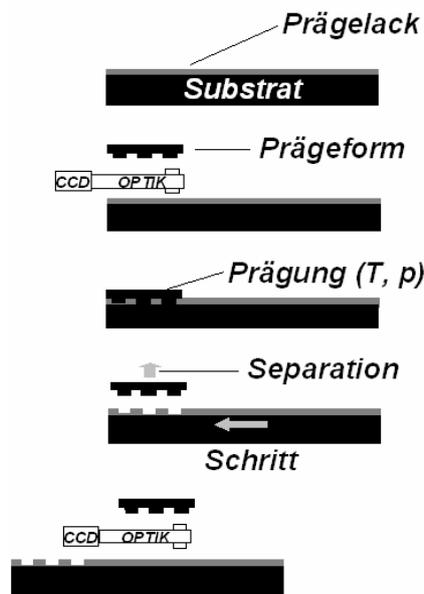


Abb. 2.4: Schematische Darstellung des „step and repeat“ Heißprägevorgangs

Hierbei füllt der Lack das Relief der Prägeform aus. Nach dem vollständigen Füllprozess wird der Lack wieder unter seine Glasübergangstemperatur abgekühlt und die Prägeform abgehoben. Der Abkühlvorgang darf nicht zu schnell und der Prägevorgang muss lang genug erfolgen, damit der Stress in der Lackschicht, der sich aus dem Temperaturwechsel und dem Verformungsprozess ergibt, abgebaut werden kann. Erfolgt der Abkühlvorgang zu schnell, relaxiert der Lack so stark, dass sich Defekte in den geprägten Strukturen bilden [Sch06]. Ein Vorteil des Heißprägens ist die relativ einfache Herstellung von Prägeformen mit kleinsten Strukturbreiten. Für die Prägeformherstellung wird zumeist Si als Substrat verwendet. Bei der Si-Strukturierung mittels Elektronenstrahl-Lithografie treten zumeist keine Aufladungseffekte auf, weshalb hier sehr kleine Strukturen bis 6 nm belichtet werden können [Wor03]. Die Nachteile des Heißprägens sind die notwendigen hohen Prägedrücke und Temperaturwechsel, woraus sich zum einen relativ lange Prozesszeiten ergeben und zum anderen Beschädigungen an bereits existierenden Strukturen möglich sind.

Bei der UV-NIL, deren Prinzip schematisch in Abb. 2.5 dargestellt ist und das auch im Rahmen der Arbeit untersucht wurde, werden die Nachteile des Heißprägens vermieden. Bei der UV-NIL ist es nicht notwendig, hohe Temperaturen oder Drücke für die Strukturübertragung einzusetzen, da die Lackaushärtung mittels UV-Licht erfolgt und der Prägelack so niederviskos ist, dass Prägedrücke von 1 bar ausreichend sind.

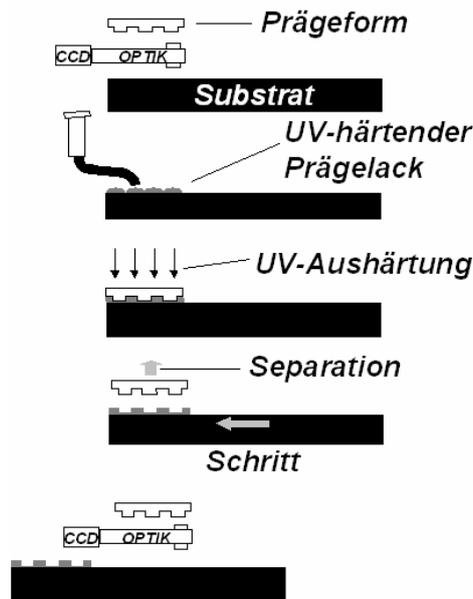


Abb. 2.5: Schematische Darstellung des „step and repeat“ UV-NIL Prägevorgangs

Für die Strukturübertragung wird bei der UV-NIL in einem ersten Schritt die Prägeform zu dem Substrat planparallel ausgerichtet. Ist das Substrat bereits strukturiert, erfolgt zusätzlich ein Justageschritt. Nach der Justierung werden mit einem sogenannten „Ink-Jet“-System gezielt Tropfen des Prägelacks auf dem zu prägenden Feld verteilt. Hierbei erfolgt eine definierte Dosierung, wobei je nach Bedarf lokal mehr oder weniger Lack aufgebracht wird. Der Bedarf richtet sich sowohl nach den zu füllenden Vertiefungen in der Prägeform als auch nach der Topografie auf dem Substrat. Als nächstes wird die Prägeform in den Prägelack gedrückt, wobei der Prägelack das Relief der Prägeform ausfüllt. Die bei diesem Prozess verdrängte Gasatmosphäre löst sich entweder im Prägelack oder erzeugt einen Defekt in der Form eines Gaseinschlusses, wenn die Löslichkeit eines gasförmigen Bestandteils im Lack überschritten wird. Besonders kritisch ist hierbei die Anwesenheit von Sauerstoff, da dieser die Vernetzung des Prägelacks während der UV-Belichtung unterdrückt [Ste05]. Um eine möglichst defektfreie Prägung zu erhalten, wird die zu prägende Fläche mit einem Prozessgas gespült oder sie befindet sich in einer Unterdruckkammer.

Nach der Aushärtung wird die Prägeform vom Lack wieder abgehoben, um das nächste Feld anzufahren und die beschriebene Prozedur zu wiederholen. Damit der Prägevorgang erfolgreich und zugleich reproduzierbar erfolgen kann, müssen zahlreiche Faktoren optimiert und aufeinander abgestimmt werden.

### *Prägeformen für das „step and repeat“ UV-NIL Verfahren*

Die Herstellung einer defektfreien Prägeform ist für den erfolgreichen Einsatz der UV-NIL maßgeblich, da das Relief der Prägeform im optimalen Fall 1:1 in den Prägelack übertragen wird. Defekte in der Prägeform verringern die Ausbeute dagegen entscheidend, da diese wiederholt übertragen werden. Auf Grund des UV-NIL Prägeverfahrens muss das Material, das für die Prägeformherstellung eingesetzt wird, bestimmte Grundmerkmale besitzen. Da die Aushärtung des Prägelacks im Kontakt mit der Prägeform mittels UV-Licht erfolgt, muss das Material eine hohe Transmission für die Belichtungswellenlänge der Imprintanlage besitzen. Des Weiteren muss das Substrat zur Herstellung der Prägeform eine sehr homogene Dicke aufweisen, da eine Welligkeit in einer starken Restlackschichtdickenvariation resultiert. Schließlich muss das Ausgangsmaterial eine geringe Rauheit besitzen, um keine Defekte zu erzeugen.

Für viele Anwendungen ist die Kontrolle der kritischen Dimension während des gesamten Herstellungsprozesses entscheidend. So wird z.B. bei einem Transistor die Einsatzspannung unter anderem aus dem Verhältnis von Kanalweite zu Kanallänge bestimmt. Wird der Gatefinger eines Transistors mittels UV-NIL strukturiert, so darf bei der hierfür notwendigen Prägeformherstellung kein Ätzprozess die zuvor mittels Elektronenstrahl-Lithografie definierten Größenverhältnisse ändern. Des Weiteren müssen die Ätzprozesse in möglichst rechteckigen Profilen resultieren. Erhält man durch den Prägeformätzprozess, wie in Abb. 2.6 links zu erkennen, Flankenwinkel  $\alpha$  größer als  $90^\circ$ , so kann es nach dem Prägeprozess zu einem Abreißen des ausgehärteten Prägelacks vom Substrat bei der Separation kommen. Ist der Flankenwinkel  $\alpha$  sehr viel kleiner als  $90^\circ$  (siehe Abb. 2.6 rechts), so ist die Separation von Prägeform und Prägelack leichter zu realisieren, doch bei einem nachfolgenden Substratätzschritt wird das Lackprofil in das Substrat übertragen, wodurch sich die kritischen Dimensionen ändern. Daher sind rechteckige Profile oder Flankenwinkel leicht unter  $90^\circ$  für eine defektfreie Separation, sowie für eine nachfolgende, maßhaltige Strukturübertragung wesentlich.

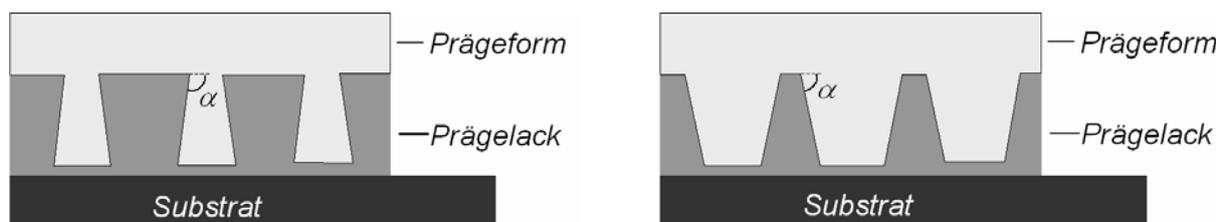


Abb. 2.6: Schematische Darstellung des Einflusses des Prägeformflankenwinkels  $\alpha$  auf die Prägung. In der linken Abbildung ist der Flankenwinkel  $\alpha$  größer als  $90^\circ$ , in der rechten Abbildung ist der Flankenwinkel  $\alpha$  kleiner als  $90^\circ$

Ein weiterer Effekt, der beim Prägeformätzprozess auftreten kann, ist die Ausbildung des sogenannten „Microtrenchings“, dessen Entstehung in Kapitel 2.2.3 und dessen Einfluss auf die Strukturübertragung beim Prägeprozess schematisch in Abb. 2.7 gezeigt ist. Bei einem stark ausgeprägten „Microtrenching“ ist die Lackdicke in der Mitte eines geprägten Steges geringer als am Rand. Diese Inhomogenität kann sich während des Substratätzprozesses in das Substrat übertragen.

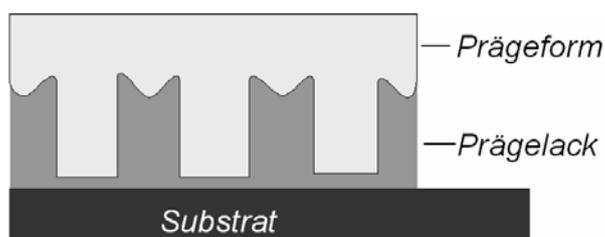


Abb. 2.7: Schematische Darstellung des Einflusses des „Microtrenchings“ auf die Prägung

Ein dritter Effekt, der durch die Wahl der Ätzparameter vermieden werden muss, ist die Ausbildung einer rauen Oberfläche im geätzten Gebiet (siehe Abb. 2.8). Durch eine zu starke Rauheit kommt es zu einer erhöhten mechanischen Verzahnung zwischen der Prägeform und dem ausgehärteten Prägelack, wodurch es während der Separation zu erhöhten Trennkräften und Lackabrissen kommt, wodurch Partikel generiert werden.

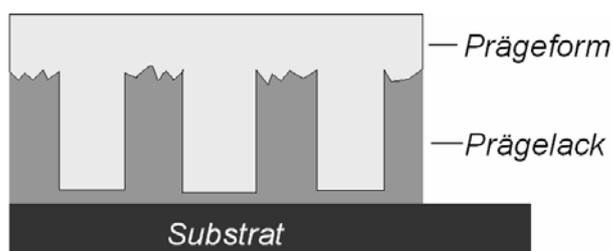


Abb. 2.8: Schematische Darstellung des Einflusses einer hohen Rauheit im geätzten Gebiet auf die Prägung

Die rückstrandsfreie Trennung von Prägeform und ausgehärtetem Prägelack spielt eine entscheidende Rolle bei der Vermeidung von Defekten. Um eine partikelfreie Trennung zu erreichen ist es zumeist erforderlich, die Oberfläche der Prägeform mit einer sogenannten Antihafschicht zu modifizieren. Die Antihafschicht muss hierbei chemisch und mechanisch sehr stabil gegenüber dem Prägelack, dem Prägeprozess und der UV-Belichtung sein, damit die Prägeform für eine große Anzahl an Prägungen verwendet werden kann, ohne dass Defekte entstehen oder die Antihafschicht erneuert werden muss.

Für die Modifikation der Quarzoberfläche mit einer Antihafschicht muss die Quarzoberfläche zuerst mit reaktiven OH-Gruppen aktiviert werden. Dies kann z.B. in einem Sauerstoffplasma erfolgen. Als Ausgangschemie für die Antihafschicht werden typischerweise fluorierte Kohlenwasserstoffe mit einer Silanendgruppe ( $\text{SiCl}_3$ ) verwendet. Die fluorierten Kohlenwasserstoffe weisen auf Grund ihrer Stabilität eine Antihafwirkung gegenüber anderen Materialien auf, die mit der von Teflon<sup>TM</sup> vergleichbar ist. Bei der Reaktion der Ausgangschemie mit der Quarzoberfläche, schematisch in Abb. 2.9 für die Ausgangschemie  $\text{F}_{13}\text{TCS}$  dargestellt, reagieren die OH-Gruppen der Quarzoberfläche mit den  $\text{SiCl}_3$ -Endgruppen von  $\text{F}_{13}\text{TCS}$  bei der Anwesenheit von Wassermolekülen und Abspaltung von Salzsäure ( $\text{HCl}$ ).

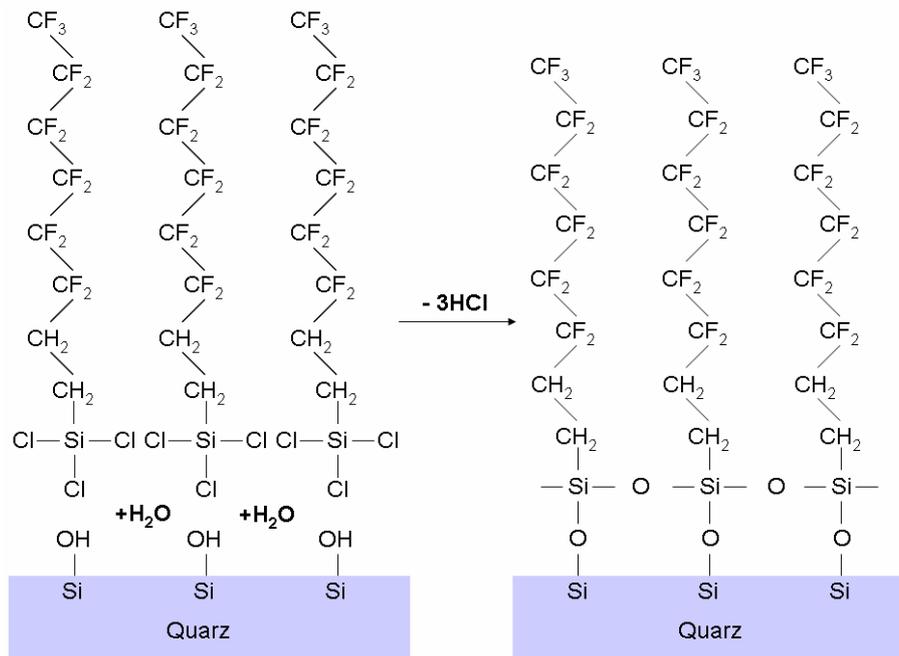


Abb. 2.9: Schematische Darstellung der Modifizierung einer Quarzoberfläche mit  $\text{F}_{13}\text{TCS}$

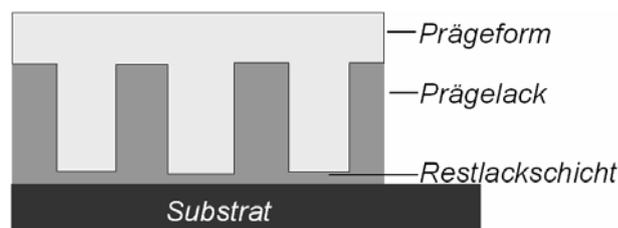
Hierbei werden die Molekülketten von  $\text{F}_{13}\text{TCS}$  kovalent an die Quarzoberfläche gebunden. Diese Reaktion ist selbstlimitierend, da die letzte Gruppe der jeweiligen Molekülketten ( $-\text{CF}_3$ ) keine Bindungen zu weiteren Molekülen eingeht. Somit bildet sich eine Monolage auf der Quarzoberfläche. Mit Hilfe einer stabilen Antihafschicht können Prägeformen für einige tau-

send Prägungen eingesetzt werden ohne die Antihafschicht erneuern zu müssen. Hierdurch werden die Kosten des Gesamtprozesses entscheidend reduziert.

### *Prägelacke für das UV-NIL „step and repeat“ Verfahren*

Die Verfügbarkeit eines geeigneten Prägelacks stellt eine weitere wichtige Voraussetzung dar, um die UV-NIL als hochauflösendes Strukturierungsverfahren einsetzen zu können. Der Prägelack muss bestimmte Eigenschaften erfüllen, wie z.B. eine geringe Viskosität, keine Haftung zu der Prägeform im ausgehärteten Zustand, dagegen eine hohe Haftung zum Substrat, eine schnelle Aushärtung, eine hohe Ätzbeständigkeit, sowie eine hohe Reinheit und Kompatibilität zu Prozessen in der Halbleitertechnologie.

Während des Prägevorgangs bildet sich eine Restlackschicht (schematisch dargestellt in Abb. 2.10) zwischen dem Substrat und den Erhebungen der Prägeform aus. Diese muss vor der Substratstrukturierung entfernt werden, was mittels eines Plasmaätzprozesses erfolgt.



*Abb. 2.10: Schematische Darstellung der Restlackschicht, die sich beim Prägeprozess zwischen dem Substrat und der Prägeform ausbildet*

Der Plasmaätzprozess darf hierbei die kritischen Dimensionen der geprägten Lackstrukturen nicht verändern, weshalb die Dicke der Restlackschicht so gering wie möglich gehalten werden muss. Die sich ausbildende Dicke der Restlackschicht wird durch den Prägeprozess und durch die Eigenschaften des Prägelacks entscheidend beeinflusst. Bei einem ungeeigneten Prägeprozess kann sich z.B. ein Keilfehler ausbilden, der in einer inhomogenen Restlackschichtdicke resultiert (siehe Abb. 2.11). Wenn nun im Folgenden die Lackmaske als Maskierung für einen Substratätzprozess verwendet wird, so muss in allen Bereichen die Restlackschicht entfernt werden, wofür eine relativ lange Überätzung notwendig ist. Dies hat zur Folge, dass nach dem Plasmaätzprozess in manchen Bereichen nur noch die Lackschichtdicke  $h_1$  als Ätzmaskierung zurückbleibt und somit die maximale Substratätztiefe limitiert ist. Zusätzlich bewirkt ein Keilfehler, dass sich die Strukturen geneigt zur Substratoberfläche befinden und es daher beim Substratätzprozess zu Abschattungseffekten kommt, die eine maßhaltige Strukturübertragung verhindern.

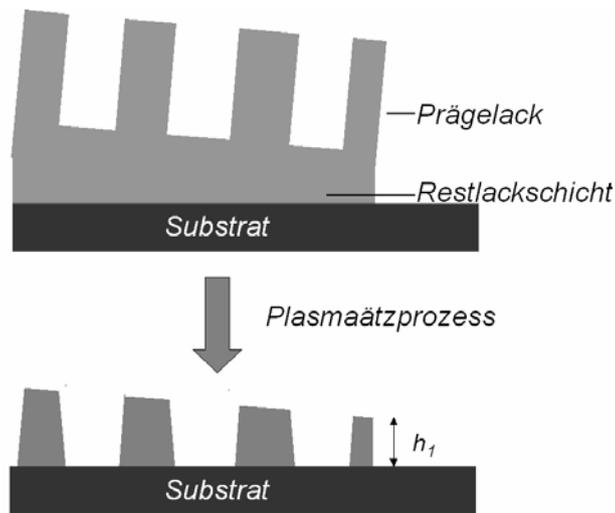


Abb. 2.11: Schematische Darstellung zur Entfernung einer nicht-homogenen Restlackschichtdicke durch einen Plasmaätzprozess

Um oben genannte Nachteile zu vermeiden, ist es für die Substratstrukturierung von großer Bedeutung, dass nach dem Prägeprozess eine homogene Restlackschichtdicke vorliegt (siehe Abb. 2.12). Daraus ergibt sich für die Entfernung der Restlackschichtdicke eine wesentlich geringere Überätzung und im Folgenden eine homogene Lackschichtdicke  $h_2$ , mit der man das Substrat wesentlich tiefer ätzen kann, als es für die Lackschichtdicke  $h_1$  möglich ist.

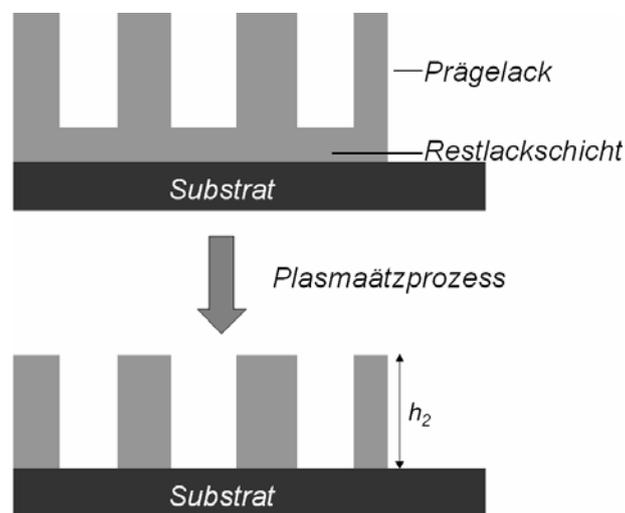


Abb. 2.12: Schematische Darstellung zur Entfernung einer homogenen Restlackschichtdicke durch einen Plasmaätzprozess

Neben einer homogenen Restlackschichtdicke muss die Dicke der Restlackschicht auch möglichst minimal sein. Die Prägezeit  $t_f$  zum Erreichen der Restlackschichtdicke  $h_f$  wird nach folgender Gl. (2.5) ermittelt [Sch03]:

$$t_f = \frac{\mu s^2}{2p} \left( \frac{1}{h_f^2} - \frac{1}{h_0^2} \right). \quad (2.5)$$

Hier entspricht  $h_0$  der Anfangslackschichtdicke,  $h_f$  der Restlackschichtdicke,  $p$  dem Prägedruck,  $s$  der Strecke, die der Lack zur nächsten Senke fließen muss, und  $\mu$  der Viskosität. Ist nun die Anfangslackschichtdicke sehr viel größer als die Dicke der Restlackschicht, so kann Gl. (2.5) näherungsweise zu Gl. (2.6) umgeformt werden:

$$h_f = \sqrt{\frac{s^2}{2pt_f}} \sqrt{\mu}. \quad (2.6)$$

Gl. (2.6) zeigt, dass die Dicke der Restlackschicht mit der Wurzel aus der Viskosität steigt und dass sie geringer wird, je höher der Druck und die Prägezeit gewählt werden. Da der Druck zum Schutz von bereits vorhandenen Substratstrukturen und die Prägezeit zum Erreichen eines maximalen Durchsatzes möglichst gering sein sollen sowie  $s$  durch die Geometrie der Prägeform vorgegeben ist, wird die Dicke der Restlackschicht maßgeblich durch die Viskosität des Prägelacks bestimmt. Die Viskosität des Prägelacks spielt auch bei der Wahl des sogenannten „Dispensers“ eine Rolle. Mit dem „Dispenser“ werden Lacktropfen vor der Prägung auf die Prägefläche verteilt. So kann bei einer Viskosität unter 20 mPa·s ein sogenanntes „Ink-Jet“-System verwendet werden, mit dem Lackvolumina ab 40 pl gezielt aufgebracht werden können. Hierdurch ist es möglich, den Lack angepasst an die Prägeform- und Substratstrukturen zu verteilen und so die Strecke  $s$ , die der Lack nach Gl. (2.6) fließen muss, zu optimieren.

Neben einer niedrigen Viskosität muss der Lack auch eine hohe Ätzbeständigkeit aufweisen, damit die geprägten Lackstrukturen maßgetreu in das Substrat übertragen werden können. Zusätzlich muss die Haftung zwischen Prägelack sowie Substrat und Prägeform optimal sein. Während der ausgehärtete Prägelack sich bei der Separation rückstandsfrei von der Prägeform lösen muss, muss er gleichzeitig zum Substrat eine hohe Haftung besitzen. Dies stellt während der Separation eine Herausforderung dar, da der Lack in den Vertiefungen der Prägeform (größere Oberfläche) eher haften bleibt als z.B. auf einer blanken Si-Oberfläche. Um hier optimale Haftungseigenschaften zwischen der Si-Oberfläche und dem Prägelack zu erhalten, können geeignete Haftvermittler auf das Substrat aufgebracht werden. Für eine rückstandsfreie Separation zwischen dem Prägelack und der Prägeform sorgt dagegen eine Antihafschicht auf der Prägeformoberfläche. Zuletzt muss der Lack möglichst schnell durch die UV-Belichtung aushärten, um kurze Prozesszeiten und einen möglichst hohen Durchsatz zu erreichen.

### *Imprintanlage*

Für die Nanostrukturierung mittels UV-NIL wurde die Imprintanlage NPS 300 von SUSS MicroTec verwendet. Bei der Anlage handelt es sich um einen sogenannten „Stepper“, mit dem das Substrat Feld für Feld strukturiert werden kann. Für die Strukturierung wird das Substrat auf einer quadratischen Platte (200·200 mm<sup>2</sup>) mittels Vakuum gehalten. Maximal sechs Prägeformen befinden sich in den Auflagen um das Substrat, die je nach Prozess von dem Imprintkopf aufgenommen werden. Zum Aufnehmen und Halten der Prägeform befindet sich an der Unterseite des Imprintkopfes eine Glasplatte mit einem Vakuumring. Oberhalb der Glasplatte ist die UV-Lichtquelle integriert. Diese besteht aus einer Anordnung von lichtemittierenden Dioden (LED), die bei einer Lichtwellenlänge  $\lambda$  von 375 nm emittieren und hierbei eine maximale Gesamtleistung von 120 mW/cm<sup>2</sup> erreichen. Am Imprintkopf befindet sich zusätzlich eine Spülvorrichtung, mit der die Prägefläche während des Prägevorgangs mit einem geeigneten Prozessgas gespült werden kann. Das Spülen mit einem geeigneten Prozessgas ist für viele Prägelacke notwendig, da eine zu hohe Sauerstoffkonzentration im Prägelack dessen Aushärtung verhindert.

Um die Prägeform und das Substrat planparallel zueinander auszurichten, wird ein sogenannter Kollimator verwendet. Der Kollimator befindet sich in einem Gehäuse, das unabhängig von Substrat und Imprintkopf aufgehängt ist. Vom Kollimator wird ein Lichtsignal sowohl auf die Prägeform als auch auf die Substratoberfläche projiziert und die jeweils reflektierten Lichtmuster werden detektiert. Sind die Prägeform und das Substrat nicht planparallel zueinander ausgerichtet, so wird ein Versatz zwischen beiden Reflektionen gemessen. Die Lage der Prägeformebene wird nun in der Art nachgeregelt, dass das Signal der Prägeform mit dem Signal des Substrats zur Deckung kommt. Die Regelung der Prägeformebene erfolgt über ein Kugelgelenk, das in zwei Achsen mit Hilfe von Schrittmotoren gekippt werden kann und an dem der Imprintkopf aufgehängt ist. Durch die Messung des Ebenenversatzes und die Nachregelung über ein Kugelgelenk wird iterativ die Ebene der Prägeform zum Substrat ausgerichtet. Im nächsten Schritt erfolgt die Justage der Prägeform zu einem bereits strukturierten Substrat. Hierfür befinden sich ebenfalls in dem Gehäuse, in dem der Kollimator integriert ist, zwei Mikroskope, wobei das eine zum Substrat und das andere zur Prägeform zeigt. Über eine Bilderkennungssoftware werden angelernte Justiermarken erkannt und zur Deckung gebracht, indem das Substrat gedreht, sowie in x- und y-Richtung verfahren wird. Als Nächstes erfolgt das Aufbringen des Prägelacks mit einem „Dispense“-System. Im Rahmen der Arbeit standen hierfür zwei Methoden zur Verfügung. Für Prägelacke mit einer Viskosität größer als 50 mPa·s wurde ein Eintropfendosierer, für Prägelacke mit einer Viskosität zwischen 8 mPa·s und

20 mPa·s ein Mehrtropfen „Ink-Jet“-System verwendet. Für den Eintropfendosierer wurde ein minimales Tropfenvolumen von 3 nl und für das „Ink-Jet“-System ein minimales Tropfenvolumen von 40 pl spezifiziert. Die Verteilung der Tropfen wird in der Software des Steuerprogramms der Imprintanlage programmiert. Nach der Verteilung des Lacks auf der Prägefläche erfolgt im nächsten Schritt der eigentliche Prägevorgang. Hierbei wird der Imprintkopf, an dessen Unterseite die Prägeform gehalten wird, von einer Spindel angetrieben in den Prägelack gedrückt. Zum Detektieren des Kontakts zwischen Prägeform und Prägelack ist ein Kraftsensor im Imprintkopf integriert. Im Rahmen der Arbeit war dieser so eingestellt, dass der Kontakt bei einer Kraft von 5 N definiert wurde. Nach dem Kontakt wird eine zuvor programmierte Prägeprozedur gestartet, wobei die Prozedur in Teilprozesse aufgeteilt ist. Für die Teilprozesse können hierbei jeweils die Kraft, die Dauer der Kraft und die Belichtungsintensität eingestellt werden. Nach dem Prägeschritt wird die nächste Position angefahren und der gesamte Prägevorgang wiederholt.

## 2.2 Reaktives Ionenätzen

Die Herstellung von integrierten Schaltungen ist seit 1958 industrielle Praxis [Kil76], wobei anfangs zur definierten Strukturierung einer Schicht, vor allem in der Metall-Oxid-Halbleiter (MOS) Technologie, nasschemische Ätzverfahren zum Einsatz kamen [Wu06]. Da nasschemische Ätzverfahren auf Grund von Unterätzungen der Maskierungsschicht die Maßhaltigkeit der Strukturübertragung nicht mehr gewährleisten konnten [Yan98][Hop98], begann man um 1970 Trockenätztechniken für die Bauelementherstellung zu untersuchen und einzusetzen.

Bei Trockenätzverfahren entstehen reaktionsfähige Teilchen im Plasma einer Niederdruckgasentladung. Hierbei werden Gasteilchen aus dem verwendeten Ätzgas durch Stöße mit schnellen Elektronen je nach Energieübertrag ionisiert, dissoziiert oder in angeregte Zustände gebracht. Durch die Prozesse der Anregung und der Dissoziation erreicht das Ätzgas seine Reaktionsfähigkeit und es werden chemische Prozesse ermöglicht, die weit entfernt vom thermischen Gleichgewicht statt finden, ohne dass die zu bearbeitende Oberfläche sich zu stark erwärmt [Wid96]. Somit können z.B. auch Fotolacke als Strukturierungsmasken eingesetzt werden. Für einen Ätzprozess ist es ideal, wenn die Strukturierungsmaske durch den Ätzprozess nicht aufgebraucht wird. In diesem Fall kann eine sehr dünne Maskierungsschichtdicke verwendet werden, wodurch eine hohe Maßhaltigkeit der Strukturübertragung erreicht werden kann. In der Praxis wird allerdings die Strukturierungsmaske durch den Ätzprozess aufgebraucht. Somit ergibt sich für den Substratätzprozess eine Ätzrate für das Substrat und eine für die Maskierung. Der Quotient aus Substratätzrate und Maskenätzrate ist als Selektivität  $S$  definiert:

$$S = \frac{r_{\text{Substrat}}}{r_{\text{Maske}}} \quad (2.7)$$

$r_{\text{Substrat}}$  : Substratätzrate

$r_{\text{Maske}}$  : Maskenätzrate

Bei den Trockenätzverfahren gibt es zwei Arten von Ätzprozessen: Den rein physikalisch wirkenden, bei dem hochenergetische Ionen (100 eV bis einige keV) auf Grund ihrer kinetischen Energie Atome aus dem zu ätzende Material „herausschlagen“ („Sputtern“) [Hae87] [Sug98], und das reaktive Ionenätzen (RIE: „reactive ion etching“), wo es zusätzlich zu der physikalischen Komponente eine chemische gibt. Auf Grund von geringeren Oberflächenschädigungen, höheren Selektivitäten sowie Substratätzraten wird das RIE-Ätzverfahren in der Si-Halbleitertechnologie gegenüber dem rein physikalischen Ätzen bevorzugt eingesetzt [Fra90]. Beim reaktiven Ionenätzen können verschiedene Kombinationen aus physikalischen und chemischen Abtragmechanismen den Ätzprozess beeinflussen. Zum einen gibt es Prozesse, bei denen die auf die Substratoberfläche auftreffenden Ionen die Oberfläche zunächst erodieren und somit Angriffsmöglichkeiten für chemische Reaktionen der im Plasma erzeugten aktiven Radikale schaffen. Bei anderen RIE-Prozessen liefert der Ionenbeschuss die notwendige Energie, um direkt an der abzutragenden Oberfläche reaktive Radikale zu erzeugen. Neben einer ätzenden können die eingesetzten Gase auch eine passivierende Wirkung haben, wenn aus diesen Polymerschichten auf der Oberfläche abgeschieden werden. Die Ätzung wird in diesen Fällen durch auftreffende Ionen initiiert, die den Polymerfilm abtragen und dort die chemische Reaktion ermöglichen. Da die Beseitigung des Polymerfilms nur in Richtung der auftreffenden Ionen erfolgt, bleiben die Seitenwände von Ätzgräben zumeist passiviert und vor dem chemischen Ätzangriff geschützt. Somit ist es möglich, einen Graben mit einem hohen Aspektverhältnis zu ätzen. Das Aspektverhältnis entspricht dem Verhältnis aus Grabentiefe zu Grabenbreite. Erreicht man durch den Ätzprozess ein Aspektverhältnis weit größer als eins so spricht man von einem anisotropen und bei einem Aspektverhältnis um eins von einem isotropen Ätzprozess.

Die Einstellung des Abtragmechanismus und somit das Ätzergebnis sind durch die Variation einer großen Anzahl an Prozessparametern möglich. Daher können neben einer hohen Selektivität eine hohe Anisotropie, eine geringe Rauheit des Substrates, sowie die Substratätzrate eingestellt werden [Wid96]. Dies gelingt durch eine geeignete Wahl der Ätzgaszusammensetzung, des Gasflusses und des Prozessdruckes. Des Weiteren können die Ätzparameter wie die

in das Plasma eingekoppelte Hochfrequenz-Leistung (HF-Leistung), die sich ausbildende Vorspannung zwischen Plasma und Substrat („Self-BIAS“) und die Temperatur der Substratauflage eingestellt werden. Die Einflüsse der einzelnen Parameter auf den Ätzprozess sollen im Folgenden diskutiert werden.

### *Zusammensetzung des Ätzgases*

Als Ätzgase für die Oberflächenschichten Si, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> und für die meisten Metalle werden in der Halbleitertechnologie hauptsächlich halogenhaltige Verbindungen (F<sub>2</sub>, BCl<sub>3</sub>, Cl<sub>2</sub>) eingesetzt [Wol00]. Im Plasma entstehen aus diesen Gasen unter anderem Radikale, die chemisch sehr aggressiv reagieren und einen Materialabtrag bewirken. Aus anderen Verbindungen wie z.B. C<sub>x</sub>F<sub>y</sub> und SF<sub>x</sub> gehen neben aggressiven Spezies auch Polymerbildner hervor. Diese können, wie bereits oben angesprochen, zur Passivierung der Seitenwände von Ätzgräben führen, wodurch senkrechte Ätzprofile ermöglicht werden. Zu den Ätzgasen werden zumeist Komponenten wie z.B. Sauerstoff (O<sub>2</sub>), Argon (Ar) oder Helium (He) beigemischt, mit denen der dominierende Prozess (Ätzung oder Ablagerung) eingestellt sowie die Ionendichte beeinflusst werden kann.

### *Gasfluss*

Mit dem Gasfluss wird die maximale Anzahl an verfügbaren Reaktanten festgelegt, wobei die tatsächliche Menge von den Generations- und Rekombinationsprozessen im Ätzgas abhängt. Wie bereits beschrieben generieren schnelle Elektronen durch Stöße mit dem verwendeten Ätzgas je nach Energieübertrag Ionen oder angeregte Teilchen. Dem gegenüber steht eine Abnahme an reaktiven Spezies durch die Ätzreaktion, durch die Reaktion mit anderen Teilchen und durch die Absaugung mit dem Vakuumsystem. Die Verlustrate der reaktiven Teilchen hängt dabei stark von deren mittlerer Verweilzeit  $\Delta t$  im Ätzraum ab. Für die mittlere Verweilzeit  $\Delta t$  gilt laut Gl. (2.8) [Wid96]:

$$\Delta t = \frac{pV}{RT\Phi} \quad (2.8)$$

Hier ist  $p$  der Gasdruck,  $V$  das Ätzkammervolumen,  $R$  die Gaskonstante,  $T$  die absolute Temperatur und  $\Phi$  der Gasfluss in die Ätzkammer. Für die Abhängigkeit der Ätzrate vom Gasfluss gibt es keine universell gültige Gleichung, da das System zu komplex ist [Cha77]. Allgemein

wird die Abhängigkeit der Ätzrate vom Gasfluss so beschrieben, dass man zwei Bereiche in Betracht ziehen muss, die in Abb. 2.13 schematisch dargestellt sind [Wid96].

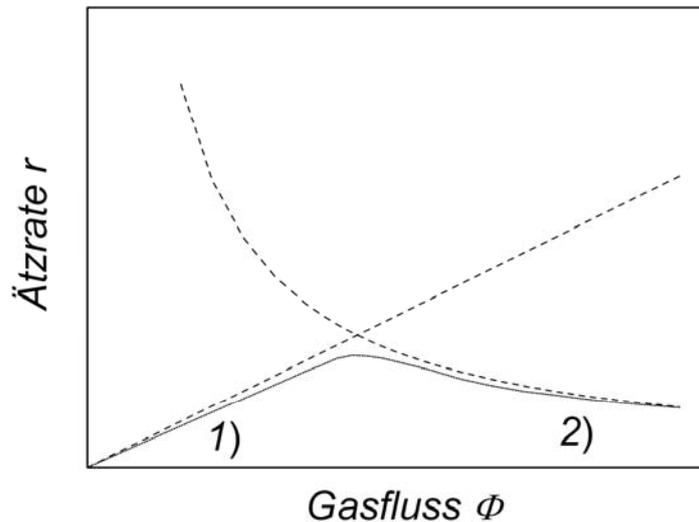


Abb. 2.13: *Prinzipieller Verlauf der Ätzrate in Abhängigkeit des Gasflusses. Für den Bereich 1) gilt, dass die Ätzrate linear mit dem Gasfluss steigt. Im Bereich 2) wird die Ätzrate begrenzt durch die Verweilzeit der reaktiven Spezies im Ätzraum*

Im Bereich geringer Gasflüsse (Abb. 2.13, Bereich 1)) steigt die Ätzrate mit zunehmendem Gasfluss an, da eine größere Anzahl an reaktiven Spezies zur Verfügung steht. Die Ätzrate wird in diesem Bereich kaum von der mittleren Verweilzeit  $\Delta t$  beeinflusst. Wird der Gasfluss über einen kritischen Punkt erhöht (Abb. 2.13, Bereich 2)), so wird die Ätzreaktion zunehmend von der Verweilzeit der reaktiven Spezies in der Ätzkammer nach Gl. (2.8) bestimmt, was zu einer reziprok proportionalen Abnahme der Ätzrate bei steigendem Gasfluss führt.

### Prozessdruck

Der Prozessdruck beeinflusst sowohl das Ätzprofil als auch die Ätzrate. Mit sinkendem Druck erhöht sich der Grad der Anisotropie, da die Ionen auf Grund der größeren mittleren freien Weglänge weniger gestreut, somit gerichteter und zusätzlich mit einer höheren kinetischen Energie auf das Substrat treffen. Ähnlich wie für die Abhängigkeit der Ätzrate vom Gasfluss gibt es auch bei der Abhängigkeit zwischen der Ätzrate und dem Gasdruck keine universell gültige Gleichung. Allgemein werden auch hier zwei Bereiche unterschieden, die schematisch in Abb. 2.14 gezeigt sind. Da die reaktiven Spezies durch Stoßprozesse mit Elektronen generiert werden, steigt zunächst im Bereich niedriger Prozessdrücke mit zunehmendem Prozessdruck die Ätzrate, da die Wahrscheinlichkeit zunimmt, dass ein Teilchen von einem Elektron mit ausreichender Energie getroffen wird (Abb. 2.14, Bereich 1)).

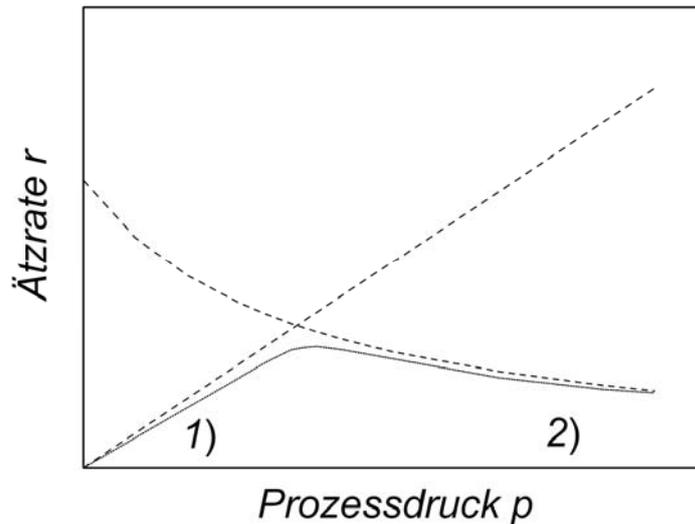


Abb. 2.14: Prinzipieller Verlauf der Ättrate in Abhängigkeit des Prozessdrucks. Für den Bereich 1) gilt, dass die Ättrate linear mit dem Prozessdruck steigt. Im Bereich 2) wird die Ättrate begrenzt durch die mittlere freie Weglänge der Elektronen

Steigt der Prozessdruck über einen kritischen Punkt, so reduziert sich die mittlere freie Weglänge der Elektronen und deren im elektrischen Feld aufgenommene Energie sinkt (Abb. 2.14, Bereich 2)). Dies hat zur Folge, dass weniger reaktive Spezies durch Stoßprozesse generiert werden können, wodurch die Ättrate sinkt. Bei polymerbildenden Gasen kann ein zunehmender Prozessdruck ebenfalls zu einer Reduzierung der vertikalen Ättrate führen, da die zu ätzende Oberfläche besser passiviert wird.

#### Eingekoppelte HF-Leistung

Die induktiv eingekoppelte HF-Leistung bestimmt den Ionisierungsgrad des Plasmas. So steigt mit zunehmender HF-Leistung der Ionisierungsgrad, was zur Folge hat, dass die Ättrate zunimmt. Liegen bereits alle Gasspezies in ionisierter Form vor, so bewirkt eine zusätzliche Erhöhung der HF-Leistung keine weitere Zunahme der Ättrate.

#### „Self-BIAS“

In die Substratauflage, die zugleich auch als Elektrode dient, wird eine hochfrequente Leistung kapazitiv eingekoppelt. Dem sich ausbildenden Wechselfeld können die Elektronen, kaum aber die schwereren Ionen folgen. Somit erreichen während einer Halbwelle wesentlich mehr Elektronen als Ionen die Elektrode und laden diese negativ auf. Die sich aufbauende negative Spannung an der Elektrode wird als „Self-BIAS“-Spannung bezeichnet. Durch das Potentialgefälle zwischen Plasma und der Substratauflage werden die positiven Ionen in die Richtung des

Substrats beschleunigt, wodurch die kinetische Energie bestimmt ist, mit der die positiven Ionen auf das zu ätzende Material treffen. Je höher die „Self-BIAS“-Spannung ist, umso stärker tritt der physikalische Ätzprozess in den Vordergrund, wodurch die Ätzrate steigt, zugleich aber die Selektivität sinkt.

### Temperatur

Bei einer rein chemischen Reaktion wird die Ätzrate  $r$  von der Temperatur  $T$  beeinflusst, wobei die Abhängigkeit nach Gl. (2.9) gültig ist [Wid96]:

$$r = r_0 \exp\left(\frac{-W_a}{kT}\right). \quad (2.9)$$

Hier entspricht  $W_a$  der notwendigen Aktivierungsenergie für die Ätzreaktion,  $T$  der absoluten Temperatur und  $k$  der Boltzmannkonstanten. Da  $W_a$  und  $k$  positive Werte sind, steigt nach Gl. (2.9) die Ätzrate mit der Temperatur (Arrhenius-Abhängigkeit).

#### 2.2.1 Reaktive Ionenätzenanlagen

Der prinzipielle Aufbau einer RIE-Ätzanlage, schematisch dargestellt in Abb. 2.15, entspricht einem Parallelplattenreaktor. Die untere Elektrode (Kathode) dient als Substratauflage und ist über ein Impedanzanpassungsnetzwerk mit einem Hochfrequenzgenerator verbunden. Die obere Elektrode (Anode) ist geerdet. Zwischen der Prozesskammer und dem Vakuumsystem befindet sich ein Ventil. Über dieses wird der Druck in der Kammer reguliert. Die Prozessgase werden von oben in die Kammer eingelassen. Das Plasma wird nach Einlassen der Ätzgase bei einer Anregungsfrequenz von 13,56 MHz über Stoßionisationsprozesse gezündet. Dabei werden Radikale und Ionen in Folge der Ionisations- und Dissoziationsprozesse aus den Ätzgasbestandteilen erzeugt. Da das hochfrequente Wechselfeld kapazitiv in die Bodenelektrode eingekoppelt wird, können die leichteren Elektronen auf Grund ihrer, im Vergleich zu den schwereren positiven Ionen, höheren Beweglichkeit während einer hochfrequenten Halbwelle die Bodenelektrode erreichen und laden diese negativ auf („Self-BIAS“). Im Vergleich dazu liegt das Plasma nun auf positivem Potential.

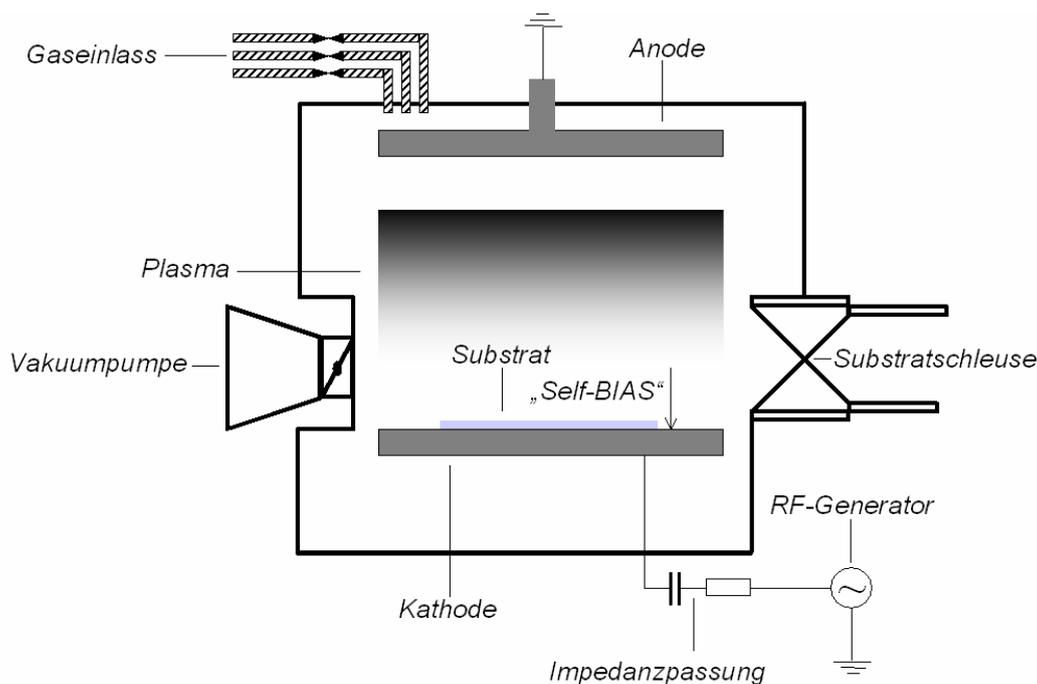


Abb. 2.15: Schematischer Aufbau einer RIE-Anlage

Im Bereich zwischen dem Plasma und der Bodenelektrode ist ein Potentialgefälle vorhanden (Dunkelfeld). Die positiv geladenen Teilchen werden nun auf Grund des im Dunkelfeld abfallenden Gleichspannungsfeldes in Richtung des Substrates beschleunigt. Je größer diese Vorspannung ist, desto gerichteter (anisotroper) ist der Ätzprozess. Die beschleunigten Ionen können an der Substratoberfläche auf Grund ihrer kinetischen Energie Atome herauslösen (physikalischer Anteil der Ätzrate). Die Wechselwirkungen von den aus dem Ätzgas im Plasma generierten Radikalen mit der Oberfläche bewirken einen zusätzlichen chemischen Angriff. Durch den chemischen Angriff wird die Bindungsenergie des zu ätzenden Materials reduziert und es bilden sich flüchtige Verbindungen, die durch das Pumpensystem abgesaugt werden [Hop98].

Eine Erhöhung der Plasmadichte bzw. des Ionisierungsgrades wird durch die Anregung des Plasmas über eine Spule erreicht (ICP RIE: „inductively coupled plasma reactive ion etching“). In einer ICP RIE-Anlage (siehe Abb. 2.16) können die Plasmadichte und die Ionenenergie, welche einen entscheidenden Einfluss auf die Selektivität und auf Substratschädigungen haben, unabhängig voneinander eingestellt werden [Kel93]. Beim ICP RIE-Ätzprozess wird das Plasma über eine Spule, die durch ein Impedanzanpassungsnetzwerk mit einem Hochfrequenzgenerator (13,56 MHz) verbunden ist, induktiv erzeugt. Zusätzlich wird wie bei einer RIE-Anlage ein hochfrequentes Wechselfeld (13,56 MHz) in die Kathode kapazitiv eingekoppelt, womit die „Self-BIAS“ zwischen Plasma und Substrat und somit der physikalische Ätzanteil eingestellt wird.

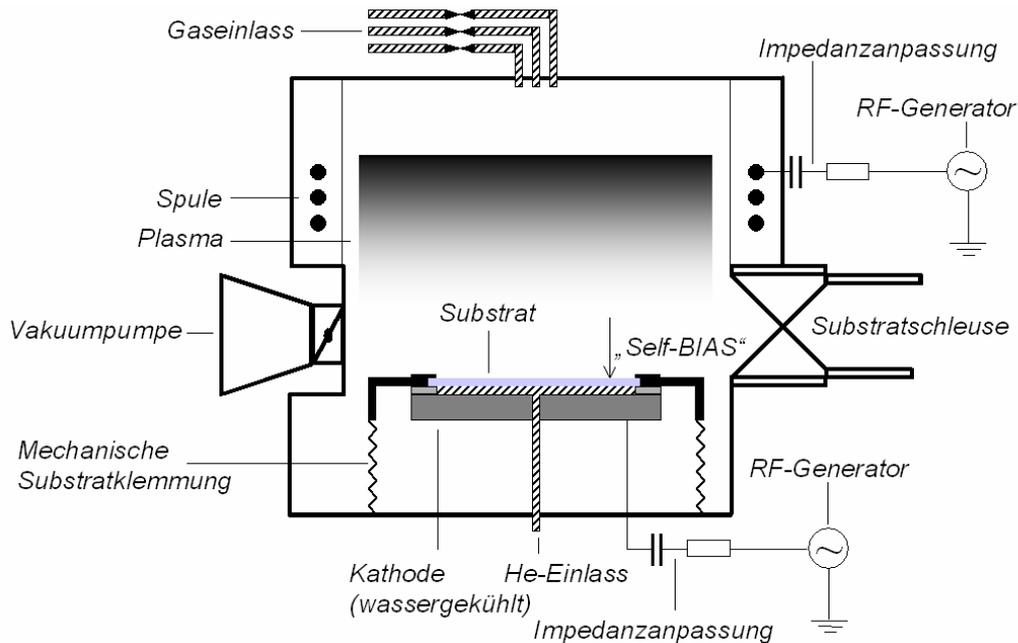


Abb. 2.16: Schematischer Aufbau einer ICP RIE-Anlage

Bei der im Rahmen der Arbeit verwendeten ICP RIE-Anlage (ASE von „Surface Technology Systems“) wird das Substrat über eine Klemmvorrichtung auf einem Ring am Boden der Prozesskammer fixiert. Der Raum innerhalb des Ringes wird mit Helium gespült, wodurch der Abtransport der Wärme von der Substratunterseite zu der wassergekühlten Kathode erfolgt. Auf Grund der Plasmaanregung über eine Spule wird ein höherer Ionisationsgrad als beim reinen RIE-Ätzen erreicht, weshalb geringere Prozessdrücke verwendet werden können. Somit wird die mittlere freie Weglänge der Ätzspezies erhöht und es erfolgt ein gerichteter Ätzprozess. Hierdurch wird auch der sogenannte „RIE-lag“ reduziert. Unter „RIE-lag“ versteht man die Abnahme der Ätzrate mit steigendem Aspektverhältnis, weshalb z.B. Gräben mit kleinen Strukturbreiten langsamer geätzt werden als breite Gräben [Got92]. Des Weiteren wird auf Grund des höheren Ionisierungsgrades die Selektivität beim Ätzprozess erhöht und bei gleich bleibender Ätzrate werden Strahlenschäden im Substrat reduziert [Pan00].

Schwerpunkt der Arbeit in Bezug auf die Untersuchung von Ätzprozessen in oben genannter ICP RIE-Anlage ist die Strukturierung von Quarzprägeformen für die UV-NIL. Hierfür ist die Entwicklung von optimierten Chrom- und Quarzätzprozessen erforderlich. Die wichtigsten Vorgänge bei diesen Ätzprozessen werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

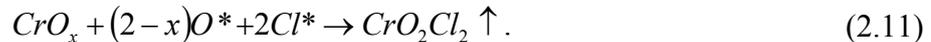
### 2.2.2 Chromätzprozess

Die Entwicklung von Chromätzprozessen, vor allem zur Strukturierung von Masken für die optische Lithografie, begann in den 70er Jahren [Wu06]. Anfänglich erfolgte die Strukturie-

nung nasschemisch. 1976 wurde erstmals über Untersuchungen zum Plasmaätzen von Cr berichtet. Es zeigte sich hierbei, dass zum Ätzen von Cr und  $\text{CrO}_x$  reaktive Cl-Radikale ( $\text{Cl}^*$ ) notwendig sind [Abe76]. 1980 haben Nakata et al. [Nak80] erkannt, dass aktive Sauerstoffspezies wie Sauerstoffradikale ( $\text{O}^*$ ) einen zusätzlichen Beitrag zur Plasmaätzreaktion von Cr und  $\text{CrO}_x$  leisten, indem durch diese Radikale flüchtige Verbindungen (vor allem Chromylchlorid ( $\text{CrO}_2\text{Cl}_2$ )) erzeugt werden. Die Ätzreaktion für Cr wird nach Gl. (2.10) wie folgt beschrieben [Res00]:



Für  $\text{CrO}_x$  gilt nach Gl. (2.11) folgende Ätzreaktion [Res00]:

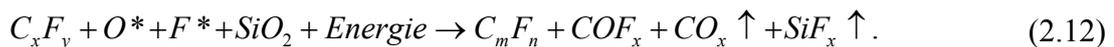


Für beide Reaktionsgleichungen sind reaktive Sauerstoff- und Cl-Spezies notwendig. Für die Strukturierung von Cr kommt im Rahmen der Arbeit eine Lackmaskierung zum Einsatz, die durch den Sauerstoffanteil in der Ätzgaszusammensetzung während des Cr-Ätzprozesses angegriffen wird. Aus diesem Grund muss bei der Auswahl der weiteren Cr-Ätzparameter neben der Steilheit der Cr-Kante und der Maßhaltigkeit der Strukturübertragung vor allem die Selektivität zwischen Cr und Fotolack beachtet werden. Nach Smith et al. [Smi01] erhöht sich die Selektivität zwischen Cr und Lack für den Cr-Ätzprozess durch eine Verringerung der HF-Leistung und der „Self-BIAS“. Durch die Reduzierung der HF-Leistung sinkt allerdings die Cr-Ätzrate, weshalb die HF-Leistung an die Anforderungen des Ätzprozesses angepasst werden muss. Des Weiteren erhöht sich mit steigendem Druck sowohl die Cr-Ätzrate als auch die Selektivität [Con97]. In Smith et al. [Smi01] wird weiterhin beschrieben, dass steile Cr-Kanten für kleinste Strukturen nur durch eine ausreichend lange Überätzung erreicht werden können.

### 2.2.3 Quarzätzprozess

Eine wichtige Anwendung des  $\text{SiO}_2$ -Ätzens in der Fertigung elektronischer Bauelemente stellt unter anderem das Kontaktlochätzen dar [Wol00.]. Zum Ätzen von  $\text{SiO}_2$  sind fluorhaltige Komponenten notwendig. Diese Komponenten können entweder nasschemisch in Form von Flusssäure oder in einer reaktiven Ionenätzanlage aus fluorhaltigen Gasen bereit gestellt werden [Kel93].

In einer RIE-Anlage werden im Plasma aus Fluor-Kohlenstoffätzgasen wie z.B.  $\text{CF}_4$ ,  $\text{C}_2\text{F}_4$ ,  $\text{C}_3\text{F}_8$  oder  $\text{C}_4\text{F}_8$  polymerbildende Spezies erzeugt. Diese scheiden sich am Boden und den Seitenwänden des zu ätzenden Substrats als Polymerschicht ab und liegen zumeist in der Form  $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$  vor. Gelangen reaktive Teilchen aus dem Plasma (hauptsächlich  $\text{CF}_3^+$ ,  $\text{CF}_2^+$  und  $\text{CF}^+$ -Ionen [But91]) mit einer ausreichend hohen Aktivierungsenergie an die  $\text{SiO}_2$ -Polymergrenzfläche, so reagiert das  $\text{SiO}_2$  mit den Fluor-Kohlenstoffverbindungen aus der Polymerschicht und es bilden sich flüchtige Substanzen wie z.B.  $\text{COF}_x$ . Hierdurch und über Ionensputterprozesse braucht sich die Polymerschicht auf. Neben dem Ätzangriff durch reaktive Fluor-Kohlenstoffverbindungen wird das  $\text{SiO}_2$  zusätzlich durch Fluorradikale geätzt [Fla79], wenn diese eine ausreichend hohe Energie besitzen, um die Polymerschicht zu durchdringen. Hierbei reagieren die Fluorradikale mit dem Quarz und bilden nach Gl. (2.12) flüchtiges  $\text{SiF}_x$  [San03]. Der bei dieser Reaktion freiwerdende Sauerstoff reagiert weiter mit dem Kohlenstoff aus der Polymerschicht zu dem ebenfalls flüchtigen  $\text{CO}_x$ . [San03].



Zum Ätzen von Quarz müssen die reaktiven Spezies durch die passivierende Polymerschicht gelangen, wofür sie eine ausreichend hohe Energie benötigen. Die Bewegung der reaktiven Teilchen und somit der Ätzangriff erfolgt zumeist senkrecht zur Oberfläche. Somit gibt es unter günstigen Bedingungen keine laterale Ätzrate, da die Seitenwände durch die Polymerschicht passiviert sind. Folglich können rechteckige Profile realisiert werden, wenn andere limitierende Effekte (wie das sogenannte „Microtrenching“) beim Ätzprozess nicht auftreten. Das „Microtrenching“ wird beobachtet, wenn die Flugbahnen der positiven Ionen durch negativ geladene Seitenwände beeinflusst werden [Sch98], so wie es in Abb. 2.17 schematisch dargestellt ist. Dieser Effekt tritt hauptsächlich bei isolierenden Materialien auf, wenn die deponierten Ladungen nicht abfließen können.

Für die Quarzätzrate stellt die Polymerschichtdicke einen entscheidenden Faktor dar [Mat01]. So müssen zum einen die Reaktionsedukte mit einer ausreichend hohen Aktivierungsenergie durch die Polymerschicht zur  $\text{SiO}_2$ -Polymergrenzschicht gelangen, weshalb die Quarzätzrate zumeist umgekehrt proportional zur Polymerschichtdicke ist. Zum anderen führt eine zu geringe Polymerschichtdicke zu einer verringerten Quarzätzrate, da die reduzierte Anzahl an Edukten auf die Quarzätzrate limitierend wirkt.

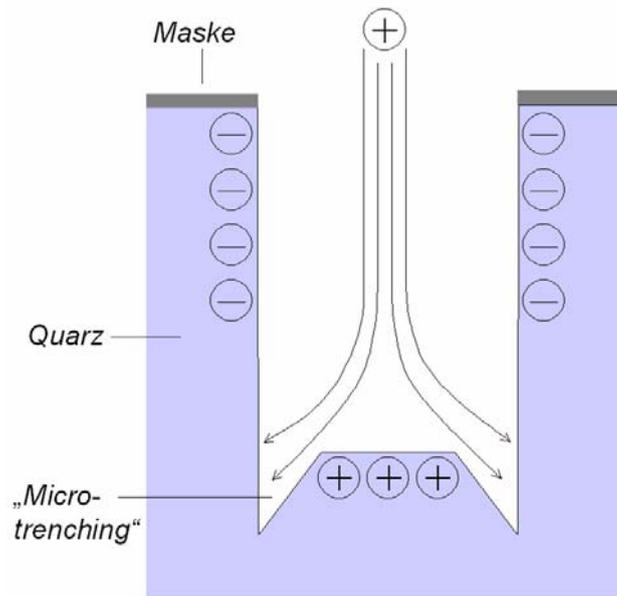


Abb. 2.17: Schematische Darstellung zur Entstehung des „Microtrenchings“ bei isolierenden Materialien. Auf Grund von Aufladungseffekten an den Seitenwänden während des Ätzprozesses kommt es zu Abweichungen vom idealen Rechteckprofil

Auch durch die Ätzgasmischung kann der Ätzprozess beeinflusst werden. So bewirkt Argon eine Erhöhung der Plasmadichte und einen Anstieg in der Selektivität gegenüber den Maskierungsschichten Si und Fotolack [Li02]. Dagegen bewirkt eine Beimischung von  $O_2$  nur eine unwesentlich erhöhte Plasmadichte und die Selektivitäten gegenüber den Maskierungsschichten Si und Fotolack sind reduziert [Li02]. Allerdings kann der Anteil an polymerbildenden  $CF_n$ -Verbindungen durch die Zugabe von  $O_2$  eingestellt werden, da  $O_2$  die  $CF_n$ -Verbindungen oxidiert und dabei CO und zusätzliche Fluoratome freisetzt [Hop98], wodurch die Ätzreaktion entscheidend beeinflusst wird. So verhindert z.B. ein Plasma mit einem zu großen Anteil an  $CF_n$ -Verbindungen, dass Gräben mit Breiten im Bereich unter 100 nm maßhaltig geätzt werden können, da Seitenwand-Polymerablagerungen den Graben verengen und somit die Ätzspezies an einem gleichmäßigen Ätzangriff hindern [Wol00]. Die Beschreibung der Vorgänge beim Quarzätzprozess in einem Fluor-Kohlenstoffplasma sind sehr komplex und im Detail nicht vollständig verstanden [Li02]. Aus diesem Grund wurde ein Schwerpunkt der Arbeit auf die experimentelle Optimierung des Ätzprozesses für Quarzprägeformen gelegt.

### 3 Verwendete Charakterisierungsverfahren

#### 3.1 Kontaktwinkelmessung

Eine Vielzahl von Produkten erhält ihre charakteristischen Eigenschaften durch das Auftragen einer dünnen Schicht, die z.B. als Informationsträger, als optische Komponente oder als Schutzschicht dienen kann. Auch das Aufbringen einer dünnen Schicht zur Haftvermittlung zwischen zwei Materialien hat in vielen Bereichen eine große Bedeutung. So wird z.B. in der Halbleitertechnik typischerweise die Si-Substratoberfläche mit HMDS (Hexamethyldisilazan) beschichtet, um die Fotolackhaftung sicher zu stellen. Die Haftung wird hauptsächlich von zwei Faktoren beeinflusst, der Benetzung und der spezifischen Adhäsion. Die Benetzung und die spezifische Adhäsion müssen hierbei hoch sein.

Unter der spezifischen Adhäsion versteht man die chemische und physikalische Adsorption von Molekülen an der Grenzschicht, wobei die Festigkeit in der Grenzschicht überwiegend durch zwischenmolekulare Bindungen hervorgerufen wird. Die Natur dieser Bindungen beruht auf Wechselwirkungen zwischen Molekülen mit abgesättigten Valenzschalen. Bei dem Zustandekommen der Grenzschicht muss die Bildung eines sogenannten „weak boundary layers“ vermieden werden [Hab97]. Dieses Phänomen kann in der Nähe der Grenzschicht auftreten und sorgt dort für eine starke Reduktion der Festigkeit, indem funktionelle Molekülgruppen durch deren Bindung an die Substratgrenzfläche nicht mehr für eine Bindung zum restlichen UV-Polymer zur Verfügung stehen. Hierdurch werden die Kohäsionskräfte in der UV-Polymerschicht reduziert. Eine zweite Ursache für die Ausbildung einer solchen schwach haftenden Grenzschicht können Gaseinschlüsse sein. Gaseinschlüsse werden durch eine schlechte Benetzung der Oberfläche durch die UV-Polymere oder durch eine nicht ausreichende Löslichkeit von Gasen im UV-Polymer hervorgerufen.

Der zweite Faktor zum Erreichen einer hohen Haftung, die Benetzung, ist dagegen ein makroskopisches Phänomen, das auf molekularen Wechselwirkungen zwischen Flüssigkeitsmolekülen und einer Oberfläche basiert. Während die spezifische Adhäsion keine Messgröße ist, wird die Benetzung experimentell durch die Kontaktwinkelmessung bestimmt [WWW3]. Kontaktwinkelmessungen finden grundsätzlich in einem 3-Phasensystem statt. Eine Phase stellt der Festkörper dar, dessen Oberfläche untersucht werden soll. Die zweite Phase ist die Flüssigkeit und als dritte Phase wird zumeist die Umgebungsatmosphäre verwendet. In diesem 3-Phasen-System gibt es drei Phasengrenzen: Die zwischen Festkörper und Gas (sg), die zwischen Gas und Flüssigkeit (gl) und die zwischen der Flüssigkeit und dem Festkörper (ls). Der Kontaktwinkel  $\theta$  wird definiert, wie in Abb. 3.1 dargestellt, und steht mit der Oberflächenenergie des

Festkörpers  $\sigma_{sg}$ , der Oberflächenspannung der Flüssigkeit  $\sigma_{gl}$  und der Grenzflächenenergie  $\sigma_{ls}$  zwischen Flüssigkeit und Substrat wie folgt in Beziehung:

$$\sigma_{sg} = \sigma_{ls} + \sigma_{gl} \cos \Theta. \quad (3.1)$$

Dieser Zusammenhang wurde zuerst von Young [You05] beschrieben und gilt im thermodynamischen Gleichgewicht. Die Größe des Kontaktwinkels ist ein Maß für die Wechselwirkung zwischen Flüssigkeit und Festkörper an der Grenzfläche. Je geringer diese Wechselwirkung ist, desto größer ist der Kontaktwinkel.

Die Wechselwirkungen zwischen Festkörper und Flüssigkeit können sowohl auf chemische, als auch auf physikalische Einflüsse zurückgeführt werden. Soll nur der Einfluss der chemischen Wechselwirkung an der Phasengrenze untersucht werden, so muss dabei vor allem die Oberflächentopografie des Festkörpers konstant gehalten werden.

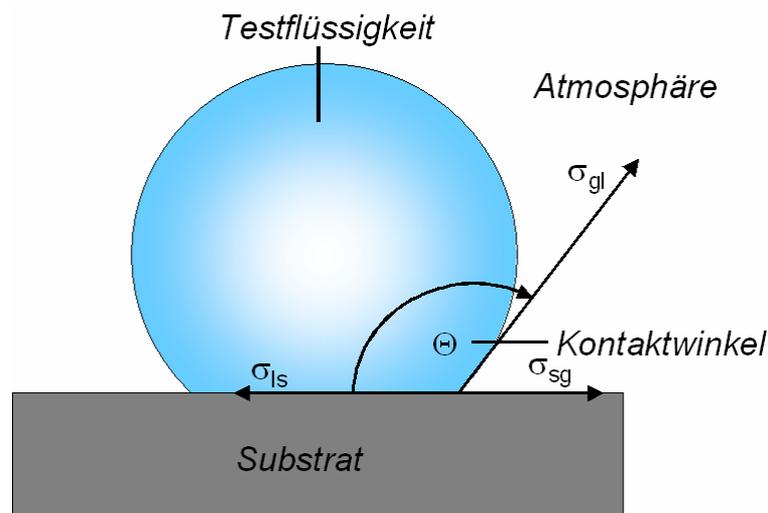


Abb. 3.1: Schematische Darstellung zur Bestimmung des Kontaktwinkels  $\Theta$

Die Kontaktwinkelmessungen wurden im Rahmen der Arbeit durchgeführt, um die Benetzung von verschiedenen vorbehandelten Silicium- und Prägeformoberflächen durch UV-Polymere zu bestimmen, sowie um deren Oberflächenenergie zu berechnen. Ein kleiner Kontaktwinkel bedeutet eine gute Benetzung, was eine Voraussetzung für eine gute Haftung ist. Dies ist im Rahmen der UV-NIL von Bedeutung, da die UV-Polymere auf dem Substrat haften, sich aber von der Prägeform wieder rückstandsfrei trennen lassen müssen. Des Weiteren wurden die Kontaktwinkelmessungen verwendet, um die Oberflächenspannung der verwendeten UV-Polymere nach einem im Rahmen der Arbeit neu entwickelten Auswerteverfahren zu bestimmen.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Kontaktwinkelmessungen erfolgten mit dem Kontaktwinkelmessgerät G1 der Firma Krüss GmbH. Für die Messung des Kontaktwinkels wird mit einer Mikrometerschraube durch eine stumpfe Injektionsnadel ein Tropfen mit einem Volumen von ca. 3  $\mu\text{l}$  auf die zu untersuchende Oberfläche dosiert. Der rückseitig beleuchtete Tropfen wird im Folgenden von vorne durch ein Mikroskop betrachtet. Im Okular des Mikroskops befindet sich eine Basislinie, welche parallel zur messenden Substratoberfläche ausgerichtet wird, eine Messlinie, die in den Tripelpunkt des Tropfens gelegt wird und eine Skala am Rand des Okulars, an welcher der Wert des Kontaktwinkels abgelesen wird. Es wurden jeweils Messungen an 10 Tropfen durchgeführt, die an verschiedenen Stellen der Probe aufgebracht wurden, und aus den entsprechenden Werten der Mittelwert berechnet.

Aus dem Wert des Kontaktwinkels können Eigenschaften des Festkörpers, wie z.B. die Oberflächenenergie  $\sigma_{sg}$ , bestimmt werden. Für die Berechnung der Oberflächenenergie gibt es verschiedene Modelle, wobei im Rahmen der Arbeit das Verfahren nach Owens und Wendt angewendet wurde [Owe69]. Diesem Verfahren liegt die Annahme zugrunde, dass sich die Grenzflächenenergie der Oberfläche entsprechend der unterschiedlichen Wechselwirkungen aufspalten lässt. Dabei wird zwischen polaren und dispersiven Wechselwirkungen unterschieden. Unter polaren Wechselwirkungen werden die Coulombwechselwirkungen zwischen permanenten Dipolen und die zwischen permanenten und induzierten Dipolen zusammengefasst. Die Wechselwirkungen auf Grund von zeitlichen Fluktuationen in der Ladungsverteilung innerhalb der Moleküle bzw. der Oberfläche werden als dispersive Wechselwirkung bezeichnet.

Nach der Theorie von Owens und Wendt setzt sich die Oberflächenenergie  $\sigma$  eines Mediums additiv aus dem polaren ( $\sigma^p$ ) und dem dispersiven ( $\sigma^d$ ) Anteil nach Gl. (3.2) zusammen [Owe69]:

$$\sigma = \sigma^p + \sigma^d . \quad (3.2)$$

Weiterhin gilt für die Grenzflächenenergie  $\sigma_{ls}$  nach Owens und Wendt folgender Zusammenhang [Owe69]:

$$\sigma_{ls} = \sigma_s + \sigma_l - 2\sqrt{\sigma_l^d \sigma_s^d} - 2\sqrt{\sigma_s^p \sigma_l^p} . \quad (3.3)$$

Kombiniert man Gl. (3.1) und Gl. (3.3) erhält man Gl. (3.4):

$$\frac{\sigma_l(\cos\Theta + 1)}{2\sqrt{\sigma_l^d}} = \sqrt{\sigma_s^p} \frac{\sqrt{\sigma_l^p}}{\sqrt{\sigma_l^d}} + \sqrt{\sigma_s^d} . \quad (3.4)$$

Diese Gleichung stellt eine Geradengleichung der Form:

$$y = mx + b , \quad (3.5)$$

dar, mit:

$$y = \frac{\sigma_l(\cos\Theta + 1)}{2\sqrt{\sigma_l^d}} . \quad (3.6)$$

$$x = \frac{\sqrt{\sigma_l^p}}{\sqrt{\sigma_l^d}} . \quad (3.7)$$

$$m = \sqrt{\sigma_s^p} . \quad (3.8)$$

$$b = \sqrt{\sigma_s^d} . \quad (3.9)$$

Trägt man die y-Werte über die x-Werte für mindestens 2 Flüssigkeiten mit bekannten Werten für deren Oberflächenspannung auf und legt eine Gerade durch die Punkte, so kann der polare Anteil der Oberflächenenergie durch Quadrieren der Steigung  $m$  und der dispersive Anteil durch Quadrieren des y-Achsenabschnittes  $b$  ermittelt werden [Lec99]. Als Testflüssigkeiten zur Bestimmung der Oberflächenenergie von Festkörpern wurden deionisiertes Wasser und 1-Oktanol gewählt. Deren Werte für die Oberflächenspannung sind in Tab. 3.1 aufgeführt.

Tab. 3.1: Werte der polaren und dispersiven Anteile der Oberflächenspannung für die Testflüssigkeiten DI-Wasser und 1-Oktanol zur Bestimmung der Oberflächenenergie

Flüssigkeit	Oberflächenspannung $\sigma$ (mN/m)	Polarer Anteil $\sigma^p$ (mN/m)	Dispersiver Anteil $\sigma^d$ (mN/m)
DI-Wasser [Bel90]	72,8	51,0	21,8
1-Oktanol [Sch77]	27,6	6,3	21,3

Neben der beschriebenen Berechnung der Oberflächenenergie von Festkörpern wurden auch die Oberflächenspannungen verwendeter UV-Polymere ausgewertet. Da hier eine im Rahmen der Arbeit neue Auswertemethode entwickelt wurde, ist deren Herleitung im Ergebniskapitel 5.2.2 kurz skizziert und im Anhang detailliert beschrieben.

### 3.2 Stufenhöhenmessverfahren

Zur Bestimmung der Tiefe von Gräben nach einem Ätzschritt wurde unter anderem das Stufenhöhenmessgerät „P-2 Long Scan Profiler“ von TENCOR INSTRUMENTS verwendet. Aus den Messwerten zu den Stufenhöhenmessungen wurden die Ätzraten und die Selektivitäten vieler Ätzprozesse bestimmt. Für die Messung wurde das geätzte Substrat auf einem Vakuumtisch gehalten. Die Abtastung der Oberfläche erfolgte mittels einer Nadel, an deren Ende eine Diamantspitze sitzt, die einen Spitzenradius von etwa 5  $\mu\text{m}$  aufweist. Während der Messung wird das Substrat unter der Nadel entlang einer Messlinie mit konstanter Geschwindigkeit und gleichbleibendem Auflagedruck verfahren. Die Nadel ist mit einem Sensor verbunden, der die Höhenänderung der Nadel detektiert. Die Höheninformationen entlang der Messlinie werden nach der Messung an einem Bildschirm ausgegeben.

Durch geeignete Messbedingungen kann in vertikaler Richtung eine Messgenauigkeit von 1 nm erreicht werden [Lon02]. In horizontaler Richtung ist die Auflösung durch die Spitzenform der Messnadel limitiert. Vorteile des Stufenhöhenmessverfahren sind, dass man in weniger als 1 min die Äztiefe einer Probe bestimmen und Stufen mit einer Höhendifferenz bis 120  $\mu\text{m}$  vermessen kann. Nachteile sind, dass man auf Grund des Spitzenradius der Messnadel keine Stufenhöhe in Gräben mit einer Breite kleiner 5  $\mu\text{m}$  messen und die Flankenwinkel von Stufen auf Grund der verrundeten Spitze nicht exakt bestimmen kann.

### 3.3 Rasterkraftmikroskopie

Die rasterkraftmikroskopischen Untersuchungen erfolgten mit einem Rasterkraftmikroskop (AFM: „atomic force microscope“) Dimension 5000 von Digital Instruments. Das AFM ermöglicht die direkte Abbildung von Oberflächen. Zur Messung der Topografie werden die Wechselwirkungen zwischen einer scharfen Spitze und der zu messenden Oberfläche genutzt. Die Messungen dienen zur Bestimmung von Flankenwinkeln, Oberflächenrauheiten und Äztiefen unterschiedlicher Proben. Das AFM, dessen Aufbau schematisch in Abb. 3.2 dargestellt ist, wurde bei den Messungen im sogenannten „Tapping“-Modus betrieben.

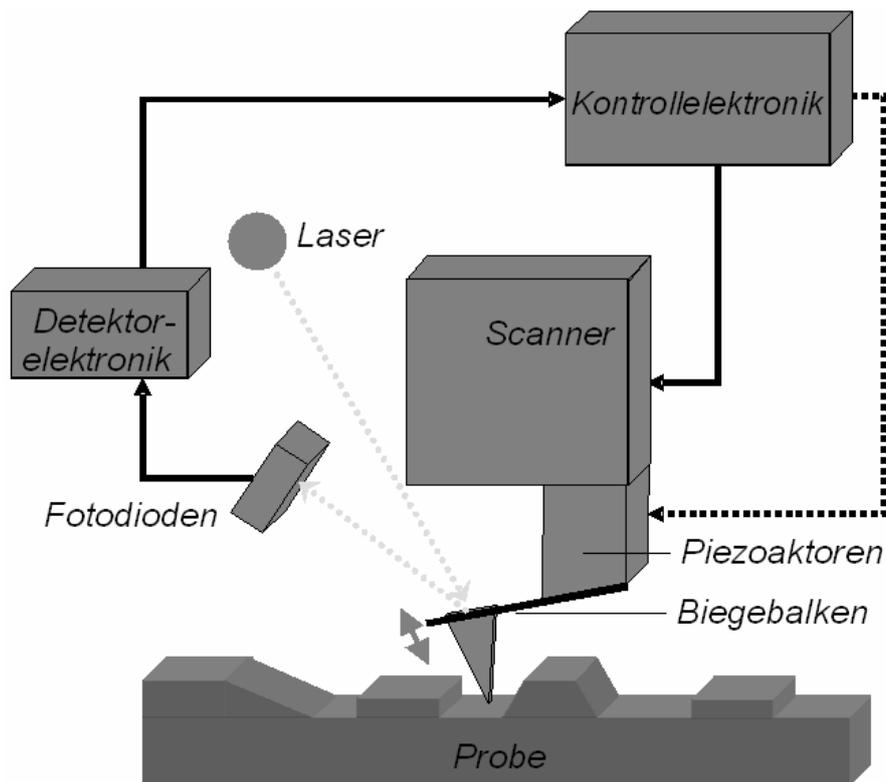


Abb. 3.2: Schematische Darstellung des Prinzips der AFM-Messung

Hierbei wird ein freitragender Biegebalken („Cantilever“), an dessen Ende eine pyramidal zulaufende Spitze sitzt, mittels eines Piezoaktors knapp über oder unter der Resonanzfrequenz des „Cantilevers“ in Schwingung versetzt. Die Schwingung wird optisch gemessen, indem ein Laserstrahl von der Rückseite des „Cantilevers“ reflektiert und mittels vier Fotodioden detektiert wird. Der von der Fotodiode detektierte sinusähnliche Signalverlauf des vom „Cantilever“ reflektierten Laserstrahls enthält die Information über die Kraft zwischen Messspitze und Probenoberfläche.

Der „Cantilever“ und die Spitze sind Teile eines Sensors, der in einem „Scanner“ unter einem Winkel von etwa  $13^\circ$  zur Messoberfläche eingebaut ist. Der „Scanner“ wird während der Messung in der Höhe so nachgeregelt, dass die Kraft zwischen der Spitze und der Probenoberfläche konstant bleibt. Die Positionierung des „Cantilevers“ (und somit die der Spitze) in x- und y-Richtung erfolgt bei der Messung über zwei Piezoaktoren mittels derer eine Auflösung im pm-Bereich erreicht wird. Mit der Information zur Höhenposition des Scanners wird die Topografie der Probenoberfläche dargestellt [Dig01].

Die Spitze hat typischerweise einen Spitzenradius von wenigen nm, weshalb die Topografie der Probenoberfläche mit einer sehr hohen Auflösung abgetastet werden kann. Bei AFM-Messungen können verschiedene Faktoren das Messergebnis verfälschen. So berührt die Spitze

beim Abtasten der Probenoberfläche diese im unteren Umkehrpunkt der Schwingung je nach Einstellung mehr oder weniger stark, wodurch es unter anderem zu einer Verrundung oder einem Abbrechen der Spitze kommen kann, wodurch die Auflösung der Messung reduziert wird. Bei der Messung von Gräben mit einem hohen Aspektverhältnis kann die Pyramidenform der Spitze verhindern, dass die Spitze den Boden des Grabens erreicht. Des Weiteren muss bei den Messungen von Flankenwinkeln eines Grabens sowohl die Pyramidenform der Spitze als auch die Neigung der Spitze zur Probenoberfläche (etwa  $13^\circ$ ) berücksichtigt werden. Beide Faktoren sind dafür verantwortlich, dass nur eine Flanke des Grabens korrekt gemessen wird, außer man verwendet speziell nachgearbeitete Spitzen (Sonden), welche diese Neigung kompensieren.

Für die Auswertung der Oberflächenrauheiten wird die Höhenposition jeder x,y-Koordinate grafisch dargestellt und eine Ausgleichsgerade (2-dimensional) oder eine Ausgleichsebene (3-dimensional) ermittelt. Die Abweichung jedes einzelnen Messpunktes von der Ausgleichsgerade oder -ebene wird üblicherweise durch  $R_a$  oder  $RMS$  ausgedrückt.

$R_a$  ist definiert als arithmetischer Mittenrauwert (entspricht der mittleren Abweichung von Mittelwert):

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Z_i - \bar{Z}|. \quad (3.10)$$

$RMS$  ist definiert als quadratischer Mittenrauwert:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2}. \quad (3.11)$$

Der Wert  $R_a$  wird zumeist für eine maschinell bearbeitete Oberfläche und der Wert  $RMS$  zumeist für eine Oberfläche mit optischer Güte verwendet [WWW4].



## 4 Herstellung von Quarzprägeformen für die UV-Nanoimprint-Lithografie

Die UV-Nanoimprint-Lithografie ermöglicht die Übertragung von Strukturbreiten bis in den sub-10 nm Bereich [Vra03]. Um diese hohe Auflösung zu erreichen müssen alle für die Quarzprägeformherstellung notwendigen Technologieschritte optimiert sein. Bei der UV-NIL erfolgt im optimalen Fall eine 1:1-Übertragung der Prägeformstrukturen in ein UV-Polymer. Bei der Projektions-Lithografie wird das Maskenbild über eine Linsenoptik 4-fach verkleinert in einen Fotolack projiziert. Da die Quarzprägeformen prinzipiell mit den gleichen Technologien wie die Masken für die Projektions-Lithografie hergestellt werden, ergeben sich aus der fehlenden Strukturreduktion bei der UV-NIL höhere Anforderungen für die Technologieschritte der Quarzprägeformherstellung. Dies spielt im Besonderen bei der Definition der Prägeformstrukturen durch etablierte Lithografieverfahren, wie der Elektronenstrahl-Lithografie, eine entscheidende Rolle. Aktuell können reproduzierbar Strukturbreiten bis 50 nm mit dem Elektronenstrahl erzeugt werden. Im Labormaßstab werden kleinere Dimensionen erreicht, indem die Fotolacke chemisch verstärkt und die Säulen der Elektronenstrahlbelichter optimiert werden, so dass Strukturen von wenigen 10 nm geschrieben werden können. Immer kleiner werdende Strukturbreiten erhöhen im Folgenden aber auch die Anforderungen an die Ätztechnologie, da z.B. höhere Aspektverhältnisse realisiert werden müssen. Das Aspektverhältnis hat einen großen Einfluss auf das Ätzprofil und auf die Ätzrate. Trotz dieser Herausforderungen muss eine defektfreie Herstellung von Prägeformen gewährleistet werden, um die UV-NIL als Strukturierungsverfahren für die Herstellung von elektronischen Bauelementen einsetzen zu können. Defekte in der Prägeform werden, wie in Kapitel 2 bereits beschrieben, durch das „step and repeat“-Verfahren auf das Substrat wiederholt übertragen und führen somit zu einer Verringerung der Ausbeute und folglich zu einer Erhöhung der Kosten pro gefertigtem Bauelement. Aktuell ist es möglich, Quarzprägeformen für einige 1000 € bis 10000 € zu erwerben. Um hier eine Kostenersparnis zu erreichen, wurde im Rahmen der Arbeit ein Konzept zur Herstellung von Quarzprägeformen entwickelt, mit dem die Kosten pro Prägeform, im Vergleich zu dem etablierten Konzept, um eine Größenordnung geringer sind. Die Teilaspekte und Begrenzungen zur Herstellung dieser Prägeformen werden im folgenden Kapitel untersucht. Sämtliche Anlagen zur Herstellung der Prägeformen wurden im Kapitel 2 beschrieben bzw. werden im Folgenden, soweit für das Verständnis notwendig, eingeführt.

## 4.1 Konzepte und Anforderungen zur Herstellung von Quarzprägeformen

### 4.1.1 Etabliertes Konzept zur Herstellung von Quarzprägeformen

Prägeformen aus Quarz werden zurzeit kommerziell u.a. von Motorola Labs, Toppan Photomasks, NIL Technology oder vom IMS Chips in Stuttgart angeboten. Bei den Strukturen handelt es sich zumeist um regelmäßige Teststrukturen, deren minimale Strukturbreiten unter 100 nm liegen. Motorola Labs geben an, 50 nm Kontaktlöcher routinemäßig herstellen zu können und 30 nm Kontaktlöcher konnten demonstriert werden [Dau06]. Am IMS Chips in Stuttgart werden Prägeformen aus Quarz mittels hochauflösender Elektronenstrahl-Lithographie mit einer minimalen Strukturbreite von 50 nm strukturiert. Über ein kaum reproduzierbares, nachträgliches Dünnen von Quarzstrukturen wurden an anderer Stelle auch vereinzelt Strukturbreiten von 8 nm gezeigt [Vra03].

Für die Herstellung der etablierten Prägeformen werden als Ausgangsmaterial 6 Zoll Maskenblanks (Aufbau: Quarz, Cr-Schicht und Elektronenstrahllack) verwendet, wobei die Dicke des Quarzsubstrats 6,35 mm beträgt [Irm05]. Aus diesem Maskenblank werden vier Prägeformen mit einer Größe von 65·65 mm<sup>2</sup> hergestellt. Die schematische Darstellung zur Herstellung von Prägeformen nach dem etablierten Konzept ist in Abb. 4.1 gezeigt.

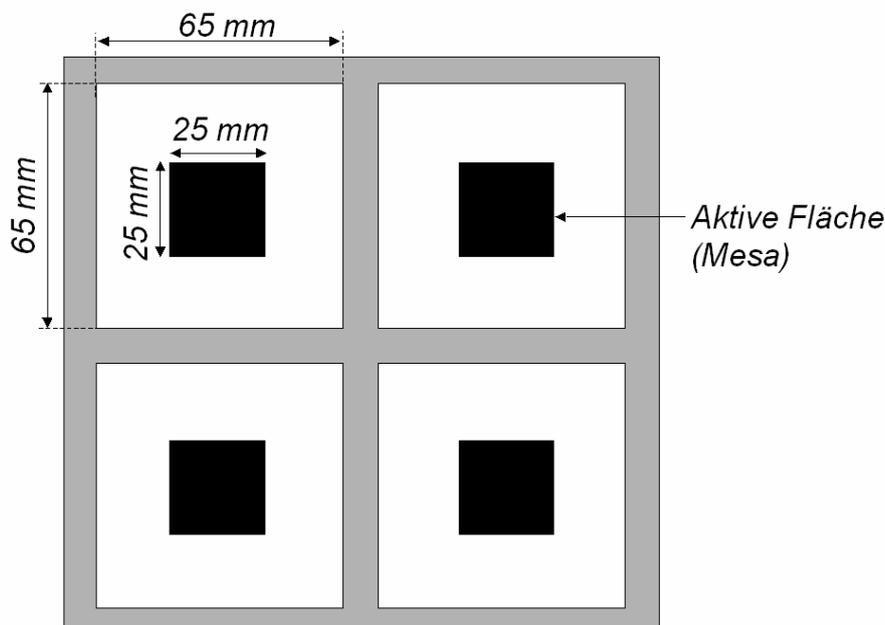


Abb. 4.1: Schematische Darstellung zur Herstellung von vier Quarzprägeformen aus einem Maskenblank

Für die Herstellung der vier Prägeformen pro Maskenblank werden zuerst mittels Elektronenstrahl-Lithografie die Strukturen der Prägeformen definiert und in die darunter liegende Chromschicht mittels RIE-Ätzverfahren übertragen. Die Größen der hierbei strukturierten aktiven Fläche betragen pro Prägeform zwischen  $12,5 \cdot 12,5 \text{ mm}^2$  und maximal  $25 \cdot 25 \text{ mm}^2$ . Nach dem Entfernen der Lackmaskierung erfolgt die Übertragung der Cr-Strukturen in das Quarzsubstrat. Im Anschluss wird die Cr-Maskierung entfernt und das Quarzsubstrat mit einem Fotolack beschichtet. Mittels Lithografie wird der Fotolack außerhalb der aktiven Flächen entfernt und der freigelegte Bereich nasschemisch etwa  $15 \text{ }\mu\text{m}$  tief geätzt. Die aktiven Flächen sind während der nasschemischen Ätzung mit Fotolack geschützt, weswegen sich diese Bereiche nach dem Entfernen der Lackmaske  $15 \text{ }\mu\text{m}$  erheben (Mesa). Die vier Prägeformen werden im Folgenden vereinzelt und deren Oberfläche mit einer Antihafschicht bedeckt. Die Kosten für eine solche Prägeform liegen bei mindestens  $5000 \text{ €}$ .

#### 4.1.2 Entwickeltes Konzept zur Herstellung von Quarzprägeformen

Um im Vergleich zum etablierten Herstellungsprozess das aufwändige Mesaätzen zu vermeiden und eine größere Anzahl an Prägeformen aus einem Quarzsubstrat zu erhalten, wurde ein neues Konzept für Quarzprägeformen und die dafür notwendigen Prozesse entwickelt. Nach diesem Konzept sollten aus einem Substrat möglichst viele Quarzprägeformen hergestellt werden, die dann auf einen  $65 \cdot 65 \text{ mm}^2$  großen Quarzhalter mittels eines UV-transparenten Schmelzklebers befestigt werden (siehe Abb. 4.2). Die Prägeformen können dann beliebig auf dem Quarzhalter ausgetauscht werden. Zusätzlich vermeidet man das Mesaätzen, da die aufgeklebte Quarzprägeform die Mesa bildet.

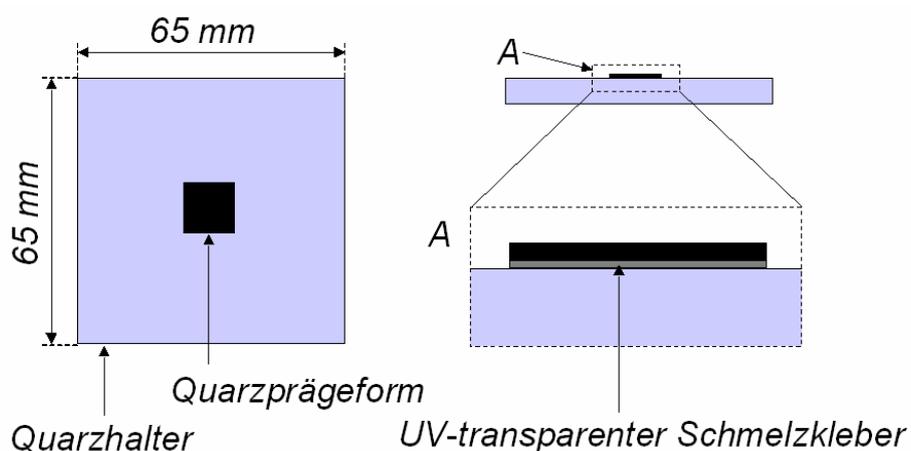


Abb. 4.2: Entwickeltes Konzept für Quarzprägeformen

Vor der Entwicklung der Prozesse zur Herstellung der Prägeformen muss ein geeignetes Quarzsubstrat gewählt werden. Die Anforderungen, die hierbei an das Substrat gestellt werden sind eine hohe Transmission bei der verwendeten Belichtungswellenlänge (notwendig zum Erreichen kurzer Aushärtezeiten), eine geringe Rauheit (resultiert in einer geringen mechanische Adhäsion zwischen ausgehärteten UV-Polymer und Prägeform, wodurch eine Partikelgeneration möglichst vermieden wird) und eine hohe Planparallelität (dies hat eine homogene Restlackschichtdicke zur Folge).

Zur Aushärtung des Prägelacks sind in der Imprintanlage UV-LEDs (LEDs: „light emitting diodes“) integriert, die bei einer Belichtungswellenlänge  $\lambda$  von 375 nm emittieren. Somit muss eine hohe Transmission  $T$  des Substrats bei dieser Wellenlänge gegeben sein, um eine schnelle Aushärtung des UV-Polymers im Kontakt mit der Prägeform sicher zu stellen. Nach einer ausführlichen Literaturrecherche wurde hierfür das hochreine Quarzsubstrat Lithosil LQ1 von Schott LithoTec als Ausgangsmaterial für die Prägeformherstellung gewählt. In Abb. 4.3 ist das Transmissionsspektrum des Materials Lithosil LQ1 in einem Wellenlängenbereich  $\lambda$  von 180 nm bis 850 nm dargestellt. Die Messung erfolgte mit dem UV/VIS/NIR Spektrometer Lambda 9 von Perkin Elmar.

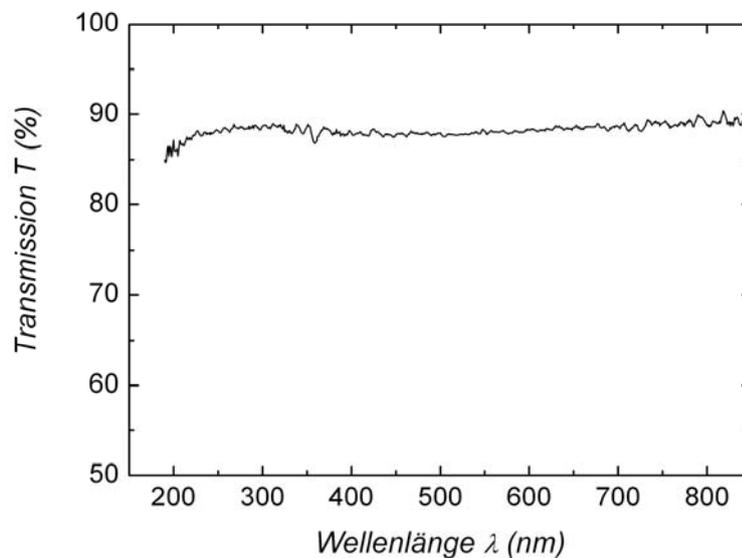


Abb. 4.3: Transmissionsspektrum des für die Prägeformherstellung verwendeten Substratmaterials Lithosil LQ1 von Schott Lithotec im Wellenlängenbereich  $\lambda$  von 180 nm bis 850 nm

Es ist zu erkennen, dass bei der Belichtungswellenlänge  $\lambda$  von 375 nm die Transmission bei etwa 88% liegt. Somit sind bei der Verwendung von LQ1 als Prägeformausgangsmaterial die

Absorptionsverluste sehr gering und eine möglichst schnelle Aushärtung des UV-Polymers ist gewährleistet.

Des Weiteren muss das Ausgangsmaterial der Prägeform eine geringe Oberflächenrauheit aufweisen, um die mechanische Verzahnung des belichteten UV-Polymers an der Prägeform während der Separation möglichst zu reduzieren. Eine mechanische Verzahnung führt zu Lackabrissen, die an der Prägeform als Partikel haften bleiben und folglich zu Prägedefekten führen. Aus diesem Grund wurde die Rauheit des Ausgangsmaterials Lithosil LQ1 auf einer Fläche von  $2,5 \cdot 2,5 \mu\text{m}^2$  mittels hochauflösender Rasterkraftmikroskopie vermessen. Vor der Messung erfolgte eine Reinigung der Probe mit einer Mischung aus 95%iger Schwefelsäure und Wasserstoffperoxid im Verhältnis von 3:1 (Carosche Säure) bei  $120^\circ\text{C}$  für 15 min. Anschließend folgte für 15 min eine Spülung mit deionisiertem Reinstwasser (DI-Wasser), das einen spezifischen Widerstand von mindestens  $18 \text{ M}\Omega\text{cm}$  besitzt. Das Oberflächenprofil der gereinigten Probe ist in Abb. 4.4 gezeigt.

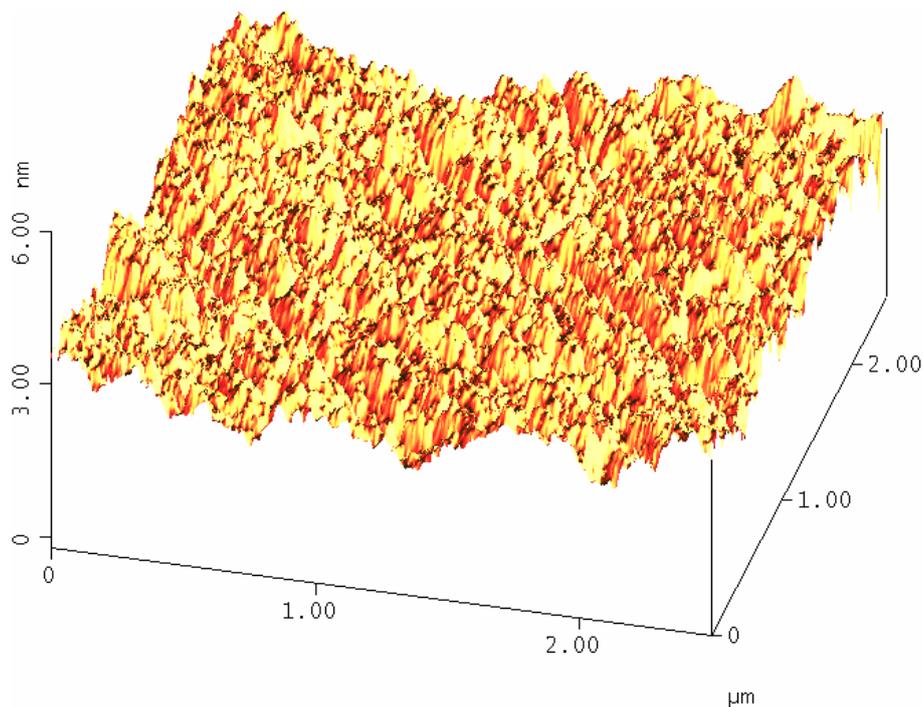


Abb. 4.4: AFM-Topografiemessung einer gereinigten Lithosil LQ1 Probe. Die Messfläche beträgt  $2,5 \cdot 2,5 \mu\text{m}^2$

Bei der Auswertung der Messdaten wurde  $R_a$  zu  $0,28 \text{ nm}$  und  $RMS$  zu  $0,36 \text{ nm}$  ermittelt, was einer sehr geringen Oberflächenrauheit entspricht. Mit dem Ergebnis zur Oberflächenrauheit stellt Lithosil LQ1 ein geeignetes Ausgangsmaterial für die Prägeformherstellung dar.

Das Quarzsubstrat selbst hat einen Durchmesser von  $150 \text{ mm}$  und eine Dicke von  $675 \mu\text{m}$  (entspricht Höhe der Mesa). Aus diesem Substrat wurden bis zu 64 Quarzprägeformen mit

einer Größe von  $12,5 \cdot 12,5 \text{ mm}^2$  hergestellt (siehe Abb. 4.5). Da mit diesem Konzept bis zu 64 Prägeformen pro Substrat hergestellt werden können und das Mesaätzen vermieden wird, kann eine entscheidende Kostenreduktion pro Prägeform im Vergleich zu dem etablierten Herstellungs-konzept erreicht werden.

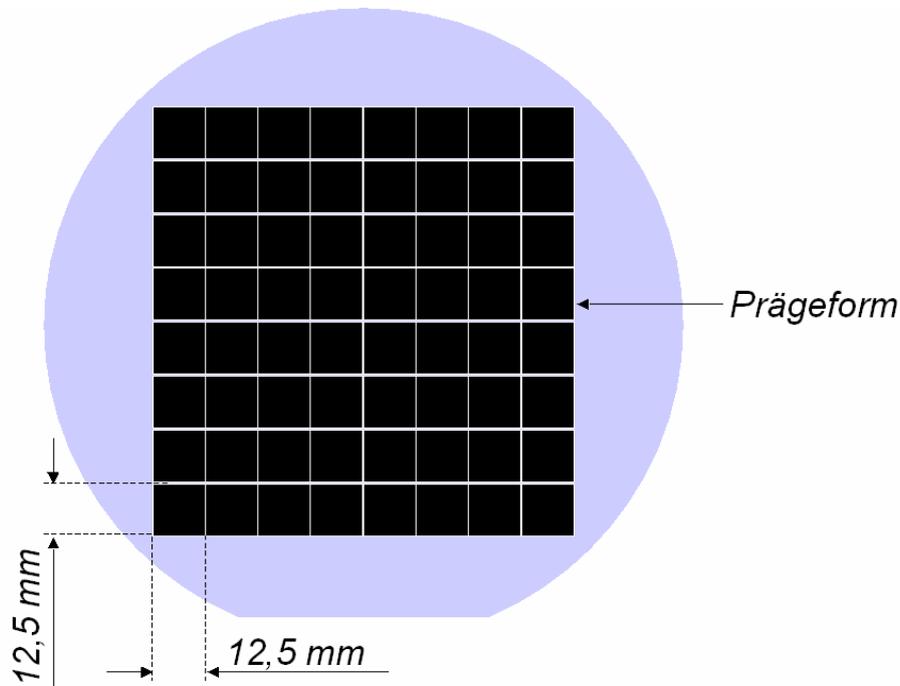


Abb. 4.5: Schematische Darstellung zur Herstellung von 64 Quarzprägeformen aus einem Quarzsubstrat mit einem Durchmesser von 150 mm

#### 4.2 Elektronenstrahlaufdampfen der Metallschichten

Das Aufbringen einer Metallschicht auf dem Quarzsubstrat ist aus zwei Gründen notwendig. Zum einen vermeidet die Metallschicht Aufladungseffekte, die bei der Belichtung des Fotolacks mit dem Elektronenstrahl auf einem Quarzsubstrat auftreten und Strukturbreiten im nm-Bereich nicht ermöglichen. Zum anderen dient die Metallschicht als Ätzmaskierung für die Quarzstrukturierung.

Um die Anforderungen an die Quarzprägeformen zu erfüllen, muss die Metallschicht auf der gesamten Fläche homogen aufgebracht sein, sowie eine Rauheit (*RMS*) geringer 1 nm aufweisen. Hierfür wurden Aufdampfprozesse an der Aufdampfanlage PLS 570 von BALZER für Cr-Schichtdicken im Bereich von 15 nm bis 30 nm mit einer Schichtdickenschwankung unter 5,8% (Randausschluss: 2 cm) entwickelt. Für die Beschichtung des Quarzsubstrates mit Chrom wurden Cr-Tabletten mit einer Reinheit höher als 99,9% mit einem Elektronenstrahl verdampft. Nach dem Öffnen der Schutzblende betrug die Aufdampftrate etwa 0,15 nm/s. Für die

Bestimmung der Rauheit der Cr-Oberfläche wurden AFM-Messungen direkt nach dem Cr-Aufdampfprozess durchgeführt. Eine typische Messung der Oberflächentopografie ist in Abb. 4.6 dargestellt.

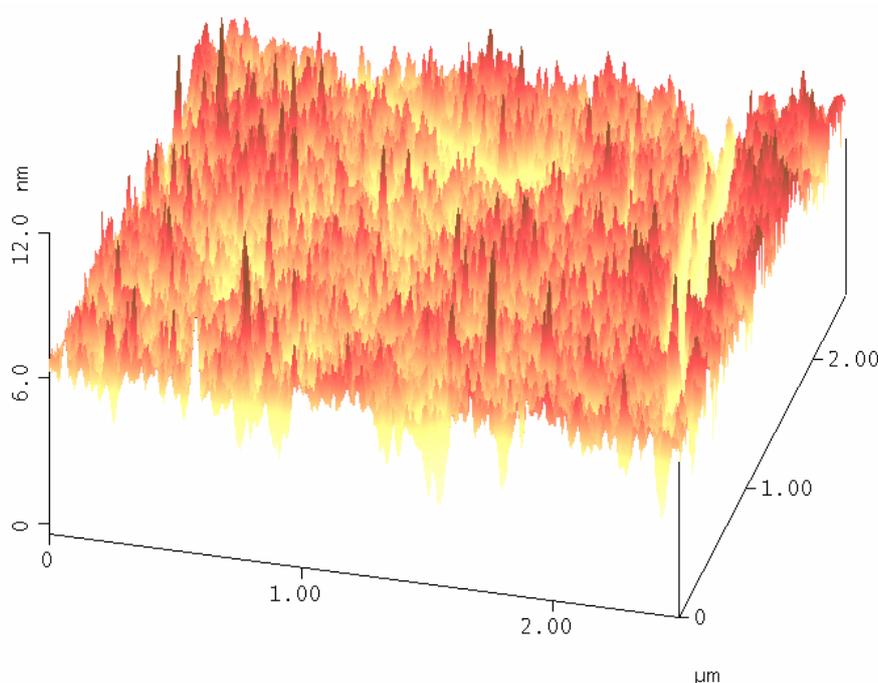


Abb. 4.6: AFM-Topografiemessung einer gedampften Cr-Oberfläche. Die Messfläche beträgt  $2,5 \cdot 2,5 \mu\text{m}^2$

Bei der Auswertung der Messdaten wurde  $R_a$  zu  $0,70 \text{ nm}$  und  $RMS$  zu  $0,95 \text{ nm}$  bestimmt, was einer geringen Oberflächenrauheit entspricht. Des Weiteren wurden Quarzsubstrate mit Titan (Ti) beschichtet. Die Dicke der Ti-Schicht betrug etwa  $30 \text{ nm}$ . Die metallisierten und im Anschluss strukturierten Quarzsubstrate dienen zur Untersuchung der Ätzbeständigkeit der beiden Metallschichten (Chrom und Titan) gegenüber dem Quarzätzprozess.

### 4.3 Strukturdefinition durch Lithografieverfahren

Für die Definition der Prägeformstrukturen wurden zwei Lithografieverfahren verwendet. Für die Erzeugung von Lackstrukturen im  $\mu\text{m}$ -Bereich wurde die optische Lithografie eingesetzt. Lackstrukturen von  $50 \text{ nm}$  bis in den  $\mu\text{m}$ -Bereich wurden extern mittels Elektronenstrahl be-  
lichtet und entwickelt.

### 4.3.1 Optische Lithografie

Die optische Lithografie wurde verwendet, um Lackstrukturen im  $\mu\text{m}$ -Bereich zu erzeugen. Konkret wurde die positive Kontaktlithografie verwendet, deren Prinzip in Kapitel 2.1.1 erläutert wurde. Im Rahmen der Arbeit wurden die Parameter für die Belichtung und für die Entwicklung des Fotolacks ausgehend von einem bereits am Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente existierenden Lithografieprozesses angepasst, um möglichst steile Lackkanten zu erhalten. Die Parameter für den Lithografieprozess wurden entsprechend Tab. 4.1 ermittelt.

Tab. 4.1: Prozessschritte und Parameter für den positiven Lithografieprozess

Prozessschritt	Einstellung
Ausheizen zur Dehydration	120°C; 30 min
Aufschleudern Fotolack	AZ 5214; 500 U/min (5 s) und 4000 U/min (30 s)
Austreiben Lösungsmittel	90°C; 60 s
Belichtung Maskenjustierer MA6	13 mW/cm <sup>2</sup> ; 4,5 s
Entwicklung	AZ MIF 726; 35 s
Spülen mit DI-Wasser	15 min

Zuerst wurden die metallisierten Quarzsubstrate bei 120°C für 30 min in einem Umluftofen ausgeheizt, um eine wasserfreie Oberfläche zu erhalten. Dies ist notwendig, um eine ausreichende Haftung des Fotolacks auf dem Substrat zu erreichen. Das Aufbringen des Fotolacks (AZ 5214) erfolgte mittels einer Handlackschleuder, wobei in den ersten 5 s 5 ml Lack bei 500 U/min in die Mitte des Substrats dosiert wurde und in den anschließenden 30 s die Schichtdicke über die Umdrehungszahl (4000 U/min) eingestellt wurde. Anschließend wurde das Lösungsmittel aus dem Fotolack auf einer Heizplatte bei 90°C für 60 s ausgetrieben. Die Belichtung des Fotolacks erfolgte mit dem Maskenjustierer MA6 von SUSS MicroTec. Die Belichtungsleistung betrug 13 mW/cm<sup>2</sup> und die Belichtungsdauer 4,5 s. Nach der Belichtung wurden die belichteten Bereiche des Fotolacks im metallionenfreien Entwickler AZ MIF726 herausgelöst, wobei die Entwicklungszeit 35 s betragen hat. Der Entwicklung folgte eine DI-Wasser Spülung für 15 min.

Mittels dieses Verfahrens wurden durch die ganzflächige Positivbelichtung kostengünstig zahlreiche metallisierte Quarzsubstrate strukturiert. Diese sind für die Optimierung der Cr-, Ti- und Quarzätzprozesse zum Einsatz gekommen.

### 4.3.2 Elektronenstrahl-Lithografie

Durch immer verbesserte Elektronenstrahlbelichter und weiterentwickelte Lackssysteme werden die mittels Elektronenstrahl-Lithografie erreichbaren minimalen Strukturbreiten stetig reduziert. Da zum Zeitpunkt der Arbeit kein Elektronenstrahlbelichter zur Verfügung stand, wurden extern mittels Elektronenstrahl geeignete Lackstrukturen im nm-Bereich auf Quarzsubstrate, die mit einer Cr-Schicht bedeckt waren, sowohl belichtet als auch entwickelt. Die Strukturen dienten sowohl zur Entwicklung von Ätzprozessen im nm-Bereich, als auch, nach Abschluss der Prozessentwicklung, als Prägeformen für die UV-NIL.

## 4.4 Strukturierung durch reaktives Ionenätzen

Zur maßhaltigen Strukturübertragung der lithografisch erzeugten Strukturen wurden nasschemische und ICP RIE-Ätzprozesse untersucht. Für die ICP RIE-Untersuchungen wurden die Lackstrukturen in die Cr- bzw. Ti-Schichten mit einer Mischung der Ätzgase Chlor und Sauerstoff bzw. nur mit Chlor und anschließend in Quarz mit einer Mischung aus Octafluorbutylen ( $C_4F_8$ ) und Sauerstoff übertragen. Um den Einfluss von Ablagerungen und Restgasen in der Ätzkammer zu minimieren, wurde vor jedem Ätzprozess die Prozesskammer mit einem  $O_2/Ar$  Plasma gereinigt. Bei den Ätzprozessen wurde besonderes Augenmerk auf eine hohe Selektivität zwischen dem zu ätzenden Material und der verwendeten Maske, eine hohe Anisotropie, eine geringe Rauheit des geätzten Materials, sowie eine ausreichend hohe Ätzrate gelegt. Um dies zu erreichen wurden die Einflüsse der Prozessparameter wie die über die Spule in das Plasma eingekoppelte Hochfrequenzleistung (HF-Leistung), die sich ausbildende Vorspannung zwischen Plasma und Substrat („Self-BIAS“), Gasfluss und Gasgemisch, Arbeitsdruck und Temperatur der Substratauflage mit Blick auf die Anforderungen an eine optimale Quarzprägeform (vgl. Kapitel 2.1.3) untersucht.

### 4.4.1 Maskenauswahl für den Quarzätzprozess

Bei der Auswahl einer geeigneten Ätzmaske für den Quarzätzprozess wurden Cr und Ti untersucht, wobei folgende Aspekte berücksichtigt wurden:

- Die Ätzmaske muss homogen auf dem Quarzsubstrat aufgebracht werden können, um eine gleichmäßige Strukturierung der Maske sicher zu stellen. Dies wurde bereits in Kapitel 4.2 gezeigt.

- Die Selektivität (Verhältnis aus Substratätzrate zu Maskenätzrate, vgl. Kapitel 2.2) muss sehr viel größer als 1 sein, um eine dünne Maskenschichtdicke einsetzen zu können. Dies ist eine wesentliche Bedingung für eine maßhaltige Strukturübertragung in das Quarzsubstrat.
- Das Maskenmaterial muss nach dem Quarzätzprozess rückstandsfrei entfernbar sein, um Defekte und Kontaminationen beim späteren Prägevorgang zu vermeiden.

Die Selektivität der Metallhartmaske während des Quarzätzprozesses ist für eine maßhaltig Strukturübertragung mit einer definierten Äztiefe in Quarz entscheidend. Ist eine geringe Selektivität gegeben, so ist für den Quarzätzprozess eine relativ dicke Maskenschichtdicke notwendig. Dies zieht Abschattungseffekte beim Ätzprozess nach sich, was die Ausbildung eines idealen Ätzgrabens mit senkrechten Kanten verhindern kann. Sind die Flanken der Maske zusätzlich auf Grund ihrer Strukturierung nicht senkrecht, so wird dieses nicht-ideale Profil in das Substrat übertragen. Dabei kommt es zu einer Strukturweitenänderung, wodurch die Maßhaltigkeit der Strukturübertragung nicht mehr gegeben ist. Daher ist es notwendig ein Maskenmaterial auszuwählen, welches eine hohe Selektivität gegenüber dem Quarzätzprozess aufweist, da nur dann die Schichtdicke des Maskenmaterials sehr dünn gehalten werden kann und oben genannte limitierende Faktoren vermieden werden können.

Um eine Auswahl zwischen Cr und Ti als Maskenmaterial treffen zu können, wurden Quarzstücke, die mit einer strukturierten Cr- bzw. Ti-Maske bedeckt waren, jeweils mit acht verschiedenen Quarzätzparametereinstellungen (siehe Tab. 4.2) in einem ICP RIE-Reaktor (siehe Kapitel 2.2.1) geätzt.

Tab. 4.2: Darstellung der 8 Quarzätzparametereinstellungen, mit denen die Cr- und Ti-strukturierten Quarzstücke geätzt wurden

Quarzätzparametereinstellung	1	2	3	4	5	6	7	8
Temperatur Probenaufgabe (°C)	20	20	20	20	20	20	0	0
Flussrate C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> (sccm)	39	39	39	39	10	20	39	20
Prozessdruck (mTorr)	5	5	5	5	5	5	5	3
HF-Leistung (W)	600	800	600	600	600	600	600	800
„Self-BIAS“ (V)	50	50	200	100	50	50	50	50

Zur Bestimmung der Selektivität müssen die Substrat- und Maskenätzraten ermittelt werden. Hierfür wurde zuerst mit dem Stufenhöhenmessgerät die Dicke  $d_{Maske}$  der strukturierten Cr-

bzw. Ti-Maskierungsschicht an drei verschiedenen Stellen bestimmt. Nach dem Quarzätzprozess mit der Ätzzeit  $t_{\text{Ätz}}$  wurde die Stufenhöhe an drei verschiedenen Ätzgräben mit der Maskierungsschicht ( $d_{\text{Ätz1}}$ ) und (nach der Reinigung des Substrats) ohne Maskierungsschicht ( $d_{\text{Ätz2}}$ ) gemessen. Die Substratätzrate  $r_{\text{Substrat}}$  ergibt sich dann zu:

$$r_{\text{Substrat}} = \frac{2d_{\text{Ätz1}} - d_{\text{Ätz2}} - d_{\text{Maske}}}{t_{\text{Ätz}}}, \quad (4.1)$$

und die Maskenätzrate  $r_{\text{Maske}}$  ergibt sich zu:

$$r_{\text{Maske}} = \frac{d_{\text{Maske}} - (d_{\text{Ätz1}} - d_{\text{Ätz2}})}{t_{\text{Ätz}}}. \quad (4.2)$$

Bei der Auswertung der Selektivität  $S$  nach Gl. (2.7) zeigte sich, dass  $S$  für die 8 Quarzätzparametereinstellung von Tab. 4.2 für die Cr-Maskierung stets größer war als für die Ti-Maskierung (siehe Abb. 4.7).

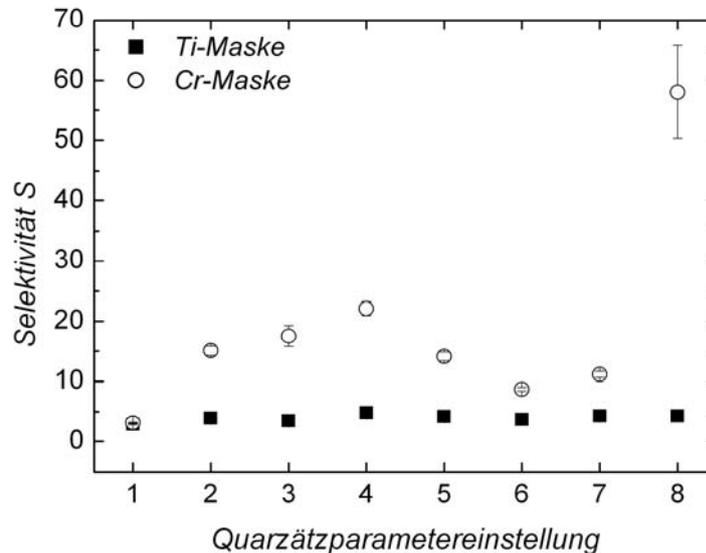


Abb. 4.7: Bestimmung der Selektivität der Cr- und Titanmaskierung für die acht Quarzätzparametereinstellungen nach Tab. 4.2. Für die Untersuchung wurden je acht Quarzproben mit Chrom bzw. Titan als Maske verwendet

So betrug z.B. für die Quarzätzparametereinstellung Nummer 8 die Selektivität der Cr-Maskierung etwa 58, während die Selektivität der Ti-Maskierung bei etwa 4,3 gelegen hat. Auf Grund dieser Ergebnisse wurde im Folgenden der Fokus auf die Verwendung von Chrom als

Maskierung für den Quarzätzprozess gelegt. Für die Untersuchungen zur Vorauswahl des Maskenmaterials für den Quarzätzprozess waren weder die Parameter für das Maskenätzen, noch für das Quarzätzen optimiert. Die Optimierung dieser Parameter wird in den folgenden Kapiteln detailliert beschrieben.

#### 4.4.2 Optimierung der Chromstrukturierung

Die Strukturierung der Cr-Schicht erfolgte mittels einer Lackmaske. Hierbei müssen möglichst steile Cr-Flanken realisiert und eine Unterätzung des Fotolacks während des Chromätzschrittes vermieden werden. Des Weiteren darf die Cr-Kante auf der Quarzoberfläche nach dem Ätzschritt nur eine geringe Rauheit („line edge roughness“) aufweisen. Eine hohe Rauheit entlang dieser Kante wird z.B. durch eine Korngrenzenätzung verursacht. Bei einer zu rauen Kante kommt es zu Strukturbreitenvariationen, welche z.B. die elektrischen Eigenschaften von Bauelementen beeinflussen. Bei der Optimierung der Ätzparameter zur Cr-Strukturierung wurde daher der Einfluss der Ätzparameter auf die Rauheit und die Steilheit der Cr-Kante untersucht. Für die Cr-Strukturierung wurden zwei Ätzverfahren verglichen, die nasschemische und die ICP RIE-Ätzung. Nasschemisch wurde das Chrom mit einer Mischung aus 200 g Ammoniumcer(IV)-nitrat, 35 ml 98%iger Essigsäure und 1000 ml DI-Wasser bei Raumtemperatur geätzt [WWW5], dem ein sofortiges Spülen für 15 min in DI-Wasser folgte. Anschließend wurde die Probe gereinigt, indem die Lackmaske mit Caroscher Säure bei 120°C für 15 min entfernt und noch einmal für 15 min mit DI-Wasser gespült wurde. Die nachfolgende Topografiemessung mittels AFM ist in Abb. 4.8 dargestellt.

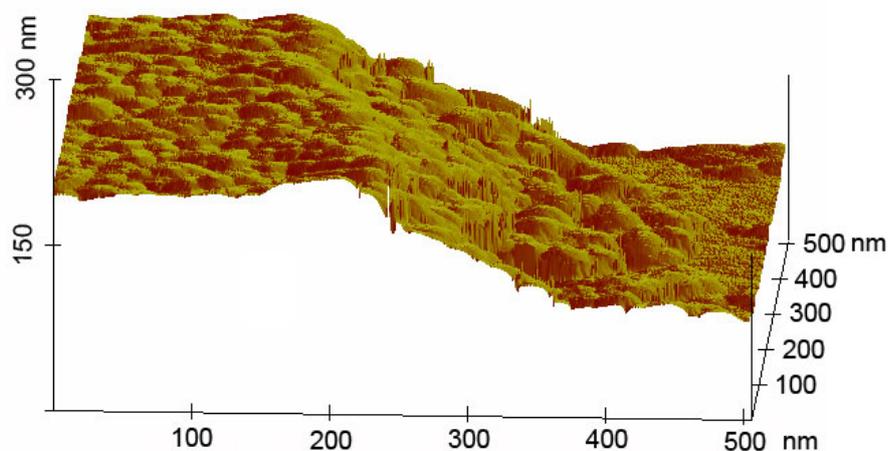


Abb. 4.8: AFM-Topografiemessung einer typischen Cr-Flanke auf einem Quarzsubstrat nach einer nasschemischen Cr-Ätzung

Der rechte, tiefergelegene Teil der Abbildung zeigt die Quarzoberfläche, zur linken Seite steigt die Cr-Flanke an. Im Übergangsbereich zwischen Quarz und Chrom sind deutlich Körner zu erkennen, die in einer hohen Rauheit der geätzten Cr-Kante resultieren. Des Weiteren beträgt die Flankensteilheit der Cr-Flanke etwa  $24^\circ$ . Auf Grund der Kantenrauheit und der geringen Flankensteilheit sind nasschemisch geätzte Cr-Strukturen als Ätzmaske für den Quarzätzprozess ungeeignet.

Um den Strukturierungsprozess für das Chrom zu optimieren, wurden im Rahmen der Arbeit ICP RIE-Prozesse mit dem Ziel entwickelt, geringe Kantenrauheiten und möglichst steile Flanken zu erhalten. Hierbei wurden die Parameter Ätzgaszusammensetzung, Prozessdruck, HF-Leistung und „Self-BIAS“-Spannung variiert (siehe Tab. 4.3). Nach der Auswertung der Ätzergebnisse zeigte sich, dass bei einem Prozessdruck von 20 mTorr die Cr-Ätzrate am höchsten und die Cr-Flanken am steilsten sind. Für den Cr-Ätzprozess wurden nach der Optimierung die Parameter aus Tab. 4.3 ermittelt.

Neben den in Tab. 4.3 angegebenen optimierten Einstellungen für den Cr-Ätzprozess zeigte sich, dass die Überätzung während der Cr-Strukturierung einen großen Einfluss auf das Cr-Profil hat. Um diesen Einfluss näher zu untersuchen wurden zwei Quarzscheiben, die beide mit Chrom und mittels Elektronenstrahl-Lithografie strukturiertem Lack bedeckt waren, dem oben genannten Cr-Ätzprozess ausgesetzt.

Tab. 4.3: Parameter und Werte für die Optimierung des Chrom ICP RIE-Prozesses. Verwendete Ätzanlage: ASE von STS (siehe Kapitel 2.2.1)

Parameter	Optimale Werte	Wertebereich für die Optimierung
Temperatur Probenaufgabe ( $^\circ\text{C}$ )	20	
Flussrate Chlor (sccm)	20	10 - 28
Flussrate Sauerstoff (sccm)	4	0 - 5
Prozessdruck (mTorr)	20	2 - 20
HF-Leistung (W)	600	600 - 750
„Self-BIAS“ (V)	5	2,5 - 100

Hierbei wurde die Scheibe 1 70% und die Scheibe 2 115% überätzt. Die minimale Grabenbreite der Lackstrukturen auf den zwei Scheiben betrug vor dem Cr-Ätzprozess 50 nm und die minimale Stegbreite zwischen den Gräben betrug 100 nm. Nach dem Cr-Ätzprozess wurde die Lackmaske mit Caroscher Säure bei  $120^\circ\text{C}$  für 15 min entfernt, die Scheiben für 15 min in DI-

Wasser gespült und Topografiemessungen an den geätzten Cr-Strukturen mittels AFM durchgeführt.

In Abb. 4.9 oben ist eine typische AFM-Topografiemessung von nominell 50 nm breiten Gräben, die durch 100 nm breite Cr-Stege getrennt sind, für die Scheibe 1 (70% Überätzung) gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Gräben in ihrer Breite stark schwanken. In Abb. 4.9 unten ist das Profil von A nach B aus Abb. 4.9 oben dargestellt. Der linke tiefer gelegene Teil des Profils zeigt die Quarzoberfläche und der rechte erhabene Teil die Cr-Maske. Der Cr-Flankenwinkel wurde zu  $35^\circ$  bestimmt, was für die nachfolgende Quarzstrukturierung nicht optimal ist.

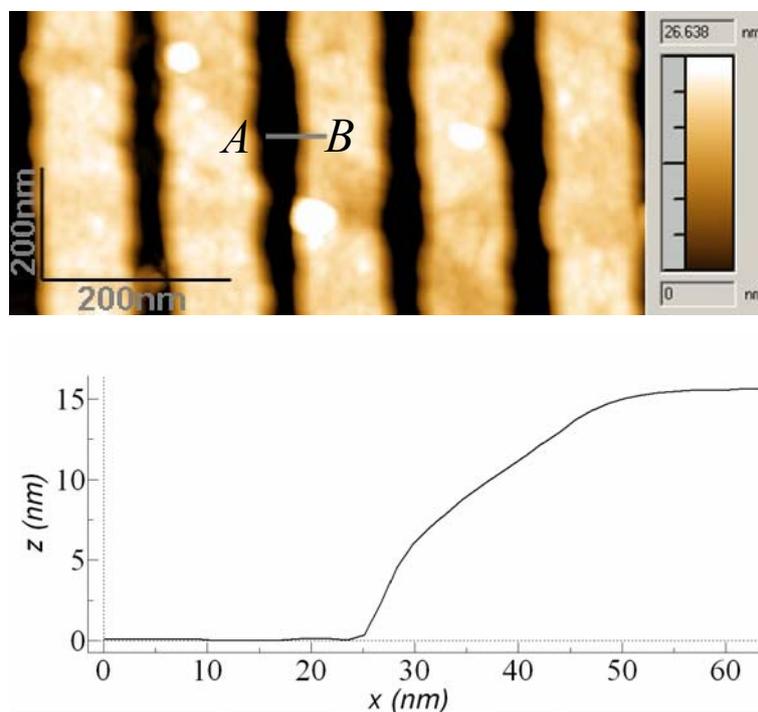


Abb. 4.9: AFM-Topografiemessung von ICP RIE strukturierten Cr-Stege auf Quarz, die 70% überätzt wurden (oben). Die Cr-Stege haben eine nominelle Breite von 100 nm und die Breite der Zwischenräume beträgt 50 nm. Das Profil von A nach B entlang einer Cr-Flanke ist in der Abbildung unten dargestellt

In Abb. 4.10 oben ist eine typische AFM-Topografiemessung der nominell 50 nm breiten Gräben, die durch 100 nm breite Cr-Stege getrennt sind, für die Scheibe 2 (115% Überätzung) gezeigt. Es sind keine Körner entlang der Kanten zu erkennen. In Abb. 4.10 unten links ist das Profil von A nach B aus der Abb. 4.10 oben dargestellt, das einen Cr-Flankenwinkel von etwa  $80^\circ$  zeigt. In Abb. 4.10 unten rechts ist das Profil von C nach D aus der Abb. 4.10 oben dargestellt. Die ermittelten Breiten von etwa 50 nm für den Graben und etwa 100 nm für den Steg entsprechen den Dimensionen nach der Elektronenstrahl-Lithografie. Somit ist der hier opti-

mierte Cr-Ätzprozess für Strukturbreiten ab 50 nm als Maskierungsschicht für den nachfolgenden Quarzätzprozess optimal. Die lange Überätzung ist darin begründet, dass Strukturen mit kleinen Strukturbreiten in der Regel langsamer geätzt werden, als Strukturen mit einer größeren Breite [Got92]. Da das Durchätzen der größeren Strukturbreiten optisch zuerst detektiert wird, ist diese lange Überätzung für die kleineren Strukturbreiten notwendig.

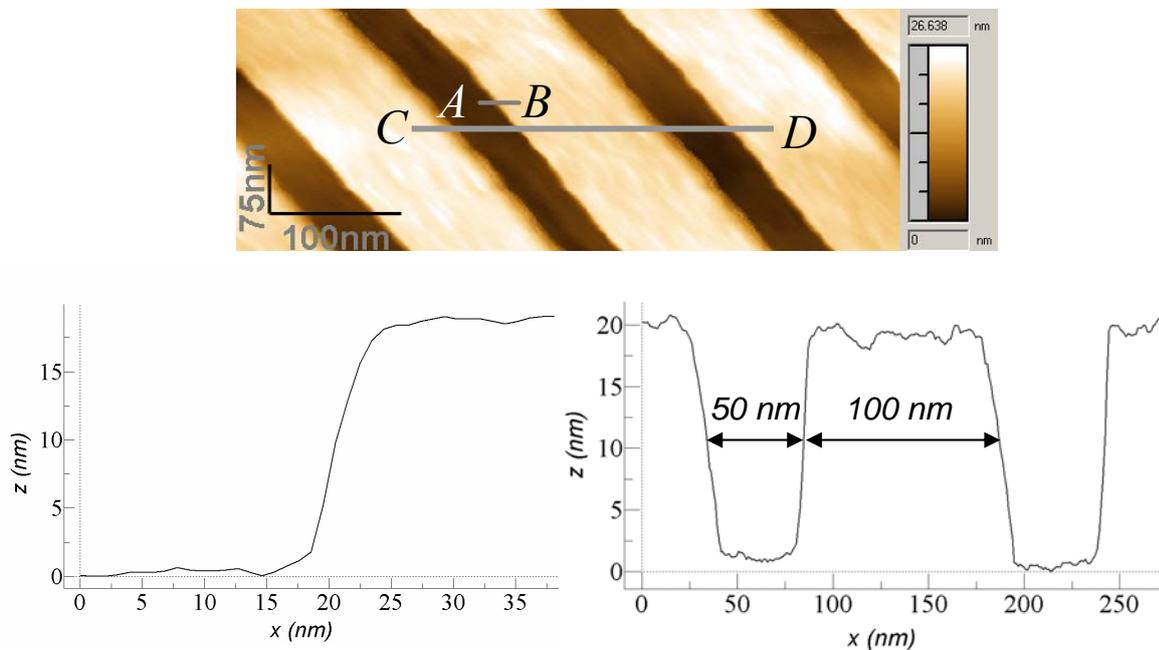


Abb. 4.10: AFM-Topografiemessung von ICP RIE strukturierten Cr-Stege auf Quarz, die 115% überätzt wurden (oben). Die Cr-Stege haben eine nominelle Breite von 100 nm und die Breite der Zwischenräume beträgt 50 nm. Das Profil von A nach B entlang einer Cr-Flanke ist in der Abbildung unten links und das Profil von C nach D entlang zweier Vertiefungen und einem Cr-Steg ist in der Abbildung unten rechts dargestellt

#### 4.4.3 Optimierung der Quarzstrukturierung

Nach der im vorherigen Kapitel beschriebenen Optimierung der Strukturierung der Cr-Maske für Strukturbreiten von 50 nm bis in den  $\mu\text{m}$ -Bereich beschäftigt sich der Hauptteil dieses Kapitels mit der Optimierung des Quarzätzprozesses zur Herstellung von Prägeformen. Für die Untersuchungen wurden Cr-strukturierte Quarzsubstrate mit einem Durchmesser von 150 mm in 12,5·12,5 mm<sup>2</sup> große Stücke gesägt und einzeln geätzt. Somit standen bis zu 64 Prägeformen pro Quarzsubstrat zur Verfügung (siehe Kapitel 4.1.2), mit denen der Quarzätzprozess optimiert wurde. Der Fokus bei der Optimierung wurde hierbei auf folgende Schwerpunkte gelegt:

- Hohe Selektivität der Cr-Maskierung gegenüber dem Quarzätzprozess.
- Hohe Ätzrate.
- Geringe Rauheit der geätzten Quarzoberfläche.
- Rechteckige Quarzprofile.
- Hohe Maßhaltigkeit der Strukturübertragung.

Für den Quarzätzprozess hat die Selektivität (siehe Gl. (2.7)), wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, einen entscheidenden Einfluss auf die Maßhaltigkeit der Strukturübertragung und auf die Ausbildung von senkrechten Kanten. Des Weiteren ist eine hohe Ätzrate notwendig, will man die Kosten für die Prozesszeiten der ICP RIE-Anlage möglichst gering halten. Zur Bestimmung der optimalen Quarzätzparametereinstellungen wurden Experimente mit dem Ziel durchgeführt, die Einflüsse der Ätzparameter auf Selektivität, Ätzrate, Oberflächenrauheit und Profil zu untersuchen. Der Fokus lag hier auf dem Erreichen einer möglichst hohen Selektivität bei zugleich einer ausreichend hohen Ätzrate von über 100 nm/min. Zusätzlich wurden Querschnitte ausgewählter Proben mittels REM, sowie Oberflächenrauheiten mittels AFM untersucht. Die Präparation der Querschnitte für die REM-Untersuchungen erfolgte in der Ionenstrahlanlage „FEI 800 Single Beam“ und in der Elektronen- und Ionenstrahlanlage „FEI 620 Dual Beam“. Die Erzeugung des fokussierten Ionenstrahls (FIB: „Focused Ion Beam“) erfolgte für beide Systeme aus einer Galliumflüssigmetallquelle. Für die Präparation des Querschnitts wurde zuerst mit dem Elektronenstrahl eine etwa 70 nm dicke Platinschutzschicht in der Anlage „FEI 620 Dual Beam“ über den zu untersuchenden Strukturen abgeschieden. Darüber wurde mittels fokussierender Ionenstrahlen in der Anlage „FEI 800 Single Beam“ eine mehrere  $\mu\text{m}$  dicke Platinschicht deponiert. Die Platinabscheidung basiert auf der Verwendung einer Ausgangschemikalie, die im gasförmigen Zustand über Einlasssysteme lokal an die Probenoberfläche herangeleitet wird und in Kombination mit dem Ionen- oder Elektronenstrahl für die Deposition sorgt [Leh05]. Der zweistufige Abscheidungsprozess der Platinschicht ist notwendig, da die Abscheidung von Platin mittels FIB zu zahlreichen Strahlenschäden auf Grund der Implantation von Galliumionen in die oberflächennahen Bereichen führt. Um die zu untersuchenden Strukturen vor diesen Schädigungen zu schützen, wurde zuerst eine Platinschicht mit dem Elektronenstrahl abgeschieden. Für die weitere Präparation des Querschnitts wurde mit dem fokussierten Ionenstrahl mittels Sputtererosion solange Material abgetragen, bis die durch die Platinschicht geschützten Strukturen in dem zu untersuchenden Bereich freigelegt waren. Die Strukturen wurden darauf in einem REM analysiert. Hierfür

wurde die Probe entsprechend gekippt, damit die freigelegten Strukturen für die Anlage „sichtbar“ sind.

#### *Bestimmung der wichtigsten Quarzätzparameter*

Für die Optimierung des Quarzätzprozesses wurden die Parameter, bis auf den Prozessdruck, ausgehend von den in Tab. 4.4 angegebenen Einstellungen variiert und die entsprechenden Auswirkungen auf das Ätzresultat ermittelt. Die Startwerte ergaben sich aus den Erfahrungen, die bei der Auswahl des Maskenmaterials für den Quarzätzprozess gesammelt wurden (vgl. Kapitel 4.4.1). Für die Untersuchungen zur Bestimmung der wichtigsten Parameter sollten mit einer möglichst geringen Anzahl an Experimenten die prinzipiellen Einflüsse der Ätzparameter auf das Ätzresultat geklärt werden.

*Tab. 4.4: Parameter und Werte für die Bestimmung der wichtigsten Quarzätzparameter. Verwendete Ätzanlage: ASE von STS (siehe Kapitel 2.2.1)*

<b>Parameter</b>	<b>Einstellung</b>	<b>Wertebereich für die Optimierung</b>
Temperatur Probenauflage (°C)	0,5	0,5 – 30
Flussrate C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> (sccm)	20	10 – 39
Flussrate Sauerstoff (sccm)	0	0 – 45
Prozessdruck (mTorr)	3	
HF-Leistung (W)	800	600 – 1000
„Self-BIAS“ (V)	150	50 – 250

Abb. 4.11 zeigt die Abhängigkeit der Quarzätzrate und der Selektivität von der HF-Leistung  $P_s$ . Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender HF-Leistung die Quarzätzrate steigt. Dies ist eine Folge der steigenden Anzahl an reaktiven Teilchen im Plasma (Ionisationsdichte), die für den Ätzprozess zur Verfügung stehen. Dagegen ist für die Selektivität ein Maximum von etwa 35 bei einer Spulenleistung von 700 W zu erkennen. Die Quarzätzrate liegt für diese Einstellung bei 245 nm/min. Der Messfehler bei der Bestimmung der Quarzätzrate beträgt unter 1%, weswegen dieser nicht in dieser und in den folgenden Abbildungen dargestellt ist. Als weiterer Parameter wurde die Temperatur der Substrataufgabe im Bereich von 0,5°C bis 30°C variiert (siehe Abb. 4.12).

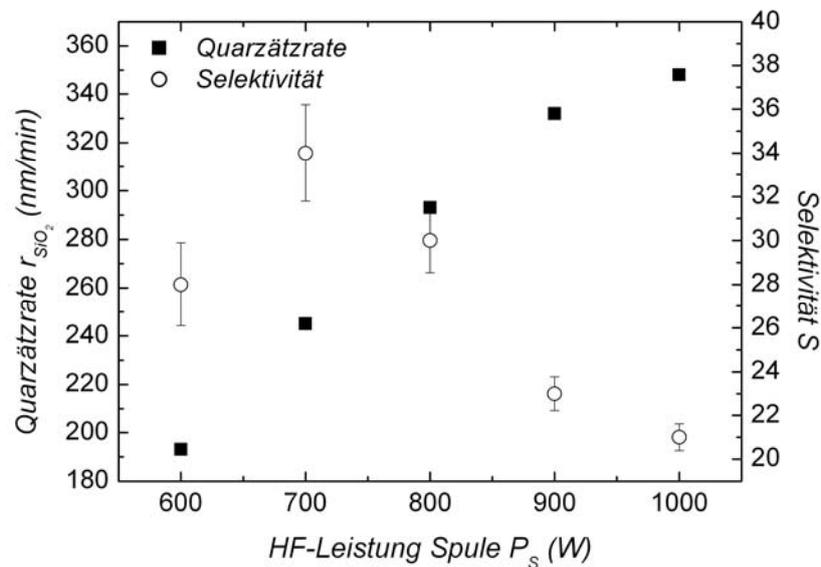


Abb. 4.11: Abhängigkeit der Quarzätzrate und der Selektivität von der über die Spule in das Plasma eingekoppelten HF-Leistung. Die weiteren Ätzparameter entsprechen den Einstellungen in Tab. 4.4

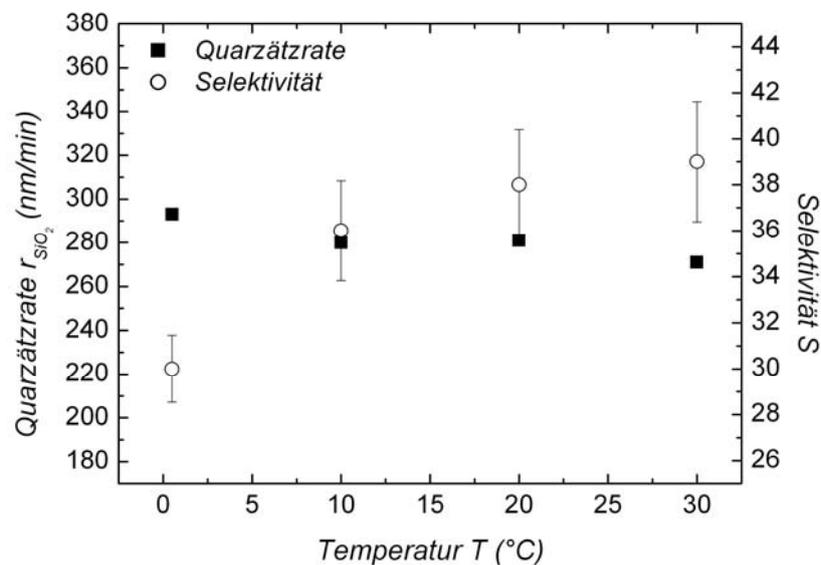


Abb. 4.12: Abhängigkeit der Quarzätzrate und der Selektivität von der Temperatur der Substratauflage. Die weiteren Ätzparameter entsprechen den Einstellungen in Tab. 4.4

Es ist zu erkennen, dass die Quarzätzrate mit steigender Temperatur geringfügig abnimmt, dagegen die Selektivität zwischen 0,5°C und 30°C um 30% steigt. Die Abnahme der Quarzätzrate mit steigender Temperatur spricht gegen einen chemischen Ätzprozess. Bei rein chemi-

schen Ätzprozessen steigt die Ätzrate mit steigender Temperatur nach Gl. (2.9) an. Somit wird der Ätzprozess maßgeblich durch physikalisches Ätzen beeinflusst. Die Untersuchung des für das physikalische Ätzen maßgeblichen Parameters, die „Self-BIAS“, erfolgt im weiteren Verlauf dieses Kapitels.

Eine Beimischung von Sauerstoff zu dem Ätzgas  $C_4F_8$  verändert in einem hohen Grad die Ätzgaszusammensetzung. In einem reinen  $C_4F_8$ -Plasma bilden sich hauptsächlich polymerbildende Spezies, die sich auf der mit Cr strukturierten Quarzprobe abscheiden. Die abgeschiedene Polymerschicht wird bei einem reinen  $C_4F_8$ -Plasma nur durch den Quarzätzprozess und durch Ionensputterprozesse aufgebraucht. Eine Zugabe von Sauerstoff zu dem Ätzgas bewirkt eine zusätzliche Ätzung der sich permanent abscheidenden Polymerschicht. Somit kann die Dicke der Polymerschicht und in dessen Folge die maximale Anzahl an Edukten eingestellt werden. Des Weiteren oxidiert der Sauerstoff im Plasma die polymerbildenden, für den Ätzangriff verantwortlichen  $CF_n$ -Verbindungen, die aus dem Ätzgas  $C_4F_8$  gebildet werden, zu nicht-ätzenden  $C_xO_y$ -Verbindungen und zu ätzendem Fluor. Im Rahmen der Untersuchungen ergab sich durch die Zugabe von Sauerstoff eine Verringerung der Ätzrate (siehe Abb. 4.13). Die Selektivität steigt, wie in Abb. 4.13 gezeigt, bis zu einer Sauerstoffflussrate von 15 sccm an und fällt dann im Bereich hoher Sauerstoffflussraten sehr stark ab.

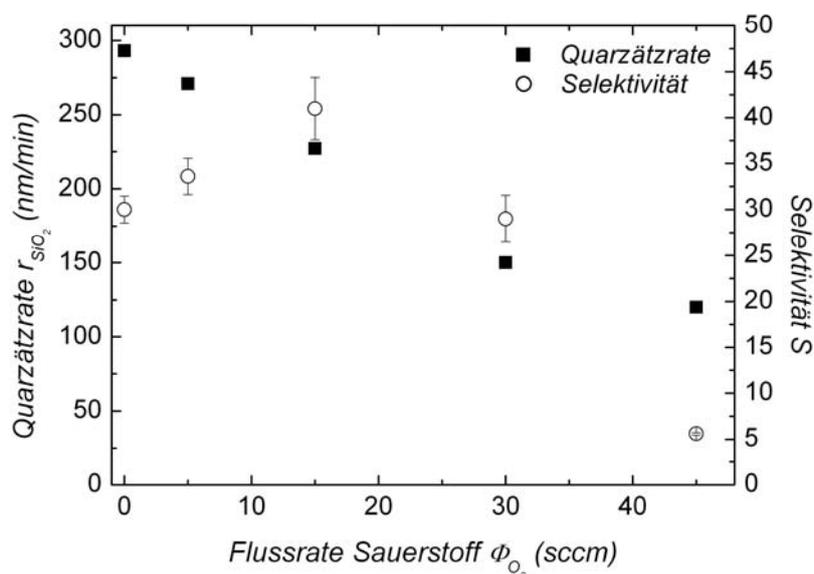


Abb. 4.13: Abhängigkeit der Quarzätzrate und der Selektivität vom Sauerstoffflussrate. Die weiteren Ätzparameter entsprechen den Einstellungen in Tab. 4.4

Die starke Reduzierung der Selektivität für Sauerstoffflussraten größer als 30 sccm wird durch die sinkende Quarzätzrate und die stark steigende Cr-Ätzrate verursacht. Der starke Anstieg in der Cr-Ätzrate wird durch eine dünnere Polymerschichtdicke begünstigt. Durch die

Reduzierung der Polymerdicke wird zum einen die Oxidation von Cr zu dem weniger stabilen Cr-Oxid leichter ermöglicht und zum anderen bietet sie einen geringeren Schutz vor dem physikalischen Ätzangriff [Mat01]. Insgesamt erhält man für eine Sauerstoffflussrate von 15 sccm die höchste Selektivität von etwa 40, bei einer hohen Quarzätzrate von etwa 225 nm/min.

Für den untersuchten Bereich der Sauerstoffflussraten (0 sccm bis 45 sccm) wurden nach dem Ätzprozess zusätzlich Rauheitsmessungen in den geätzten Gebieten durchgeführt. Die Ergebnisse hierzu sind in Abb. 4.14 dargestellt.

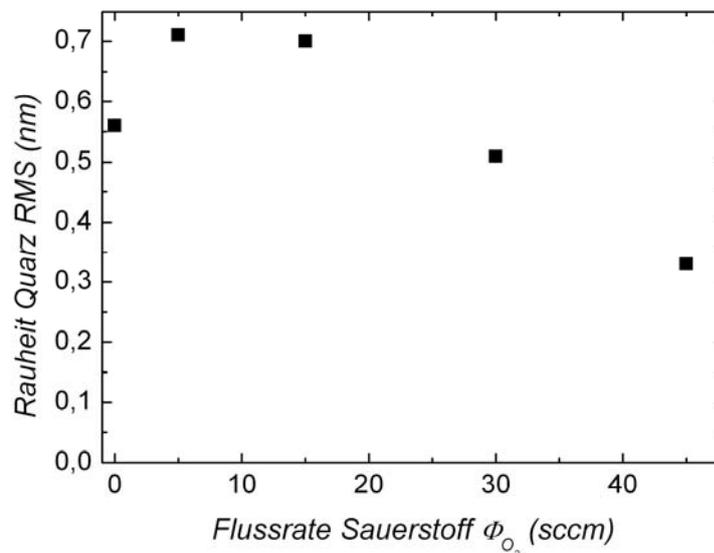


Abb. 4.14: Abhängigkeit der Rauheit von der Sauerstoffflussrate. Die weiteren Ätzparameter entsprechen den Einstellungen in Tab. 4.4

Es zeigt sich, dass die RMS Rauheit mit steigender Sauerstoffflussrate von 0,57 nm bei 0 sccm auf 0,7 nm bei 5 sccm leicht ansteigt, um dann auf 0,33 nm bei 45 sccm abzufallen. Die geringe Rauheit bei der höchsten Sauerstoffflussrate wird durch die Verringerung der Polymerschichtdicke verursacht. Hierdurch ist die Quarzoberfläche weniger stark vor dem physikalischen Ätzen geschützt.

Weiterhin beeinflusst die Sauerstoffflussrate das Ätzprofil, so wie es die REM-Aufnahmen in Abb. 4.15 deutlich zeigen. Hier bewirkt ein zu hoher Sauerstoffanteil in der Ätzgasmischung (siehe Abb. 4.15 oben), dass sich keine senkrechten Quarzflanken ausbilden. Dagegen führt eine Sauerstoffflussrate von 0 sccm (siehe Abb. 4.15 unten) zu senkrechten Flanken. Die nicht senkrechten Flanken bei zu hohem Sauerstofffluss werden durch die stark reduzierte Anzahl an polymerbildenden Spezies verursacht, welche eine effektive Seitenwandpassivierung nicht ermöglichen. Die Ätzung erfolgt in diesem Fall verstärkt chemisch durch das von dem Ätzgas  $C_4F_8$  durch die Sauerstoffoxidation freigesetzte Fluor, wovon Quarz spontan geätzt wird. Für

ein rein chemisches Fluorätzen würde man ein isotropes Ätzprofil erwarten, doch durch das Auftreffen der Fluorätzspezies senkrecht zur Oberfläche, hervorgerufen durch die sich ausgebildete „Self-BIAS“-Spannung, wird auch eine senkrechte Vorzugsrichtung beim Ätzprozess erreicht. In allen REM-Aufnahmen in Abb. 4.15 ist das sogenannte „Microtrenching“ (vgl. Abb. 2.17) am Boden der geätzten Gräben zu erkennen, auf dessen Untersuchung später eingegangen wird. Außerdem sind in der Abb. 4.15 unten zwischen den Stegen Defekte zu erkennen, die durch eine nicht optimale Platinabscheidung während der Präparation des Querschnitts mittels FIB verursacht wurden.

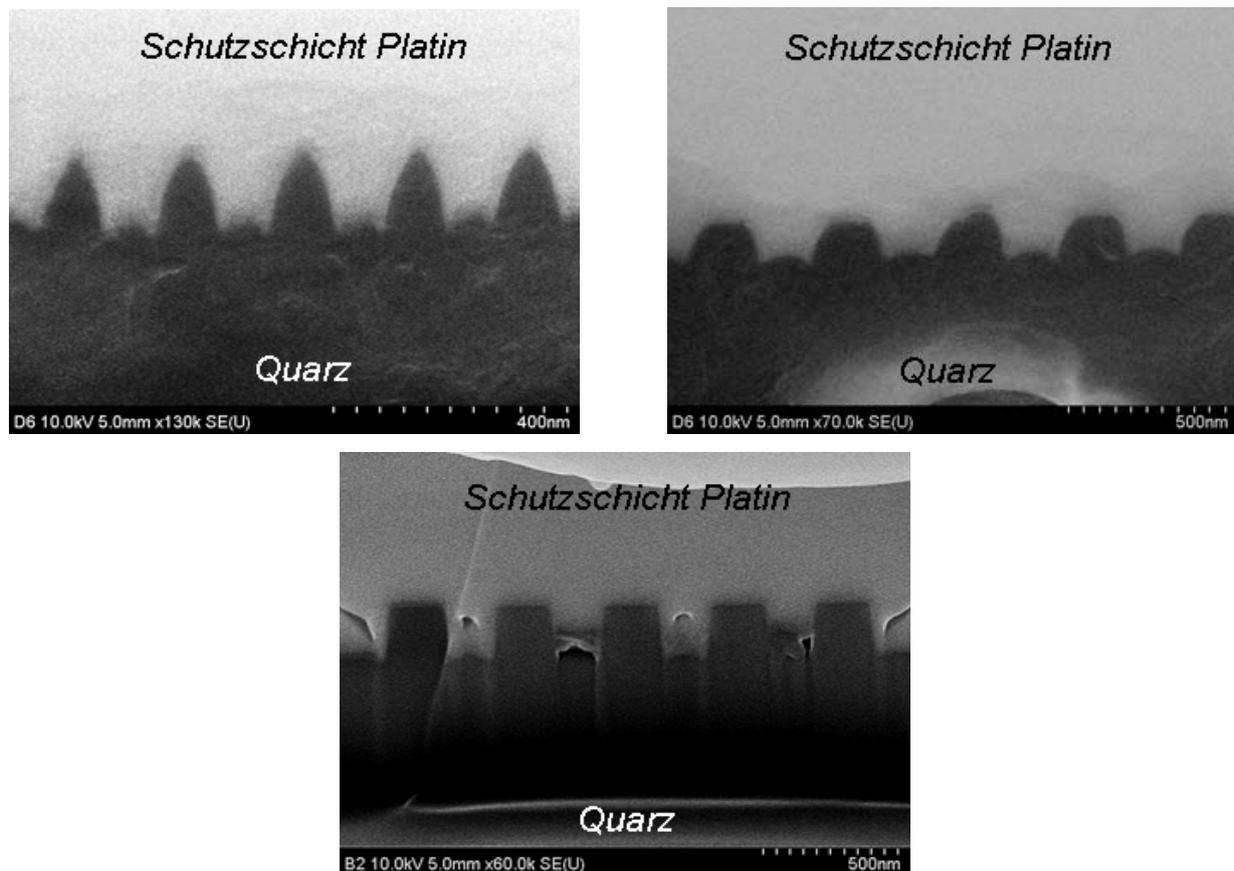


Abb. 4.15: REM-Aufnahmen von Quarzstegen, die mit einer Sauerstoffflussrate von 45 sccm (Abbildungen oben) und einer Sauerstoffflussrate von 0 sccm (Abbildung unten) geätzt wurden. Die linke Abbildung oben zeigt Stege mit einer nominellen Breite von 100 nm, die durch 100 nm breite Zwischenräume voneinander getrennt sind. Die rechte Abbildung oben zeigt Stege mit einer nominellen Breite von 200 nm, die durch 200 nm breite Zwischenräume voneinander getrennt sind. Die Abbildung unten zeigt Stege mit einer nominellen Breite von 200 nm, die durch 200 nm breite Zwischenräume voneinander getrennt sind

Die Anzahl der für den Ätzprozess zur Verfügung stehenden Ätzspezies beeinflusst in einem hohen Maß das Ätzresultat. Daher wurden Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses der  $C_4F_8$ -Flussrate auf die Quarzätzrate und auf die Selektivität durchgeführt (siehe Abb. 4.16). Die Sauerstoffflussrate betrug hierbei 0 sccm. Es ist zu erkennen, dass die Quarzätzrate bis zu einer  $C_4F_8$ -Flussrate von 20 sccm auf etwa 293 nm/min steigt und dann wieder leicht sinkt. Der Anstieg in der Ätzrate im Bereich geringer Flussraten wird durch eine erhöhte Anzahl an reaktiven Spezies hervorgerufen. Bei einer weiteren Erhöhung der Flussrate wird die Ätzreaktion zunehmend von der Verweilzeit der reaktiven Spezies in der Ätzkammer bestimmt (vgl. Abb. 2.13), was zu einer Abnahme der Ätzrate führt. Die Selektivität ist zwischen 20 sccm und 35 sccm maximal und erreicht bei einer Flussrate von 28 sccm einen Wert von über 60, was für die Realisierung einer dünnen Cr-Schichtdicke für den Quarzätzprozess entscheidend ist

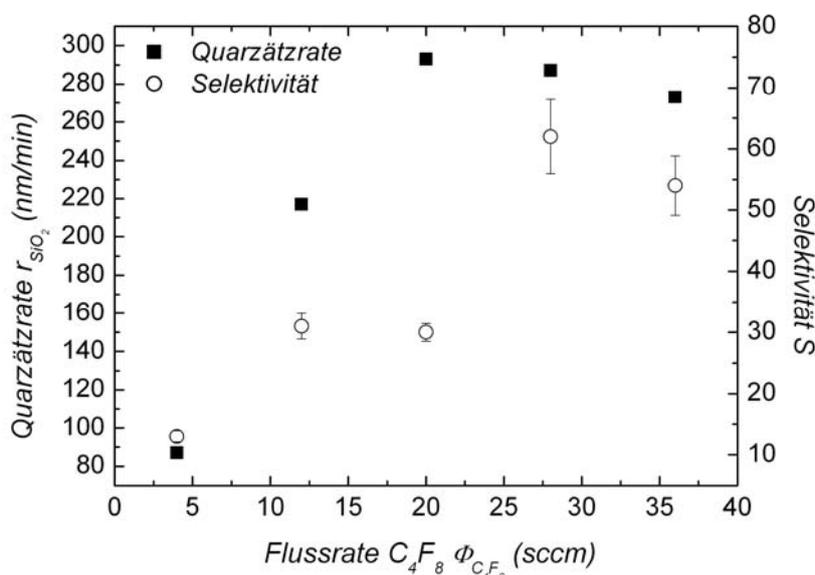


Abb. 4.16: Abhängigkeit der Quarzätzrate und der Selektivität von der  $C_4F_8$ -Flussrate. Die weiteren Ätzparameter entsprechen den Einstellungen in Tab. 4.4

Schließlich wurden bei der Bestimmung der wichtigsten Quarzätzparameter der Einfluss der „Self-BIAS“-Spannung auf die Quarzätzrate und die Selektivität untersucht (siehe Abb. 4.17). Es ist zu erkennen, dass die Quarzätzrate mit steigender „Self-BIAS“-Spannung ansteigt, da die eintreffenden Ionen eine höhere Energie besitzen und somit das physikalische Ätzen verstärken. Der erhöhte physikalische Anteil hat aber auch zur Folge, dass der Einfluss des chemischen Ätzanteils reduziert und folglich das Verhältnis aus Quarzätzrate zu Cr-Ätzrate verringert wird. Daraus folgt eine Abnahme der Selektivität. Dies wird bei „Self-BIAS“-Spannungen größer als 100 V deutlich. Hier fällt die Selektivität von 60 bei 100 V auf 20 bei 250 V.

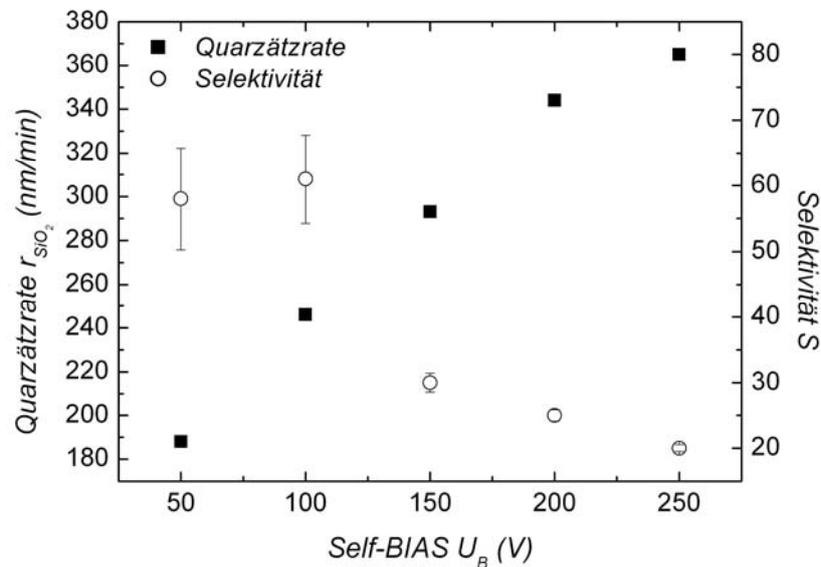


Abb. 4.17: Abhängigkeit der Quarzätzrate und der Selektivität von der „Self-BIAS“. Die weiteren Ätzparameter entsprechen den Einstellungen in Tab. 4.4

Ein weiterer Effekt der „Self-BIAS“-Spannung ist bei der Analyse der REM-Aufnahmen in Abb. 4.18 zu erkennen. Während für eine hohe „Self-BIAS“-Spannung von 250 V (siehe Abb. 4.18 links) am Boden „Microtrenching“ zu beobachten ist, erhält man für eine geringe „Self-BIAS“-Spannung von 50 V (siehe Abb. 4.18 rechts) ein rechteckiges Ätzprofil ohne „Microtrenching“. Bei der Probenpräparation für Abb. 4.18 rechts erfolgte keine optimale Platinabscheidung, weswegen sehr viele Defekte zwischen den Quarzstegen zu erkennen sind.

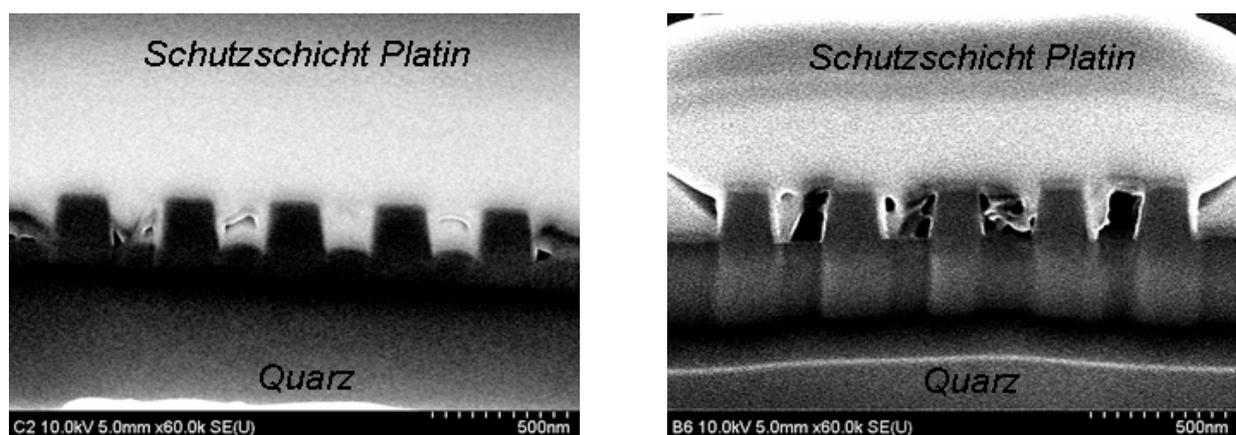


Abb. 4.18: REM-Aufnahmen von Quarzstegen mit einer nominellen Breite von 200 nm, die durch 200 nm breite Zwischenräume voneinander getrennt sind. Die linke Abbildung zeigt das Profil resultierend aus einer hohen „Self-BIAS“ (250 V), die rechte Abbildung zeigt das Profil resultierend aus einer geringen „Self-BIAS“ (50 V)

Bei der Bestimmung der wichtigsten Parameter für den Quarzätzprozess zeigte sich, dass die Ätzgaszusammensetzung und die „Self-BIAS“-Spannung die größten Einflüsse auf die Selektivität und das Profil haben. Die Werte für die Rauheiten waren in den geätzten Gebieten für alle untersuchten Parameter sehr gering (*RMS* zumeist unter 1 nm). Auf Grund der Ergebnisse zur Bestimmung der wichtigsten Quarzätzparameter wurden die Einstellungen aus Tab. 4.5 als Startwerte für die nachfolgende Optimierung des Quarzätzprozess festgelegt. Die Auswahl der Einstellungen erfolgte dabei in erster Linie nach dem Erzielen einer maximalen Selektivität und eines rechteckigen Ätzgrabens (steile Flanken, kein „Microtrenching“).

Tab. 4.5: Ätzeinstellung nach der Bestimmung der wichtigsten Quarzätzparameter. Verwendete Ätzanlage: ASE von STS (siehe Kapitel 2.2.1)

Parameter	Einstellung	Ergebnisse
Temperatur Probenauflage (°C)	30	Abb. 4.12
Flussrate C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> (sccm)	28	Abb. 4.16
Flussrate Sauerstoff (sccm)	15	Abb. 4.13
Prozessdruck (mTorr)	3	
HF-Leistung (W)	700	Abb. 4.11
„Self-BIAS“ (V)	100	Abb. 4.17

#### Optimierung der wichtigsten Quarzätzparameter

Für die weitere Optimierung der Parameter Ätzgaszusammensetzung und „Self-BIAS“-Spannung wurde der Fokus auf eine maximale Selektivität gelegt. Zusätzlich wurden die Ätzrate und die Rauheit im geätzten Gebiet untersucht, wobei eine Ätzrate von über 100 nm/min und eine Rauheit unter 1 nm (*RMS*) optimale Werte darstellen.

Zur Optimierung der Ätzgaszusammensetzung wurde die O<sub>2</sub>-Flussrate bei 15 sccm gehalten und die C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>-Flussrate zwischen 20 sccm und 36 sccm variiert. Die Werte für den zweiten Parameter, die „Self-BIAS“-Spannung, lagen zwischen 40 V und 120 V. Innerhalb dieses Bereiches wurde auf Grund der bisherigen Untersuchungen ein Maximum in der Selektivität sowie die Ausbildung eines Rechteckprofils ohne „Microtrenching“ erwartet (vgl. Abb. 4.17 und Abb. 4.18).

In Abb. 4.19 ist die Quarzätzrate in Abhängigkeit von der C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>-Flussrate für unterschiedliche „Self-BIAS“-Spannungen gezeigt. Wie bereits oben diskutiert, steigt mit zunehmender „Self-BIAS“-Spannung die Quarzätzrate. Für die C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>-Flussrate wird die Quarzätzrate ab einer C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>-Flussrate von 24 sccm von der Verweilzeit der reaktiven Spezies im Reaktor zunehmend be-

stimmt. Dies ist an der Abnahme der Ätzrate zu den höheren Flüssen hin zu erkennen (vgl. Abb. 2.13). Experimentell zeigte sich dieser Zusammenhang bereits bei der Bestimmung der wichtigsten Ätzparameter (siehe Abb. 4.16).

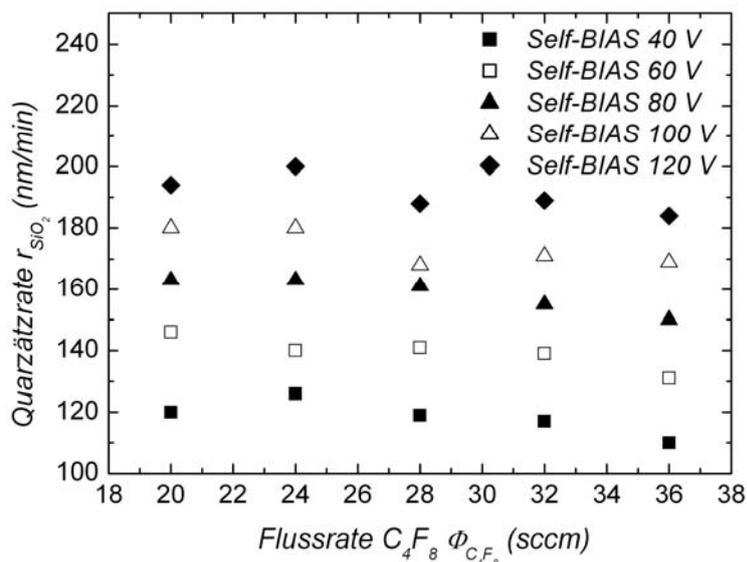


Abb. 4.19: Abhängigkeit der Quarzätzrate vom C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>-Fluss für „Self-BIAS“-Spannungen von 40 V bis 120 V. Die weiteren Ätzparameter entsprechen den Einstellungen in Tab. 4.5

Abb. 4.20 zeigt zusätzlich die Selektivität in Abhängigkeit von der C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>-Flussrate für unterschiedliche „Self-BIAS“-Spannungen. Für einen C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>-Fluss von 28 sccm wurden die höchsten Selektivitäten (85 bis 95) für „Self-BIAS“-Spannung zwischen 40 V und 80 V erreicht.

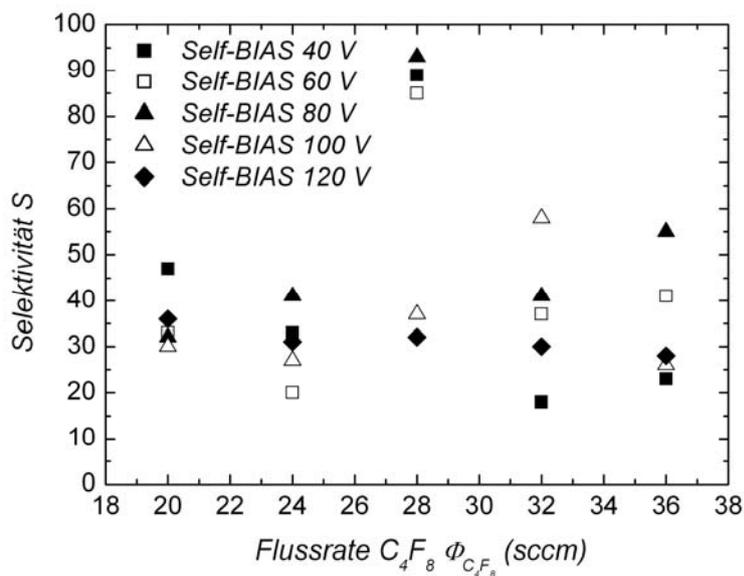


Abb. 4.20 Abhängigkeit der Selektivität vom C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>-Fluss für „Self-BIAS“-Spannungen von 40 V bis 120 V. Die weiteren Ätzparameter entsprechen den Einstellungen in Tab. 4.5

Eine übersichtlicherer Darstellung der Abhängigkeit der Ätzrate und der Selektivität von der „Self-BIAS“-Spannung bei einer  $C_4F_8$ -Flussrate von 28 sccm ist in Abb. 4.21 aufgetragen. Deutlich ist der Abfall der Selektivität von 95 bei 80 V auf 38 bei 100 V zu erkennen. Der Grund für den Abfall der Selektivität für „Self-BIAS“-Spannungen, die über einen kritischen Wert steigen, wurde bereits bei der Bestimmung der wichtigsten Ätzparameter beschrieben (siehe Abb. 4.17). Die Selektivität ist bei einer  $O_2$ -Flussrate von 15 sccm und einer  $C_4F_8$ -Flussrate von 28 sccm für „Self-BIAS“-Spannungen zwischen 40 V und 80 V optimal. Für diesen Bereich liegt die Quarzätzrate zwischen 120 nm/min (für eine „Self-BIAS“-Spannung von 40 V) und 160 nm/min (für eine „Self-BIAS“-Spannung von 80 V). Die maximale Strukturtiefe von Quarzprägeformen beträgt etwa 250 nm. Somit ist eine maximale Prozesszeit für das Quarzätzen von 2,1 min notwendig.

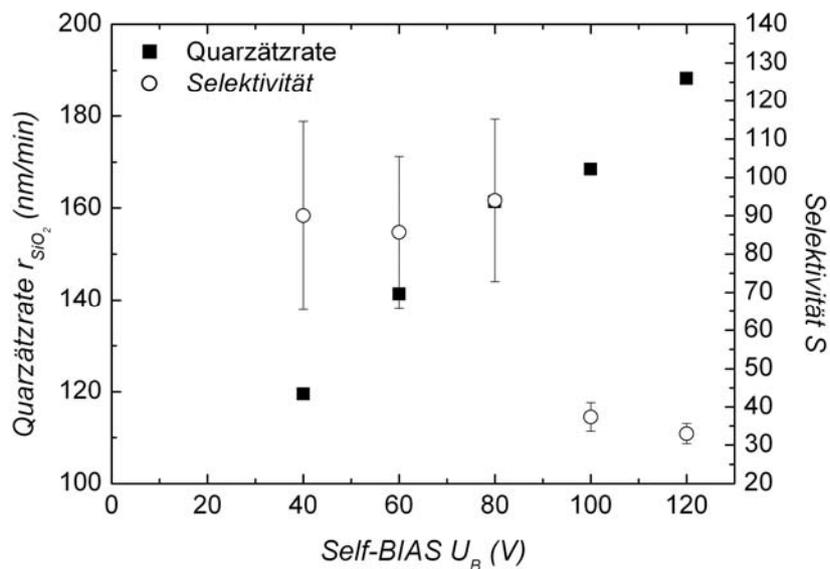


Abb. 4.21: Abhängigkeit der Ätzrate und der Selektivität von der „Self-BIAS“-Spannung. Die weiteren Ätzparameter entsprechen den Einstellungen in Tab. 4.5

Betrachtet man zusätzlich die Oberflächenrauheiten der geätzten Quarzgebiete für die im Hinblick auf die höchste Selektivität optimale Ätzgaszusammensetzung von 15 sccm  $O_2$  und 28 sccm  $C_4F_8$  in Abhängigkeit von der „Self-BIAS“-Spannung, so steigt die Rauheit, wie in Abb. 4.22 zu erkennen, zwar leicht an, bleibt allerdings auf einem sehr niedrigen Niveau von unter 1 nm.

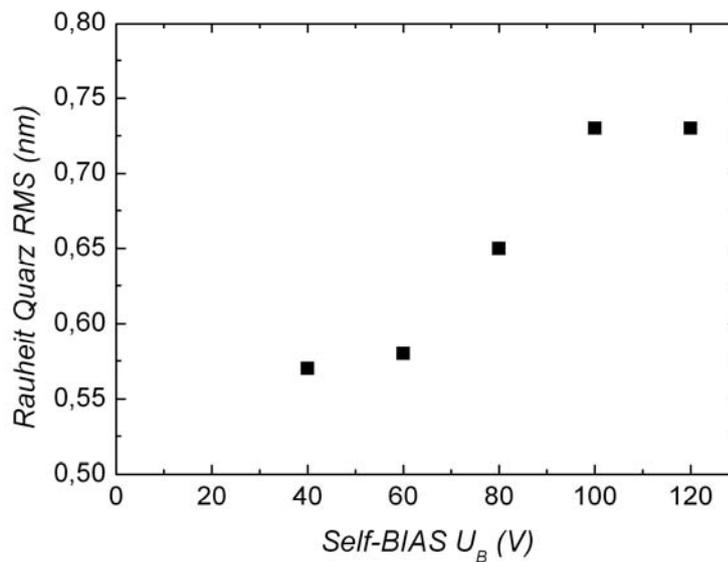


Abb. 4.22: Abhängigkeit der Rauheit von der „Self-BIAS“-Spannung. Die weiteren Ätzparameter entsprechen den Einstellungen in Tab. 4.5

Für den Einsatz als Prägeform in der UV-Nanoimprint-Lithografie sind Rauheiten unter 1 nm optimal, um den Einfluss der mechanischen Verzahnung zwischen Prägeform und ausgehärteten Prägelack zu minimieren. Die Parameter für den optimierten Quarzätzprozess sind in Tab. 4.6 zusammengefasst.

Tab. 4.6: Einstellungen für den optimierten Quarz ICP RIE-Prozess. Verwendete Ätzanlage: ASE von STS (siehe Kapitel 2.2.1)

Parameter	Einstellung
Temperatur Probenaufgabe (°C)	30
Flussrate $C_4F_8$ (sccm)	28
Flussrate Sauerstoff (sccm)	15
Prozessdruck (mTorr)	3
HF-Leistung (W)	700
„Self-BIAS“ (V)	60

Abschließend sind in Abb. 4.23 REM-Aufnahmen von einer typischen Probe gezeigt, die mit den optimierten Parametern aus Tab. 4.6 geätzt wurde. Quarzprofile von 100 nm breiten Quarzstegen, die durch 50 nm breite Zwischenräume getrennt sind, sind in Abb. 4.23 links

gezeigt, Quarzprofile mit 200 nm breiten Stegen und 200 nm breiten Zwischenräumen in Abb. 4.23 rechts. Die Ätztiefe beträgt jeweils 250 nm.

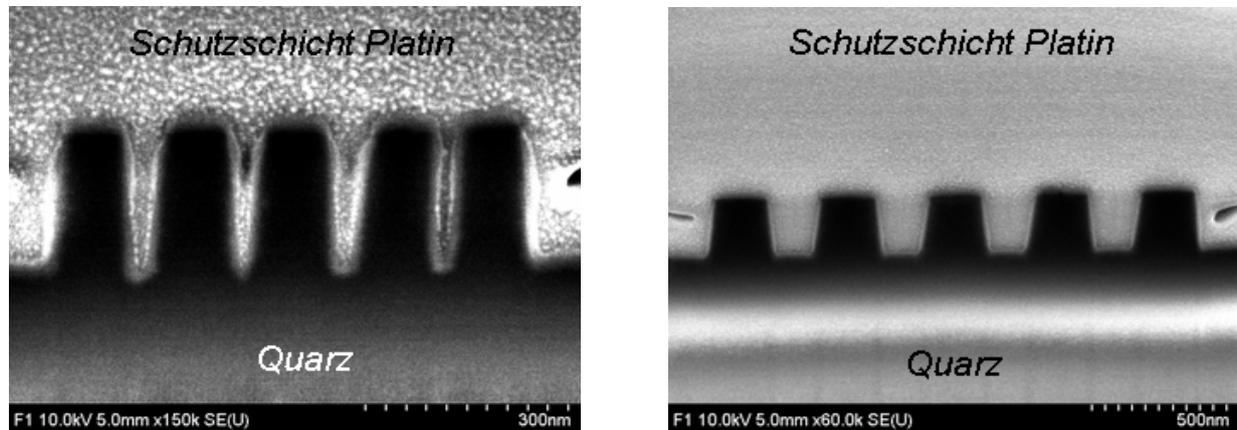


Abb. 4.23: REM-Aufnahmen von Quarzstegen, die mit den optimierten Parametern aus Tab. 4.6 geätzt wurden. Die linke Abbildung zeigt Stege mit einer nominellen Breite von 100 nm, die durch 50 nm breite Zwischenräume voneinander getrennt sind. Die rechte Abbildung zeigt Stege mit einer nominellen Breite von 200 nm, die durch 200 nm breite Zwischenräume voneinander getrennt sind

Nach der Entwicklung des optimierten Quarzätzprozesses wurden Prägeformen mit Strukturbreiten von 50 nm bis einigen 100  $\mu\text{m}$  bis zu einer maximalen Tiefe von 250 nm geätzt. Aufgrund der hohen Selektivität von 85 für Cr beim Quarzätzprozess kann eine sehr dünne Cr-Schichtdicke verwendet werden, wodurch die Anforderungen an die Cr-Strukturierung, vor allem an die Cr-Flankensteilheit, geringer sind. Konkret wurde eine Cr-Schichtdicke von 15 nm zur Maskierung beim Quarzätzprozess gewählt. Des Weiteren konnte kein „Microtrenching“ (vgl. Abb. 2.17) beobachtet werden. Auch die Flankensteilheit wurde zu  $88^\circ$  bestimmt, was im optimalen Bereich liegt (vgl. Kapitel 2.1.3). Der Rauheitswert (*RMS*) für die geätzten Quarzgebiete betrug auf einer Messfläche von  $1 \mu\text{m}^2$  0,58 nm und die Quarzätzrate 140 nm/min. Diese Werte sind für eine minimale mechanische Adhäsion während der Separation nach dem Prägevorgang und für eine kurze Ätzzeit der Prägeform optimal. Die ermittelten Messwerte für den optimierten Quarzätzprozess sind in Tab. 4.7 zusammengefasst.

Tab. 4.7: *Ermittelte Messwerte für den optimierten Quarzätzprozess*

<b>Messung</b>	<b>Wert</b>
Rauheit RMS (nm)	0,58
Flankensteilheit (°)	88
Selektivität	85
Quarzätzrate (nm/min)	140
Profil	Rechteckig

#### 4.5 Reinigung, Oberflächenmodifikation und Fertigstellung

Nach dem Quarzätzprozess ist es notwendig, die Prägeform von der restlichen Cr-Maskierung und dem Polymerfilm zu reinigen bevor die Quarzoberfläche mit einer sogenannten Antihafschicht modifiziert werden kann (siehe Kapitel 2.1.3). Diese soll für eine partikelfreie Trennung von Prägeform und UV-Polymer nach dem Aushärtevorgang sorgen. Schließlich müssen die in der Regel 12,5·12,5 mm<sup>2</sup> großen Prägeformen auf einen 65·65 mm<sup>2</sup> Quarzhalter geklebt werden, um diese mit dem Imprintkopf aufnehmen zu können (siehe Kapitel 4.1.2).

Die Polymerrückstände auf der Quarzprägeform nach dem Quarzätzprozess wurden in einem Sauerstoffplasma entfernt. Die Einstellungen für diesen Reinigungsprozess (siehe Tab. 4.8) entsprechen dem Prozess zur Entfernung von Fotolack am Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente. Mit diesem Prozess wurde neben der Polymerschicht auch die Cr-Maskierung entfernt.

Tab. 4.8: *ICP-RIE Ätzeinstellungen für die Oberflächenreinigung der Quarzprägeformen. Verwendete Ätzanlage: ASE von STS (siehe Kapitel 2.2.1)*

<b>Parameter</b>	<b>Einstellung</b>
Temperatur Probenaufgabe (°C)	20
Flussrate Sauerstoff (sccm)	40
Prozessdruck (mTorr)	10
HF-Leistung (W)	600
„Self-BIAS“ (V)	125
Prozessdauer (min)	2

Durch den Reinigungsprozess in einem Sauerstoffplasma wird die Quarzoberfläche nicht nur gereinigt, sondern auch für eine gewisse Zeit mit reaktiven OH-Gruppen aktiviert. Die Aktivierung der Quarzoberfläche ist für deren Reaktion mit der Antihafschicht notwendig (siehe Kapitel 2.1.3). Aus diesem Grund wurde nach dem Reinigungsprozess sofort die Oberflächenmodifikation durchgeführt. Die Modifizierung der Prägeformoberfläche erfolgte durch eine Silanisierung mit F<sub>13</sub>TCS bzw. mit Optool DSX aus der Flüssigphase für 2,5 h.

Die Modifikation der Quarzoberfläche wurde durch die Auswertung der resultierenden Oberflächenenergien bestimmt. Hierfür wurden statische Kontaktwinkelmessungen an blanken und modifizierten Quarzoberflächen mit den Testflüssigkeiten H<sub>2</sub>O und 1-Oktanol durchgeführt und nach dem Verfahren von Owens und Wendt [Owe69] ausgewertet (siehe Kapitel 3.1). Die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen und die sich daraus ergebenden Oberflächenenergien sind in den Abb. 4.24 und Abb. 4.25 dargestellt.

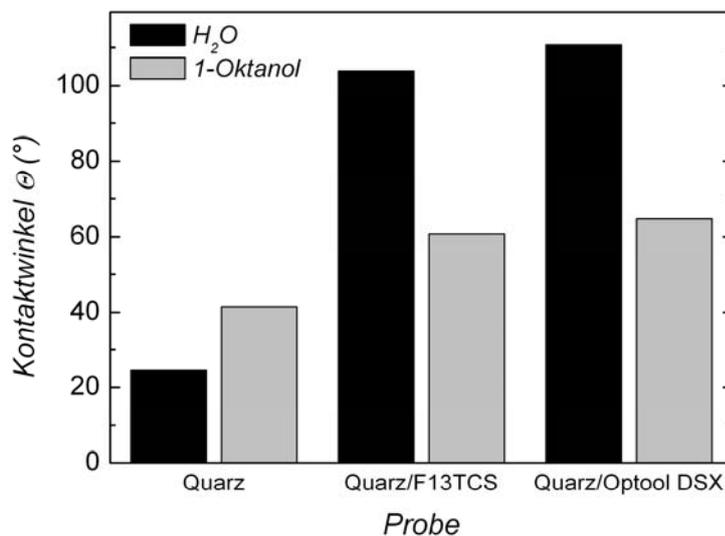


Abb. 4.24: Darstellung der Kontaktwinkel, welche die Oberflächen Quarz, Quarz modifiziert mit F<sub>13</sub>TCS und Quarz modifiziert mit Optool DSX für die Testflüssigkeiten H<sub>2</sub>O und 1-Oktanol bilden

In Abb. 4.24 ist eine deutliche Zunahme der Kontaktwinkel für die behandelten Quarzoberflächen gegenüber den Testflüssigkeiten H<sub>2</sub>O und 1-Oktanol zu erkennen. Wertet man die Daten nach dem Verfahren von Owens und Wendt aus, ergibt sich daraus eine Reduzierung der Oberflächenenergie  $\sigma$  von 94,7 mN/m für eine blanke Quarzoberfläche ( $\sigma^p$  entspricht 94,7 mN/m und  $\sigma^d$  ist kleiner als 0,01 mN/m) auf 15,4 mN/m für die mit F<sub>13</sub>TCS modifizierte Quarzoberfläche ( $\sigma^p$  entspricht 2,2 mN/m und  $\sigma^d$  entspricht 13,2 mN/m). Über vergleichbare Oberflächenenergien für mit F<sub>13</sub>TCS behandelte Quarzoberflächen wird auch bei Bailey et al. [Bai00]

berichtet. Für die mit Optool DSX modifizierte Quarzoberfläche ergibt sich eine Oberflächenenergie  $\sigma$  von 15,5 mN/m ( $\sigma^p$  entspricht 0,9 mN/m und  $\sigma^d$  entspricht 14,7 mN/m).

Hare et al. [Har54] haben vorhergesagt, dass eine Oberfläche, die nur aus  $\text{CF}_3$ -Gruppen aufgebaut ist, eine Oberflächenenergie  $\sigma$  von etwa 6 mN/m haben müsste. Nishino et al. [Nis99] bestätigten dies später experimentell, indem sie die Oberflächenenergie einer mit  $\text{C}_{20}\text{F}_{42}$  behandelten Glasoberfläche zu 6,7 mN/m bestimmten. Es konnte hierbei gezeigt werden, dass sich die Molekülketten senkrecht zur Glasoberfläche ausgerichtet haben, weshalb diese geringe Oberflächenenergie erreicht wurde. Im Rahmen der Arbeit wurden zwei Silane gewählt, die sehr viel kürzere Kettenlängen haben als die von Nishino et al. [Nis99] benutzten, um zu vermeiden, dass die Moleküle die Strukturdimensionen der Quarzprägeform signifikant reduzieren. Somit ist mit der Verwendung der verwendeten Silane eine möglichst maßgetreue Strukturübertragung gegeben. Weiter spricht für deren Verwendung, dass die ermittelten Oberflächenenergien von etwa 15 mN/m geringer sind als die Oberflächenenergie von Teflon™ (18 mN/m), das für seine nicht-haftende Eigenschaft bekannt ist.

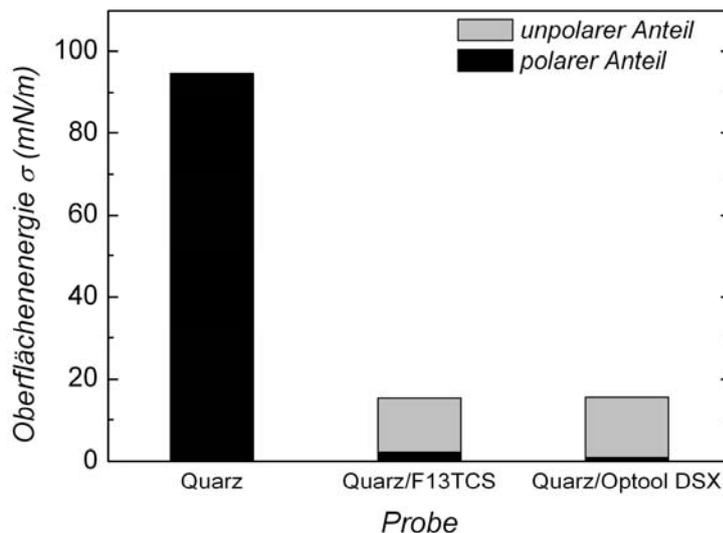


Abb. 4.25: Darstellung der Oberflächenenergien von Quarz, Quarz modifiziert mit  $\text{F}_{13}\text{TCS}$  und Quarz modifiziert mit Optool DSX ausgewertet nach dem Verfahren von Owens und Wendt

Nach der Entwicklung der Prozessschritte zur Herstellung von Quarzprägeformen und deren Oberflächenmodifikation konnten bis zu 64 Prägeformen aus einem Quarzsubstrat hergestellt und nach dem vorgestellten Konzept (siehe Kapitel 4.1.2) eingesetzt werden. Betrachtet man die Kosten für die Herstellung der Prägeformen (inklusive Quarzhalter), so belaufen sich diese pro Prägeform auf etwa 10% im Vergleich zu den aktuell erhältlichen Prägeformen. Dies ist

hauptsächlich darin begründet, dass pro Substrat 64 Prägeformen statt 4 Prägeformen hergestellt werden können und somit zu einer wesentlichen Kostenreduktion führen.

## 5 Auswahl optimaler Prägelacke für die UV-Nanoimprint-Lithografie

Um die UV-NIL als Nanostrukturierungsverfahren zu etablieren, müssen Prägelacke (UV-Polymere) mit spezifischen Eigenschaften in einem ausreichenden Maß zur Verfügung stehen. Zu den spezifischen Eigenschaften zählen eine geringe Viskosität, keine Haftung im ausgehärteten Zustand zu der Prägeform, dagegen eine hohe Haftung zum Substrat, eine schnelle Aushärtung, eine hohe Ätzbeständigkeit, sowie eine hohe Reinheit und Kompatibilität zu Prozessen in der Halbleitertechnologie.

Für die Evaluierung geeigneter UV-Polymere wurde unter anderem die Oberflächenspannung der UV-Polymere nach einer im Rahmen der Arbeit neu entwickelten Auswertemethode bestimmt. Zusätzlich wurden die Kontaktwinkel der UV-Polymere zu verschiedenen Oberflächen gemessen, um anschließend mittels geeigneter Experimente eine optimale Haftung zwischen den UV-Polymeren und verschieden vorbehandelten Si-Substratoberflächen zu erreichen. Die Viskosität der UV-Polymere beeinflusst maßgeblich die Restlackschichtdicke. Die Restlackschichtdicke muss möglichst gering sein, da sie vor der Substratstrukturierung in einem Plasmaprozess entfernt werden muss, der selbst zur Quelle partikulärer Defekte werden und auch die Dimensionen der geprägten Strukturen verändern kann. Um eine große Anzahl an Prägeprozessen defektfrei durchführen zu können muss außerdem eine Kombination aus UV-Polymer und Antihafschicht gewählt werden, bei der die Abnutzung der Antihafschichten minimal ist. Schließlich muss ein optimales UV-Polymer eine hohe Ätzbeständigkeit gegenüber dem Substratätzprozess aufweisen, damit die geprägten Strukturen maßhaltig übertragen werden können.

### 5.1 Verfügbarkeit und Eigenschaften von Prägelacken

Die Verfügbarkeit eines geeigneten Prägelacks stellt eine wichtige Voraussetzung dar, um die UV-NIL als hochauflösende Strukturierungsverfahren einsetzen zu können. Der Prägelack muss hierbei verschiedene Eigenschaften erfüllen, auf deren detaillierte Beschreibung bereits in Kapitel 2.1.3 und einleitend in diesem Kapitel eingegangen wurde.

Eine Klasse von Materialien, welche diese Eigenschaften erfüllt, sind die Acrylate, die sich durch ihre geringe Viskosität auszeichnen und mit denen in der Halbleitertechnologie z.B. im Bereich der Elektronenstrahl-Lithografie bereits Erfahrungen bestehen. Um ein UV-härtendes Polymer aus der Klasse der Acrylate zu erhalten, müssen zu diesen weitere Komponenten gemischt werden, wodurch verschiedene Eigenschaften des UV-Polymers eingestellt werden können. So kann z.B. durch die Zugabe von Molekülen mit Kohlenstoff-Fluorketten in der

Form  $R-CF_2-CF_3$  (R: Rest) die Haftung zwischen UV-Polymer sowie Prägeform und Substrat beeinflusst werden. Um die Vernetzung des UV-Polymers zu initiieren, wird ein Radikalfotoinitiator eingesetzt. Dieser zersetzt sich während der UV-Belichtung, wobei freie Radikale entstehen, die für die Vernetzung des UV-Polymers verantwortlich sind [Klo88]. Da Sauerstoff die freien Radikale einfängt und diese somit nicht mehr für die Vernetzung des UV-Polymers zur Verfügung stehen, muss die Prägefläche mit einem sauerstofffreien Prozessgas gespült werden [Ste05]. Das Prozessgas muss hierbei den Sauerstoff aus der Umgebung möglichst verdrängen und selbst flüchtig oder löslich in der Lackschicht sein, um nicht selbst als Defektquelle in Form eines Gaseinschlusses aufzutreten.

Acrylate zeigen im ausgehärteten Zustand die Tendenz, an Quarzoberflächen haften zu bleiben. Diese Tendenz wird auf Grund der Topografie der Prägeform (Oberflächenvergrößerung) verstärkt. Um eine Trennung zu erreichen, muss die Quarzoberfläche mit einer Antihafschicht modifiziert werden (siehe Kapitel 4.5). Diese muss eine stabile, dünne Lage auf dem Quarz bilden und darf möglichst keine Tendenz aufzeigen, mit Acrylaten und deren Beimischungen eine Bindung einzugehen. Zusätzlich darf die Acrylatmischung die Antihafschicht über eine steigende Anzahl an Prägungen nicht abnutzen, damit die Prägeform zuverlässig verwendet werden kann.

Neben der rückstandsfreien Trennung zwischen Prägeform und UV-Polymer muss das UV-Polymer auch eine hohe Haftung zum Substrat zeigen. Dies ist für reine Acrylatmischungen auf Si-Substraten gegeben, Beimischungen zu den Acrylaten können die Tendenz zur Haftung allerdings herabsetzen.

Im Rahmen der Arbeit wurden unterschiedliche UV-Polymere im Hinblick auf ihre Eignung für die UV-NIL untersucht. Die Handelsnamen der unterschiedlichen UV-Polymere, ihre Viskositäten  $\mu$  (laut Hersteller), sowie die experimentell bestimmten Aushärtezeiten bei der Belichtungswellenlänge  $\lambda$  von 375 nm und einer Leistung von 30 mW/cm<sup>2</sup> sind in der Tab. 5.1 aufgeführt.

Die UV-Dental-Versiegler Fissurit und Clinpro Sealant sind nach einer Belichtungszeit von 100 s nicht ausgehärtet, weswegen sie für weitere Untersuchungen nicht mehr betrachtet wurden. Im Fall von Helioseal war eine sehr lange Aushärtezeit von etwa 100 s nötig, was für kurze Prägezeiten ungeeignet ist. Bei den UV-Klebern waren die Aushärtezeiten geringer und betragen für NOA61 20 s und für den Z-Lack unter 5 s. Die UV-NIL Polymere Inoflex RP+, PAK-01, NIF-1-A, NIF-2 und NIF-A-5b,c,d härteten alle innerhalb von 10 s aus. Diese Zeit kann durch eine Erhöhung der UV-Leistung weiter verringert werden. Hierdurch kann es allerdings zu einer Versprödung der UV-Polymere kommen, wodurch die Eigenschaften wie z.B.

die Ätzbeständigkeit negativ beeinflusst werden. Im Folgenden wurden alle UV-Polymere, die ausgehärtet sind, weiter getestet, um die Haftung und den Einfluss der Viskosität auf die Restlackschichtdicke zu untersuchen. Für den Einsatz als UV-Polymer für die UV-NIL sind allerdings nur die UV-Polymere geeignet, die innerhalb von 10 s ausgehärtet sind, da längere Aushärtezeiten die Zeit für den Prägeprozess erhöhen und somit den Durchsatz reduzieren.

Tab. 5.1: Bezeichnungen der untersuchten UV-Polymere. Aufgelistet sind zusätzlich die Viskositäten  $\mu$  und die Aushärtezeiten der Materialien bei der Belichtungswellenlänge  $\lambda$  von 375 nm und einer Leistung von 30 mW/cm<sup>2</sup>

Anwendung	Handelsname (Firma)	Viskosität $\mu$ (mPa·s)	Aushärtezeiten (s) bei 30 mW/cm <sup>2</sup>
UV-Dental-Versiegler	Fissurit (Voco)	> 100	Keine Aushärtung
	Clinpro Sealant (3M ESPE)	> 100	Keine Aushärtung
	Helioseal (Ivoclar Vivadent)	70 – 75	100
UV-Kleber	NOA 61 (Norland Optics)	300	20
	Z-Lack (96,5% t-butyl acrylate und 3,5% Irgacure 369)	12 – 14	< 5
UV-NIL Polymere	Inoflex RP+ (Inomat GmbH)	100	< 5
	PAK-01 (Toyo Gosei)	50	< 5
	NIF-1-A (Asahi Glass Company)	14,5	< 10
	NIF-2 (Asahi Glass Company)	24,5	< 10
	NIF-A-5b,c,d (Asahi Glass Company)	9,5	< 10

Auf die Beurteilung der Viskosität, die ebenfalls in Tab. 5.1 dargestellt ist und die, wie bereits in Kapitel 2.1.3 beschrieben, entscheidend für die Restlackschichtdicke ist, wird in Kapitel 5.3 eingegangen.

## 5.2 Haftung zwischen Prägelacken und Oberflächen

Um die Haftungseigenschaften beim Prägeprozess eingehend untersuchen zu können, müssen die Grenzschichten zwischen Prägeform und UV-Polymer, sowie UV-Polymer und Substrat betrachtet werden. Um eine gute Haftung zwischen Substrat und UV-Polymer zu erreichen sind eine gute Benetzung (kleiner Kontaktwinkel) und eine hohe spezifische Adhäsion notwendig (siehe Kapitel 3.1).

### 5.2.1 Benetzung von Oberflächen durch Prägelacke

Eine gute Benetzung der Substratoberfläche durch die UV-Polymere ist eine Grundvoraussetzung zum Erreichen einer hohen Haftung. Zusätzlich muss eine hohe spezifische Adhäsion gegeben sein. Um das Benetzungsverhalten von Festkörpern durch Flüssigkeiten zu untersuchen werden in der Regel Kontaktwinkelmessungen durchgeführt. Dieses Verfahren wurde bereits in Kapitel 3.1 ausführlich beschrieben. Hierbei ist die Benetzung umso besser, je kleiner der Kontaktwinkel ist.

In Tab. 5.2 sind die Kontaktwinkel zwischen den untersuchten UV-Polymeren und ausgewählten Oberflächen dargestellt. Die Auswahl umfasst unter anderem das in der Halbleitertechnologie am häufigsten verwendete Substratmaterial Si, welches in gereinigter Form vorlag oder beschichtet wurde. Als Beschichtungen wurden Hexamethyldisilazan (HMDS), die Antireflexionsschicht DUV 112-6 (ARC) von Brewer Science und der Elektronenstrahllack AR-P 669.04 (PMMA) von Allresist GmbH gewählt. HMDS wird als Haftvermittler zwischen Si-Substraten und Fotolack in der optischen Lithografie eingesetzt. Die ARC und PMMA wurden untersucht, da sie eine hohe Haftung auf Si-Substraten haben und wie die UV-Polymere hauptsächlich aus Acrylaten bestehen. Somit sollte die Bildung des „weak boundary layers“ vermieden und eine hohe Haftung erreicht werden. Zusätzlich wurden die Kontaktwinkel zwischen den UV-Polymeren und blanken Quarz, Quarz modifiziert mit der Antihafschicht  $F_{13}TCS$  (Prägeform) und zu Polytetrafluorethen (PTFE) bestimmt.

In Tab. 5.2 ist zu erkennen, dass die Kontaktwinkel zwischen den UV-Polymeren und der Prägeform, die mit einer Antihafschicht ( $F_{13}TCS$ ) bedeckt ist, stets größer sind als die Kontaktwinkel zu den untersuchten Substratoberflächen. Dies deutet daraufhin, dass in jedem Fall die Haftung zwischen den UV-Polymeren und den Substratoberflächen größer sein sollte als zu der Prägeform. Die Kontaktwinkel zwischen PTFE sowie der Prägeform und den UV-Polymeren aus der NIF-Serie unterscheiden sich stark zu den restlichen UV-Polymeren. Dies ist ein Indiz für eine stark unterschiedliche Zusammensetzung der UV-Polymere. Vor allem die

geringen Kontaktwinkel zwischen den UV-Polymeren aus der NIF-Serie und PTFE mit 12,4° bzw. 25,4° deuten darauf hin, dass die Prägelacke eine PTFE-ähnliche und somit nichthaftende Eigenschaft haben. Dies kann zum einen für die Separation zwischen Prägeform und UV-Polymer von Vorteil sein, da es kaum zu einer Interaktion zwischen Antihafschicht und UV-Polymer kommt, zum anderen kann die Haftung zwischen den UV-Polymeren und den Si-Substraten reduziert sein. Der Messfehler bei der Bestimmung der Kontaktwinkel beträgt etwa 0,5°.

Tab. 5.2: Bestimmung der Kontaktwinkel zwischen Prägelacken und ausgewählten Oberflächen (n.u.: nicht untersucht; Prägeform beschichtet mit  $F_{13}TCS$ )

	Kontaktwinkel $\theta$ (°)						
	Si	Si / HMDS	Si / ARC	Si / PMMA	Prägeform	PTFE	Quarz
Helioseal	15,0	26,7	17,3	17,3	66,2	73,4	19,9
NOA 61	23,7	41,8	n.u.	n.u.	68,3	74,1	23,6
Z-Lack	6,3	25,8	10,6	5,6	65,4	70,7	16,1
Inoflex RP+	14,9	31,9	8,0	14,1	67,9	74,5	20,2
PAK-01	9,4	20,3	8,7	9,5	66,5	72,3	16,5
NIF-1-A	15,8	11,4	5,9	5,4	34,2	12,4	23,1
NIF-2	16,3	12,3	6,1	6,8	33,7	12,3	23,7
NIF-A-5b,c,d	15,0	10,9	12,2	5,3	35,5	25,4	39,9

### 5.2.2 Bestimmung der Oberflächenspannung von Prägelacken

Die Bestimmung der Oberflächenenergie von Festkörpern erfolgt zumeist durch die Messung der Kontaktwinkel zwischen verschiedenen Flüssigkeiten mit bekannter Oberflächenspannung und der Oberfläche des untersuchten Festkörpers. Dieses Messprinzip und die dazugehörige Auswertemethode wurden bereits in Kapitel 3.1 detailliert vorgestellt.

Zur Bestimmung der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten wird üblicherweise ein sogenanntes Tensiometer nach der Ring- oder Plattenmethode verwendet [Fre06][Chr98]. Prinzip hierbei ist, dass entweder die Kraft gemessen wird, die aufgewendet werden muss, um einen Ring aus einer Flüssigkeit zu ziehen oder es wird die Kraft gemessen, die aus der Benetzung einer senkrecht aufgehängten Platte resultiert. Folglich werden typischerweise zwei Messaufbauten benötigt, um die Oberflächenenergie von Festkörpern und die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten zu bestimmen.

Um nun mit einem Messaufbau, dem Kontaktwinkelmessgerät, neben der Oberflächenenergie von Festkörpern auch die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten zu bestimmen, wurde im Rahmen der Arbeit eine neue Auswertemethode für Kontaktwinkelmessungen entwickelt, mit der die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten bestimmt werden kann [Sch07]. Die entscheidende experimentelle Voraussetzung für die neue Auswertemethode ist die Auswahl zweier Festkörperoberflächen mit bestimmten Eigenschaften. Die wichtigste Eigenschaft hierbei ist, dass die Oberflächenenergie der einen für die Kontaktwinkelmessungen eingesetzten Festkörperoberfläche im Rahmen der Messgenauigkeit komplett polar und die der anderen komplett dispersiv ist. Als Materialien konnten hierfür eine polierte PTFE-Oberfläche und Quarzglas ermittelt werden. Die Oberflächenenergie  $\sigma$  der polierten PTFE-Oberfläche betrug 27,5 mN/m ( $\sigma^p$  ist kleiner als 0,01 mN/m und  $\sigma^d$  entspricht 27,5 mN/m) und die für das Quarzglas 94,7 mN/m ( $\sigma^p$  entspricht 94,7 mN/m und  $\sigma^d$  ist kleiner als 0,01 mN/m). Die Werte hierzu sind in Tab. 5.3 zusammengefasst.

Tab. 5.3: Oberflächenenergien von der polierten PTFE-Oberfläche und von Quarzglas. Die beiden Materialien wurden verwendet, um die Oberflächenspannung der UV-Polymere nach der neu entwickelten Auswertemethode zu bestimmen

Festkörper	Oberflächenenergie $\sigma$ (mN/m)	Polarer Anteil $\sigma^p$ (mN/m)	Dispersiver Anteil $\sigma^d$ (mN/m)
PTFE	27,5	< 0,01	27,5
Quarzglas	94,7	94,7	< 0,01

Die Auswertung der Oberflächenspannung basiert auf den Gln. (3.1) und (3.3), die bereits in Kapitel 3.1 vorgestellt wurden, hier aber aus Gründen der Übersichtlichkeit noch einmal wiederholt werden. Nach Owens und Wendt [Owe69] gilt folgender Zusammenhang:

$$\sigma_{ls} = \sigma_s + \sigma_l - 2\sqrt{\sigma_l^d \sigma_s^d} - 2\sqrt{\sigma_s^p \sigma_l^p} . \quad (5.1)$$

Hier ist  $\sigma_{ls}$  die Oberflächenenergie zwischen der festen und der flüssigen Phase,  $\sigma_s$  die Oberflächenenergie für die Festkörperoberfläche und  $\sigma_l$  die Oberflächenspannung für die Flüssigkeit (UV-Polymer). Die hochgestellten Indices d und p beschreiben jeweils den dispersiven und den polaren Anteil an der Oberflächenenergie. Kombiniert man Gl. (5.1) mit der Gl. (5.2) von Young [You05],

$$\sigma_s = \sigma_{s_s} + \sigma_l \cos \Theta, \quad (5.2)$$

wobei  $\Theta$  dem Kontaktwinkel am Tripelpunkt von Festkörperoberfläche, UV-Polymer und Gasphase entspricht, erhält man folgende Gl. (5.3):

$$\sigma_l(1 + \cos \Theta) = 2\sqrt{\sigma_l^d \sigma_s^d} + 2\sqrt{\sigma_l^p \sigma_s^p}. \quad (5.3)$$

Wenn nun, wie bereits oben als Grundvoraussetzung definiert, die Festkörperoberfläche 1 ein rein dispersives (PTFE) und die Festkörperoberfläche 2 ein rein polares (Quarzglas) Material ist, so kann man den dispersiven und polaren Anteil der Oberflächenspannung der Flüssigkeit bestimmen (Herleitung siehe Anhang). Für den dispersiven Anteil der Oberflächenspannung gilt Gl. (5.4):

$$\sigma_l^d = v_1^{-2} \left[ \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 + 1 \right]^{-2}, \quad (5.4)$$

und für den polaren Anteil der Oberflächenspannung Gl. (5.5):

$$\sigma_l^p = v_1^{-2} \left\{ \left[ \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 + 1 \right]^{-1} - \left[ \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 + 1 \right]^{-2} \right\}, \text{ mit} \quad (5.5)$$

$$v_1 = \frac{1 + \cos \Theta_1}{2\sqrt{\sigma_{s1}^d}} \text{ und} \quad (5.6)$$

$$v_2 = \frac{1 + \cos \Theta_2}{2\sqrt{\sigma_{s2}^p}}. \quad (5.7)$$

Somit können nun die polaren und dispersiven Anteile der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten bestimmt werden, indem die Kontaktwinkel der Flüssigkeiten zu PTFE und zu dem Quarzglas gemessen werden. Die gesamte Oberflächenspannung der untersuchten Flüssigkeit wird dann additiv aus den polaren und dispersiven Anteilen nach Gl. (3.2) ermittelt.

Um die Mess- und Auswertemethode zu verifizieren, wurden die Oberflächenspannungen von zwei Flüssigkeiten (DI-Wasser und 1-Oktanol), deren Werte für die Oberflächenspannung aus der Literatur bekannt sind, mit den Werten des entwickelten Verfahrens verglichen. In Tab. 5.4

sind die nach der neuen Methode ermittelten Werte für die Oberflächenspannung mit Werten aus der Literatur für DI-Wasser [Bel90] und 1-Oktanol [Sch77] gegenüber gestellt.

Tab. 5.4: Gegenüberstellung von Literaturwerten und den ermittelten Werten für die Oberflächenspannungen von DI-Wasser und 1-Oktanol

Flüssigkeit	Literaturwerte [Bel90][Sch77]			Ermittelte Werte		
	$\sigma$ (mN/m)	$\sigma^p$ (mN/m)	$\sigma^d$ (mN/m)	$\sigma$ (mN/m)	$\sigma^p$ (mN/m)	$\sigma^d$ (mN/m)
DI-Wasser	72,8	51	21,8	72,7	51,2	21,5
1-Oktanol	27,6	6,3	21,3	27,8	6,3	21,5

Man erkennt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Literaturwerten und den ermittelten Werten, wodurch die erarbeitete Methode bestätigt ist und im Folgenden die Werte der Oberflächenspannungen für die UV-Polymere mit der Methode bestimmt werden können. Die so ermittelten Werte für die Oberflächenspannungen sind in Tab. 5.5 für die untersuchten UV-Polymere angegeben.

Tab. 5.5: Werte der Oberflächenspannung für ausgewählte UV-Polymere bestimmt nach der entwickelten Auswertemethode

	$\sigma$ (mN/m)	$\sigma^p$ (mN/m)	$\sigma^d$ (mN/m)
Helioseal	40,1	16,1	24
Z-Lack	38,1	14,8	23,3
Inoflex RP+	40,8	16,6	24,2
PAK-01	39,1	15,6	23,5
NIF-1-A	22,2	4,8	17,4
NIF-2	22,2	4,8	17,4
NIF-A-5b,c,d	24,3	4,9	19,4

Man erkennt, dass die Werte der Oberflächenspannung für die UV-Polymere aus der NIF-Serie stark von denen der restlichen UV-Polymere abweichen. Während für die UV-Polymere aus der NIF-Serie Oberflächenspannungen zwischen 22,2 mN/m und 24,3 mN/m ermittelt wurden, betragen diese etwa 40 mN/m für die restlichen UV-Polymere. Da die letztgenannten UV-Polymere fast ausschließlich aus einer Acrylatmischung, einem Fotoinitiator und geringen Mengen an sonstigen Zusätzen bestehen, können die UV-Polymere aus der NIF-Serie keine

reinen Acrylatmischungen sein. Hier sind entweder zu den Acrylaten ein erheblicher Anteil an Beimischungen zugesetzt worden oder es erfolgte eine Synthese der eingesetzten Acrylate, in Folge dessen die gesamte Oberflächenspannung der UV-Polymere herabgesetzt wurde. Bei der Auswertung der Werte für die Oberflächenspannungen ergibt sich ein Messfehler von etwa 1 mN/m, der aus der Messung der Kontaktwinkel resultiert.

Die Beimischungen bzw. die erfolgte Synthese erklärt auch das stark unterschiedliche Benetzungsverhalten der UV-Polymere gegenüber der PTFE- und der Prägeformoberfläche in Tab. 5.2. Während hier die UV-Polymere aus der NIF-Serie einen Kontaktwinkel von etwa 12° mit der PTFE-Oberfläche zeigten, wurde für die restlichen UV-Polymere ein Kontaktwinkel von über 70° gemessen. Der geringe Wert für die Kontaktwinkel der UV-Polymere aus der NIF-Serie gegenüber der PTFE-Oberfläche lässt darauf schließen, dass diese UV-Polymere zu großen Teilen aus PTFE-ähnlichen Komponenten bestehen. Diese These wird durch die geringe Oberflächenspannung der UV-Polymere aus der NIF-Serie gestützt. Während Teflon™ (Handelsname für PTFE von der Firma DuPont) eine Oberflächenenergie von etwa 18 mN/m besitzt, wurden für die UV-Polymere NIF-1-A und NIF-2 Oberflächenspannungen von 22,2 mN/m und für NIF-A-5b,c,d Oberflächenspannungen von 24,3 mN/m ermittelt.

Die niedrigen Werte für die Oberflächenspannung der UV-Polymere aus der NIF-Serie sind ein Hinweis darauf, dass sie prinzipiell eine geringere Haftung zu Oberflächen zeigen werden, als die restlichen UV-Polymere. Dies gilt sowohl für die Prägeform- als auch für die Substratoberflächen. Wie sich nun das unterschiedliche Benetzungsverhalten und die Oberflächenspannungen der UV-Polymere auf die Haftungseigenschaften auswirken, wird im folgenden Kapitel geklärt.

### 5.2.3 Charakterisierung der Haftung

Die Haftung zwischen den UV-Polymeren sowie der Substrat- und der Prägeformoberfläche ist ein wichtiger Aspekt für den erfolgreichen Einsatz der UV-NIL. Bleibt nach einem Prägevorgang teilweise das UV-Polymer an der Prägeform zurück, so verhindert dieses die nachfolgende Prägung, da sich Prägeform und Substrat nicht mehr in dem Maße annähern können, dass das UV-Polymer zwischen Prägeform und Substrat verfließen kann. Im günstigsten Fall bleibt der Lackrest (Partikel) in dem UV-Polymer der folgenden Prägung haften, wobei man von einem Selbstreinigungseffekt spricht. In vielen Fällen bleibt der Partikel allerdings auf Grund elektrostatischer Kräfte an der Prägeform zurück. Um das Anhaften des UV-Polymers an der Prägeform zu vermeiden, wird die Oberfläche der Prägeform mit einer Antihafschicht bedeckt, die durch den Prägeprozess nicht abgenutzt werden darf. Die Antihafschicht kann z.B. auf

Grund der UV-Belichtung oder der Wechselwirkung mit dem UV-Polymer angegriffen werden.

Um die Haftungseigenschaften der UV-Polymere zu untersuchen wurden Prägungen auf verschieden vorbehandelten Si-Substratoberflächen durchgeführt. Die unstrukturierte Prägeform war für diese Experimente mit einer Antihafschicht ( $F_{13}$ TCS) versehen. Nach den Prägungen wurde mit einem Lichtmikroskop charakterisiert, in welchem Maß das UV-Polymer auf dem Substrat, bzw. an der Prägeform haften geblieben ist. Als Substrat wurde Si gewählt, welches in gereinigter Form vorlag oder beschichtet wurde. Als Beschichtungen wurden HMDS, ARC und PMMA gewählt (vgl. Kapitel 5.2.1). Die Zusammenfassung der Haftungsergebnisse ist in Tab. 5.6 aufgeführt. Hierbei ist ein vollständiges Haften an einer Oberfläche mit ++, bis 80% mit +, bis 60% mit 0, bis 40% mit - und bei weniger als 40% Haftung mit -- gekennzeichnet.

Tab. 5.6: *Experimentell ermittelte Haftungseigenschaften zwischen ausgewählten UV-Polymeren und verschiedenen Oberflächen. Wenn das UV-Polymer komplett an einer Oberfläche nach der Separation haften blieb, so ist dies mit ++, bis 80% mit +, bis 60% mit 0, bis 40% mit - und bei weniger als 40% Haftung mit -- gekennzeichnet (n.u.: nicht untersucht, Prägeform beschichtet mit  $F_{13}$ TCS)*

	<b>Prägeform</b>	<b>Si</b>	<b>Prägeform</b>	<b>Si / HMDS</b>	<b>Prägeform</b>	<b>Si / ARC oder PMMA</b>
Helioseal	--	++	n.u.	n.u.	n.u.	n.u.
Z-Lack	--	++	+	--	++	--
Inoflex RP+	--	+	-	-	--	++
PAK-01	--	++	--	++	--	++
NIF-1-A	++	--	0	--	--	++
NIF-2	++	--	0	--	--	++
NIF-A-5b,c,d	++	--	0	--	--	++

Für einen sich wiederholenden Prägeprozess sind hier nur die Kombinationen geeignet, bei denen das UV-Polymer komplett auf dem Substrat haften bleibt und keinerlei Haftung zur Prägeform aufweist. So haften die UV-Polymere aus der NIF-Serie auf Grund des PTFE-ähnlichen Charakters auf gereinigten Si-Substraten nicht, weswegen diese Kombination ungeeignet ist. Auf gereinigten Si-Oberflächen zeigen dagegen die UV-Polymere Helioseal und Z-Lack eine hohe Haftung. Für die restlichen UV-Polymere wurde die höchste Adhäsion zu dem Si-Substrat ermittelt, wenn dieses mit der ARC oder mit PMMA beschichtet vorlag. Die Beschichtung auf dem Substrat erhöht die Restlackschichtdicke und muss vor der Strukturüber-

tragung ins Si-Substrat entfernt werden. Da die PMMA Schichtdicke nach der Optimierung der Beschichtung nur 10 nm betragen hat und die der ARC 80 nm, wurde für die folgenden Untersuchungen die PMMA-Schicht bevorzugt verwendet.

Das hier verwendete PMMA besteht aus Acrylaten mit einem Molgewicht von 600 k und kommt ursprünglich als Lack für die Elektronenstrahl-Lithografie zum Einsatz. Er zeichnet sich unter anderem durch seine hohe Haftung zu Si- und Glassubstraten, sowie zu den meisten Metallen aus. Entscheidend für die Haftung ist, dass der Elektronenstrahllack komplett und die UV-Polymere mindestens teilweise aus Acrylaten bestehen, weswegen hier zumeist eine hohe spezifische Adhäsion gegeben ist, da die Ausbildung des oben beschriebenen „weak boundary layers“ vermieden wird. Selbst die Zusammensetzung der UV-Polymere aus der NIF-Serie, für die eine Verringerung der Haftung zu Oberflächen im Allgemeinen vorhergesagt wurde, zeigten keinen negativen Einfluss auf die Haftung zu den mit PMMA beschichteten Si-Substraten. Mit den Ergebnissen in Tab. 5.6 wurden geeignete Substratvorbehandlungen evaluiert, womit eine möglichst optimale Haftung zwischen UV-Polymeren und Si-Substraten erreicht werden kann. Dies stellt eine wichtige Voraussetzung für defektfreie Prägungen dar.

### 5.3 Untersuchung der Restlackschichtdicke

Die Restlackschicht (siehe Abb. 2.10) bildet sich zwischen dem Substrat und den Erhebungen der Prägeform aus und muss vor einer Substratstrukturierung entfernt werden. Dies geschieht in einem Plasmaätzprozess, bei dem die geprägten Strukturen in ihrer Dimension verändert werden können. Daher muss die Restlackschichtdicke so gering wie möglich gehalten werden und sollte für eine maßhaltige Substratstrukturierung deutlich geringer sein als die Höhe der geprägten Strukturen.

Der Einfluss der Viskosität eines UV-Polymers auf die Restlackschichtdicke kann theoretisch nach Gl. (2.6) bestimmt werden, wenn die Anfangslackschichtdicke sehr viel größer ist als die Restlackschichtdicke und ansonsten gleichbleibende Prägebedingungen gelten. Zu den konstanten Prägebedingungen zählen die Prägedauer, der Prägedruck, das Volumen des aufgetragenen UV-Polymers, die Vorbehandlung der Substratoberfläche und die Prägeform. Um die Gültigkeit der Gl. (2.6) experimentell zu überprüfen und einen optimalen Prägelack im Hinblick auf eine minimale Restlackschichtdicke zu erhalten, wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt und deren Einfluss auf die Restlackschichtdicke ermittelt.

Für die experimentelle Überprüfung der Gleichung Gl. (2.6) wurden 200 nl des untersuchten UV-Polymers mit einer Pipette auf die Prägefläche aufgebracht. Dieses Volumen entspricht mindestens dem 10-fachen Volumen, das für den Prägevorgang erforderlich ist. Die Prägung

erfolgte gleich im Anschluss mit einer 12,5·12,5 mm<sup>2</sup> großen Prägeform, die a) keine Strukturen und b) 50% Gräben mit einer Breite von 100 nm bis zu einigen 100 µm sowie einer Tiefe von 200 nm hatte. Im Anschluss wurden für die Prägeform ohne Strukturen je zwei Imprints pro UV-Polymer angeritzt und die Restlackschichtdicke an 25 Punkten pro Imprint mit dem Stufenhöhenmessgerät P-2 von KLA Tencor gemessen. Für die Prägeform mit Strukturen erfolgte die Messung der Restlackschichtdicke an 2 Imprints pro UV-Polymer (je 25 Messpunkte) mit dem Interferometer MPV SP von Leitz.

In Abb. 5.1 ist die Restlackschichtdicke  $h_f$  der untersuchten UV-Polymere über der Wurzel aus deren Viskosität  $\mu$  aufgetragen. Für die UV-Polymere, die mit der blanken Prägeform bearbeitet wurden ist zu erkennen, dass, wie theoretisch in Gl. (2.6) vorhergesagt, die Restlackschichtdicke mit der Wurzel aus der Viskosität ansteigt, wobei die geringste Restlackschichtdicke zu 483 nm für den Z-Lack bestimmt wurde.

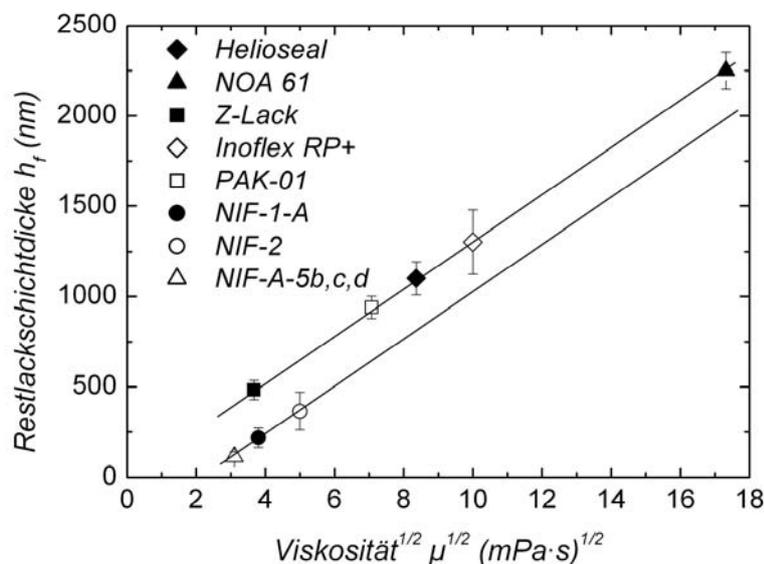


Abb. 5.1: Darstellung der experimentell ermittelten Werte für die Restlackschichtdicke verschiedener UV-Polymere. Die UV-Polymere aus NIF-Serie wurden mit einer Prägeform strukturiert, die zu 50% aus Gräben mit variabler Breite und einer Tiefe von 200 nm bestand, die restlichen UV-Polymere wurden mit einer unstrukturierten Prägeform bearbeitet. Die Geraden wurden eingefügt, um die Abhängigkeit der Restlackschichtdicke von der Viskosität zu verdeutlichen

Werden die Prägebedingungen geändert, indem im konkreten Fall eine Prägeform mit Strukturen gewählt wurde, so bleibt zwar die Wurzelabhängigkeit erhalten, allerdings sorgen die Gräben in der Prägeform für eine deutliche Verringerung der Restlackschichtdicke. So betragen bei etwa gleicher Viskosität die Restlackschichtdicken für das UV-Polymer NIF-1-A

218 nm und für den Z-Lack 490 nm. Die geringste Restlackschichtdicke wurde für NIF-A-5b,c,d mit 112 nm ermittelt. Somit wurde die Gültigkeit von Gl. (2.6) experimentell bestätigt. Für den Einsatz als Maskierung für die Substratstrukturierung muss die Restlackschichtdicke geringer sein als die Höhe der geprägten Strukturen (maximal 250 nm). In Abb. 5.1 wird diese Voraussetzung nur von UV-Polymeren erfüllt, die eine Viskosität kleiner als 15 mPa·s haben. Für die Untersuchungen wurde allerdings mit einem hohen Lacküberschuss gearbeitet. Durch eine gezielte Reduzierung der Anfangslackmenge mittels eines „Dispense“-Systems kann die Restlackschichtdicke weiter reduziert werden. Aus diesem Grund wurden weiterhin UV-Polymere mit einer Viskosität kleiner als 50 mPa·s als Kandidaten untersucht, um eine Restlackschichtdicke deutlich geringer als 250 nm zu erreichen. In Abb. 5.1 erkennt man zusätzlich, dass mit steigender Viskosität die Homogenität der Restlackschichtdicke abnimmt. Dies ist auf die reduzierte Fließfähigkeit von Flüssigkeiten mit steigender Viskosität zurückzuführen.

Für die prinzipiellen Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses der Viskosität auf die Restlackschichtdicke wurde mit einem hohen Lacküberschuss gearbeitet. Um den Lack nun definiert und gezielt auf die Prägefläche aufzubringen, standen im Rahmen der Arbeit zwei „Dispense“-Systeme an der Imprintanlage zur Verfügung: Ein Eintropfendosierer und ein „Ink-Jet“-System. Mit dem Eintropfendosierer konnten UV-Polymere mit einer Viskosität größer als 50 mPa·s und mit dem „Ink-Jet“-System UV-Polymere mit einer Viskosität zwischen 8 mPa·s und 20 mPa·s verteilt werden. Im Folgenden wird untersucht, in wie weit mit einer geeigneten Kombination aus „Dispense“-System und UV-Polymer die Restlackschichtdicke minimiert werden kann.

In Abb. 5.2 ist die Abhängigkeit der Restlackschichtdicke  $h_f$  des UV-Polymeren PAK-01 von dem dispensierten Lackvolumen  $V$  gezeigt, wobei mit dem experimentell ermittelten Lackvolumen 1 die Menge beschrieben wird, die mindestens notwendig ist, um eine geschlossene Lackschicht zu erhalten. Für diese Untersuchung wurde der Eintropfendosierer sowie eine Prägeform ohne Strukturen verwendet. Abb. 5.2 zeigt, dass die Restlackschichtdicke  $h_f$  mit steigenden dispensierten Volumen zunimmt. So beträgt die Restlackschichtdicke 420 nm für das einfache dispensierte Volumen und etwa 1020 nm für das fünffache dispensierte Volumen. Des Weiteren ist eine Sättigung der Restlackschichtdicke für hohe dispensierte Volumina zu erkennen. Auf Grund der minimal erreichten Restlackschichtdicke von 420 nm ist diese Kombination aus UV-Polymer und „Dispense“-System zur Strukturierung im nm-Bereich nicht geeignet.

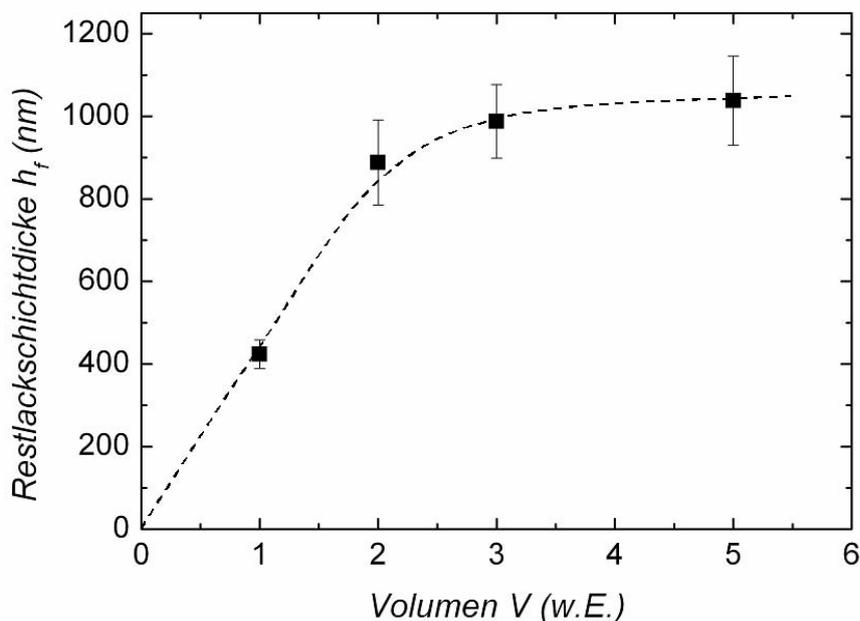


Abb. 5.2: Darstellung der Abhängigkeit der Restlackschichtdicke  $h_f$  des UV-Polymer PAK-01 vom dispensierten Volumen  $V$ . Die gestrichelte Linie wurde eingefügt, um die Anschaulichkeit zu verbessern

In Abb. 5.3 ist die Abhängigkeit der Restlackschichtdicke  $h_f$  des UV-Polymer NIF-1-A von dem dispensierten Lackvolumen  $V$  gezeigt, wobei auch hier mit dem Lackvolumen 1 die experimentell bestimmte Menge beschrieben wird, die mindestens notwendig ist, um eine geschlossene Lackschicht zu erhalten. Für diese Untersuchung wurde das „Ink-Jet“-System sowie eine Prägeform verwendet, die zu 50% aus Gräben mit einer Breite zwischen 100 nm und einigen 100  $\mu\text{m}$  sowie einer Tiefe von 200 nm besteht.

In Abb. 5.3 ist zu erkennen, dass die Restlackschichtdicke unter Verwendung des „Ink-Jet“-Systems deutlich reduziert werden kann. Während man für das 10-fach notwendige Lackvolumen eine Restlackschichtdicke von 185 nm erhält, reduziert sich diese auf etwa 31 nm für das einfache Lackvolumen. Somit konnte mit dem „Ink-Jet“-System in Kombination mit einem geeigneten UV-Polymer die Restlackschichtdicke auf einen Wert von ca. 31 nm reduziert werden, was für die Strukturierung im nm-Bereich sehr gut geeignet ist. In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass zum Erreichen dieses geringen Wertes im Vorfeld die Verteilung der Lacktropfen optimiert wurde und diese Ergebnisse nicht 1:1 auf jede Prägeform übertragen werden können. Zusätzlich muss beachtet werden, dass die Strukturen auf der Prägeform bei jedem Prägeprozess durch das UV-Polymer komplett gefüllt sein müssen, weswegen es von Vorteil ist, ein höheres UV-Polymer Volumen zu wählen, um sicher zu gehen, dass trotz prozessbedingter Schwankungen die Strukturen bei jeder Prägung komplett gefüllt sind.

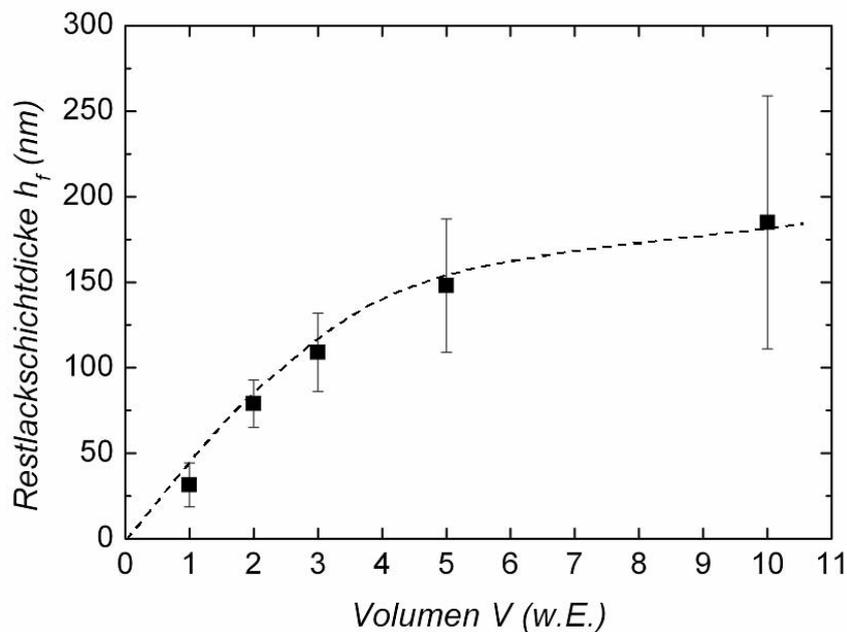


Abb. 5.3: Darstellung der Abhängigkeit der Restlackschichtdicke  $h_f$  des UV-Polymer NIF-1-A vom dispensierten Volumen  $V$ . Die gestrichelte Linie wurde eingefügt, um die Anschaulichkeit zu verbessern

#### 5.4 Wechselwirkung mit Antihafschichten

Die Haftung zwischen UV-Polymeren und Substratoberflächen wurde bereits in Kapitel 5.2.3 diskutiert. Es zeigte sich hierbei, dass durch das Aufbringen einer PMMA-Schicht die Haftung zwischen UV-Polymeren und Si-Substraten entscheidend erhöht werden kann, was für einen erfolgreichen Prägeprozess entscheidend ist. Die gegenteilige Anforderung ist für die Haftung zwischen UV-Polymer und Quarzprägeform notwendig. Hier darf das ausgehärtete UV-Polymer keine Tendenz zeigen, an der Prägeform haften zu bleiben. Da Acrylate allerdings im Allgemeinen sehr gut an Quarzoberflächen haften, muss die Prägeformoberfläche, wie bereits in Kapitel 4.5 diskutiert, mit einer Antihafschicht versehen werden. Die Modifizierung der Prägeformoberfläche erfolgte durch die Modifikation der Prägeformoberfläche mit  $F_{13}$ TCS oder mit Optool DSX™ aus der Flüssigphase. Die abgeschiedene Schicht wurde charakterisiert, indem die Oberflächenenergie der Quarzprägeformen vor und nach der Modifikation bestimmt wurde (vgl. Kapitel 4.5). Während für blanke Quarzoberflächen eine Oberflächenenergie von 94,7 mN/m ermittelt wurde, betrug die Oberflächenenergie nach der Schichtabscheidung etwa 15,4 mN/m.

Die modifizierten Quarzoberflächen ermöglichen eine partikelfreie Separation von dem gehärteten UV-Polymer, allerdings kann es durch die Wechselwirkung des UV-Polymer mit der

Antihafschicht zu einer Abnutzung derselben kommen. Hierdurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass mit einer steigenden Anzahl an Prägungen Defekte auftreten. Kommt es zu einer Abnutzung, so kann die Prägeform nur für eine bestimmte Anzahl an Prägeprozessen verwendet werden, bevor die Schicht wieder erneuert werden muss. Hierdurch erhöhen sich die Kosten für den Gesamtprägeprozess, weshalb das Aufbrauchen der Antihafschicht durch die Wechselwirkung mit dem UV-Polymer vermieden werden muss.

Um nun die Wechselwirkungen zwischen UV-Polymeren und den zwei ausgewählten Antihafschichten (F<sub>13</sub>TCS und Optool DSX) zu untersuchen, wurden Experimente mit dem Ziel durchgeführt, die beste Kombination aus UV-Polymer und Antihafschicht zu erhalten. Da keine etablierte Methode zur Bestimmung der Abnutzung der Antihafschicht in der Literatur beschrieben wird, wurde hierfür als Messgröße die Änderung der Oberflächenenergie einer nicht strukturierten modifizierten Quarzprägeform für eine steigende Anzahl an Prägungen gewählt. Wie bereits beschrieben, beträgt die Oberflächenenergie der unbehandelten Prägeformoberfläche 94,7 mN/m, welche durch die Modifikation auf etwa 15,4 mN/m reduziert wird. Kommt es nun auf Grund von Wechselwirkungen zwischen dem UV-Polymer und der Antihafschicht zu einer Degeneration der Antihafschicht, so kann dies in einem Anstieg der Oberflächenenergie gemessen werden.

In Abb. 5.4 ist die Änderung der Oberflächenenergie  $\sigma$  für eine steigende Anzahl an Prägungen in das UV-Polymer PAK-01 gezeigt. Für die Untersuchung wurden zwei Prägeformen verwendet, wobei die eine mit F<sub>13</sub>TCS und die andere mit Optool DSX behandelt wurde. Für beide Antihafschichten zeigt sich, dass die Oberflächenenergie mit der Anzahl an Prägungen steigt. Dies ist eine Folge der Wechselwirkung zwischen dem UV-Polymer PAK-01 und den zwei untersuchten Antihafschichten, welche für eine Abnutzung der Schichten sorgt. Während allerdings die Trennung zwischen PAK-01 und Optool DSX nach 250 Prägungen noch rückstandsfrei erfolgt, blieb das UV-Polymer PAK-01 nach 189 Prägungen komplett an der Prägeform haften. Der Anstieg der Oberflächenenergie auf 61 mN/m nach 250 Prägungen für die Kombination Optool DSX und PAK-01 lässt darauf schließen, dass auch hier bald ein Verlust der Antihafwirkung eintreten wird, weswegen das UV-Polymer PAK-01 in Kombination mit den beiden untersuchten Antihafschichten nicht geeignet ist, um eine große Anzahl an Prägeprozessen durchführen zu können. Auf Grund des früheren Verlustes der Antihafwirkung von der mit F<sub>13</sub>TCS behandelten Prägeformoberfläche, wurde im Folgenden die Antihafschicht Optool DSX weiter untersucht.

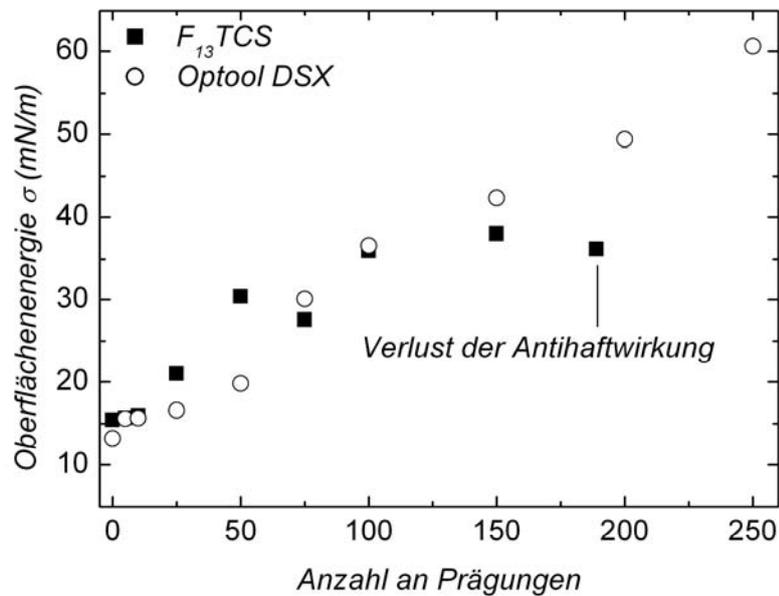


Abb. 5.4: Darstellung der Änderung der Oberflächenenergie  $\sigma$  für eine steigende Anzahl an Prägungen für zwei Prägeformen, die mit  $F_{13}TCS$  bzw. mit Optool DSX beschichtet wurden. Als UV-Polymer wurde PAK-01 verwendet

In Abb. 5.5 ist der Verlauf der Oberflächenenergie  $\sigma$  für eine steigende Anzahl an Prägungen in die UV-Polymere NIF-1-A und PAK-01 gezeigt. Die Prägeformoberfläche wurde in beiden Fällen mit der Antihafschicht Optool DSX bedeckt. Für die Kombination Optool DSX und NIF-1-A konnte für bis zu 500 Prägeprozesse kein Anstieg der Oberflächenenergie der Prägeformoberfläche gemessen werden. So sind hier mindestens 500 Prägeprozesse, evtl. aber auch eine deutliche höhere Anzahl möglich. Die maximale Anzahl an möglichen Prägeprozessen wurde im Rahmen der Arbeit auf Grund des hierfür notwendigen Zeit- und Kostenaufwands nicht ermittelt. Insgesamt ist hier eine geeignete Kombination aus Antihafschicht und UV-Polymer gegeben. Diese große Anzahl an Prägeprozessen ist möglich, da es keine messbare, abnutzende Wechselwirkung zwischen dem UV-Polymer NIF-1-A und der Antihafschicht Optool DSX gibt. Hauptsächlich wird die nicht messbare Abnutzung durch die Zusammensetzung des UV-Polymers NIF-1-A verursacht. Diese sorgt generell dafür, dass das UV-Polymer eine geringe Tendenz zur Haftung an Oberflächen zeigt. Durch die PTFE-ähnliche Beschichtung der Prägeform wird diese Tendenz zusätzlich reduziert.

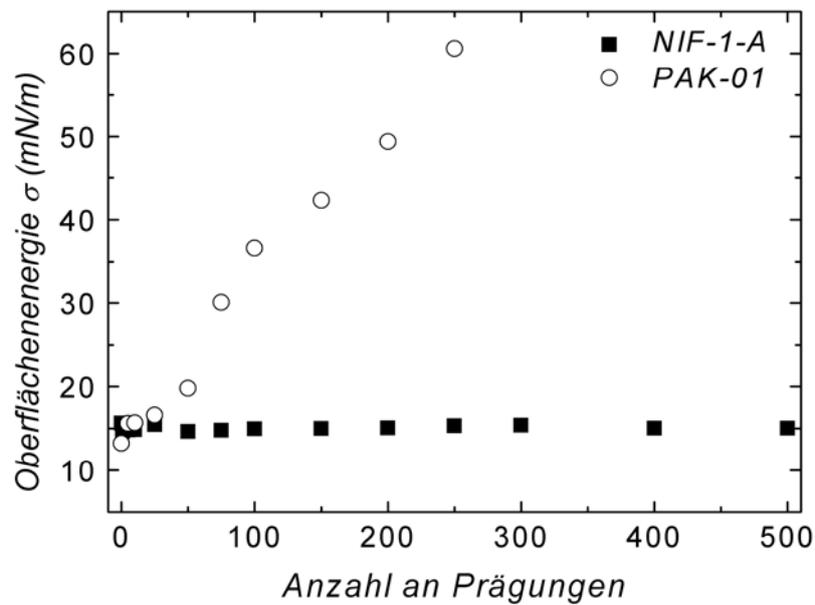


Abb. 5.5: Darstellung der Änderung der Oberflächenenergie  $\sigma$  für eine steigende Anzahl an Prägungen für die zwei UV-Polymere NIF-1-A und PAK-01. Die Prägeformen waren jeweils mit Optool DSX beschichtet

Somit steht mit den UV-Polymeren aus der NIF-Serie, den mit Optool DSX behandelten Quarzprägeformen und den mit PMMA-beschichteten Si-Substraten eine geeignete Materialkombination für die Strukturübertragung zur Verfügung, die im Folgenden auf ihre Eignung zur Strukturierung im nm-Bereich untersucht werden kann.

## 6 Strukturübertragung und Anwendung

Mit der Herstellung von Quarzprägeformen, der Evaluierung von geeigneten UV-Polymeren, Substratvorbehandlungen und Antihafschichten wurden wichtige Voraussetzungen geschaffen, um die UV-NIL als Nanostrukturierungsverfahren einsetzen zu können. Als Beispiel für die Nanostrukturierung sind in Abb. 6.1 Nanoimprints in ein UV-Polymer gezeigt, wobei die Strukturbreiten auf der linken Abbildung von 50 nm (drei obere Linienscharen) bis 70 nm (vier untere Linienscharen) und auf der rechten Abbildung von 100 nm bis 200 nm reichen.

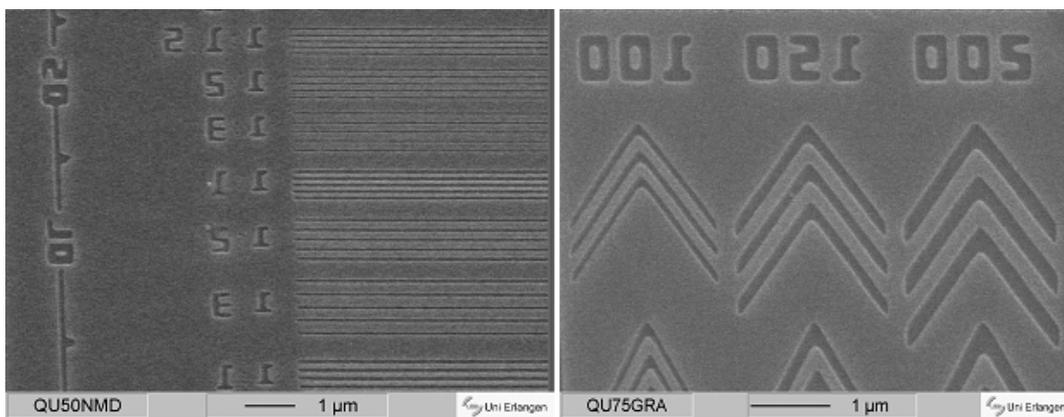


Abb. 6.1: REM-Aufnahmen von Nanoimprints in ein UV-Polymer. Die Strukturbreiten betragen auf der linken Abbildung 50 nm (drei obere Linienscharen) und 70 nm (vier untere Linienscharen) bzw. 100 nm, 150 nm und 200 nm auf der rechten Abbildung

Um von der Übertragung der Prägeformstrukturen in ein UV-Polymer zu einem elektronischen Bauelement zu gelangen, ist es notwendig, eine Vielzahl weiterer Prozessschritte zu untersuchen und zu optimieren. In diesem Zusammenhang spielt vor allem die Maßhaltigkeit der Strukturübertragung eine große Rolle, da für die Eigenschaften eines elektronischen Bauelementes die kritischen Dimensionen eine maßgebliche Größe darstellen. Um eine hohe Maßhaltigkeit zu erreichen, muss sich eine möglichst homogene und dünne Restlackschichtdicke durch den Prägeprozess ausbilden. Außerdem müssen die Ätzprozesse zur Strukturübertragung optimiert werden.

Im Folgenden werden die UV-Polymere aus der NIF-Serie als Maskierungsschicht untersucht, da diese UV-Polymere zum einen auf Grund ihrer geringen Viskosität dünne Restlackschichtdicken ermöglichen und zum anderen durch ihre geringe Wechselwirkung mit der Antihafschicht Optool DSX für eine gleichbleibende Qualität sorgen (siehe Kapitel 5.4). Daher werden die UV-Polymere aus der NIF-Serie verwendet, um die Gatefinger von n-Kurzkanal MOSFET

zu strukturieren und somit sowohl das Potential der UV-NIL als Nanostrukturierungsverfahren als auch die Kompatibilität der UV-NIL zu etablierten Si-Halbleitertechnologien zu demonstrieren.

### 6.1 Prinzipieller Aufbau und Funktion von MOSFETs

Transistoren gehören zu den wichtigsten elektronischen Bauelementen. Sie werden zum Verstärken und Schalten elektrischer Signale verwendet [Her99]. Die ersten MOSFETs wurden zuerst 1960 auf einem thermisch oxidierten Si-Substrat gefertigt [Kah60]. Bei einem MOSFET gibt es drei Elektroden, die Steuerelektrode (Gate), die Quelle (Source) und die Senke (Drain). Unterscheidet sich der Leitungstyp (p oder n) von Source bzw. Drain und dem dazwischen liegenden Gebiet, so spricht man bei einem MOSFET von Anreicherungstyp, sind sie gleich, vom Verarmungstyp. Im Falle des Anreicherungstyps sperrt stets ein pn-Übergang zwischen dem Source- und dem Draingebiet, weshalb kein Strom fließen kann. Um einen Stromfluss zwischen Source und Drain zu erhalten, muss eine Inversionsschicht (Kanal  $L$ ) zwischen beiden Elektroden erzeugt werden. Je nachdem, welche Ladungsträger überwiegend im Kanal vorliegen, spricht man von einem p-Kanal MOSFET (für eine p-Inversionsschicht) oder von einem n-Kanal MOSFET (für eine n-Inversionsschicht). Der schematische Aufbau eines n-Kanal MOSFETs ist in Abb. 6.2 gezeigt.

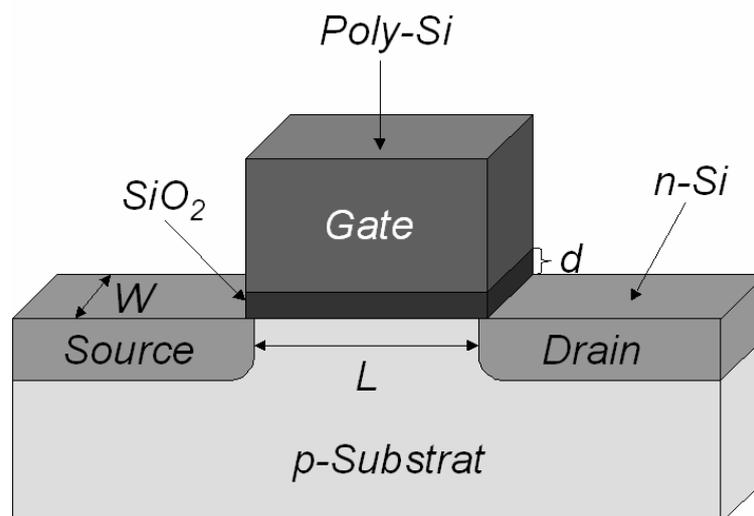


Abb. 6.2: Schematischer Aufbau eines n-Kanal MOSFETs

Zwischen dem Kanal und dem Gate befindet sich eine elektrisch isolierende  $\text{SiO}_2$ -Schicht. Die Schichtfolge Gate,  $\text{SiO}_2$ -Schicht und Substrat bildet einen Kondensator. Bei einem n-Kanal MOSFET werden nun durch das Anlegen einer geringen positiven Spannung an das Gate ( $U_G$ )

Defektelektronen durch das elektrische Feld aus dem oberflächennahen Bereich des p-Halbleiters verdrängt und hinterlassen negativ geladenen Akzeptorrümpfe. Das Leitungsband  $E_L$  und das intrinsische Fermienergie  $E_{Fi}$  verbiegen sich an der Grenzschicht  $\text{SiO}_2/\text{p-Halbleiter}$  in Richtung Fermienergie  $E_F$ . Es bildet sich eine Raumladungszone im Halbleiter aus. Dieser Vorgang wird Verarmung genannt. Erhöht man die Gatespannung  $U_G$ , so resultiert eine stärkere Bandverbiegung und das intrinsische Fermienergie  $E_{Fi}$  fällt unter das Fermienergie  $E_F$ . In diesem Zustand ist das Leitungsband  $E_L$  näher an dem Fermienergie  $E_F$  als das Valenzband  $E_V$  und der Leitungstyp wechselt an der Grenzfläche  $\text{SiO}_2/\text{p-Halbleiter}$  von p-leitend zu n-leitend. Dieser Zustand wird schwache Inversion genannt. Bei einem weiteren Anstieg der Gatespannung  $U_G$  wird auch die Bandverbiegung größer und die Elektronenkonzentration an der Grenzfläche steigt weiter an. Wird die Elektronenkonzentration in der Grenzschicht so groß wie die Defektelektronenkonzentration im Substrat ist, so ist die Ausdehnung der Raumladungszone maximal. Die hierfür notwendige Gatespannung  $U_G$  wird Einsatzspannung  $U_{Th}$  genannt. Bei einem weiterem Anstieg der Gatespannung  $U_G$  befindet man sich im Bereich der starken Inversion [Wol95].

Der entstandene n-leitende Kanal verbindet nun die beiden n-Gebiete Source und Drain, wodurch Ladungsträger von Source nach Drain fließen können [Nea92]. Die Spannung zwischen Source und Drain wird mit  $U_D$  und der resultierende Strom mit  $I_D$  bezeichnet. Die Strom-Spannungs Kennlinie (Ausgangskennlinie) eines n-Kanal MOSFETs bei konstantem  $U_G$  (siehe Abb. 6.3) wird idealisiert in unterschiedliche Bereiche eingeteilt [Nea92]:

- Wenn  $U_G$  größer als  $U_{Th}$  und die Spannung  $U_D$  gering ist, dann bildet sich ein Inversionskanal aus, der über die gesamte Länge  $L$  eine gleichmäßige Ladungsträgerdichte besitzt. Der Strom  $I_D$  steigt linear mit der Spannung an. Man befindet sich daher im sogenannten linearen Bereich (siehe Abb. 6.3, Bereich 1)).
- Steigt  $U_D$  an, so sinkt der Potentialabfall über dem Oxid an der Drainseite, weshalb auch die induzierte Inversionsladung an der Drainseite reduziert wird. Daher wird der differentielle Leitwert des Kanals an der Drainseite reduziert, weshalb die Steigung der Strom-Spannungskurve ebenfalls sinkt. Man befindet sich im sogenannten Triodenbereich (siehe Abb. 6.3, Bereich 2)).
- Wenn  $U_D$  bis zu dem Punkt ansteigt, an dem der Potentialabfall über dem Oxid an der Drainseite  $U_{Th}$  entspricht, so ist die Ladungsträgerdichte an der Drainseite Null. An diesem Punkt ist der differentielle Leitwert am Drain und folglich die Steigung der Strom-Spannungskennlinie ebenfalls Null. Man befindet sich am Abschnürpunkt („pinch-

off“). Die entsprechende Spannung wird Sättigungsspannung  $U_{D,Sat}$  genannt (siehe Abb. 6.3, Punkt 3)).

- Wird  $U_D$  weiter erhöht, so verschiebt sich der Punkt, an dem der Kanal abschnürt zum Sourcegebiet ( $\Delta L$ ). Treffen die aus dem Sourcegebiet in den Kanal injizierten Elektronen an den Abschnürpunkt, so werden sie durch das elektrische Feld in der Raumladungszone zum Drain gezogen. In diesem Bereich steigt der Strom nicht an. Man befindet sich im Sättigungsbereich (siehe Abb. 6.3, Bereich 4)).

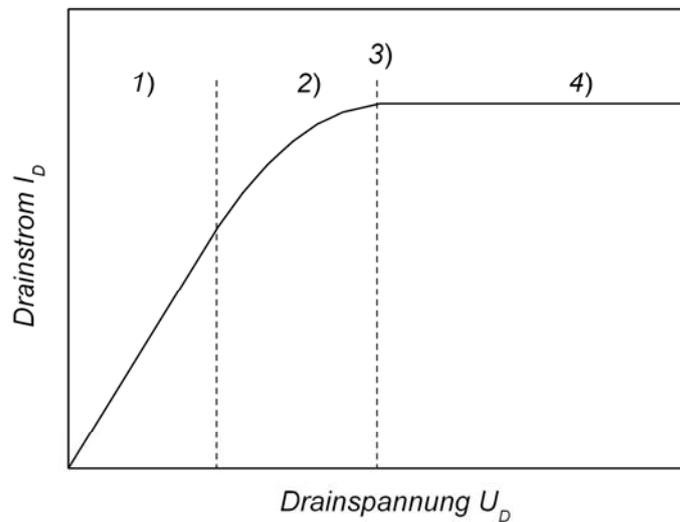


Abb. 6.3: Ausgangskennlinie eines n-Kanal MOSFETs mit 1) linearer Bereich, 2) Triodenbereich, 3) Abschnürpunkt und 4) Sättigungsbereich

Betrachtet man die Strom-Spannungsbeziehung für den Fall, dass  $\Delta L$  sehr viel kleiner als die Kanallänge  $L$  ist (idealer Fall), so bleibt  $I_D$  konstant für  $U_D$  größer als  $U_{D,Sat}$  und es gilt Gl. (6.1). Im linearen Bereich eines idealen n-Kanal MOSFETs gilt die Strom-Spannungsbeziehung nach Gl. (6.2) [Nea92]:

$$I_D = \frac{W\mu_n C_{OX}}{2L} (U_G - U_{Th})^2. \quad (6.1)$$

$$I_D = \frac{W\mu_n C_{OX}}{L} (U_G - U_{Th})U_D. \quad (6.2)$$

Hier sind  $W$  die Kanalweite,  $\mu_n$  die Beweglichkeit der Elektronen,  $C_{OX}$  die Oxidkapazität und  $L$  die Kanallänge.

Geht man vom nicht-idealen Fall aus (Kurzkanal MOSFETs mit  $L$  kleiner als  $0,8 \mu\text{m}$ ), so hat die Reduzierung der Kanallänge  $\Delta L$  einen erheblichen Einfluss auf die Ausgangskennlinie. Ein steigendes  $U_D$  bewirkt eine stetige Reduzierung der Kanallänge und folglich eine Erhöhung des Drainstroms  $I_D$ , weshalb der Transistor nicht mehr in die Sättigung nach Gl. (6.1) kommt. Dieser Effekt wirkt umso stärker, je geringer die Kanallänge  $L$  ist [Nea92].

Neben der Ausgangskennlinie eines Transistors wird üblicherweise auch die sogenannte Übertragungskennlinie aufgenommen. Hierbei wird der Drainstrom  $I_D$  über der Gatespannung  $U_G$  bei konstanter Drainspannung  $U_D$  aufgetragen. Die Übertragungskennlinie eines n-Kanal MOSFETs ist in Abb. 6.4 dargestellt. Aus dieser kann man die Einsatzspannung  $U_{Th}$  bestimmen. Für die Bestimmung der Einsatzspannung gibt es verschiedene Verfahren [Ort02], wobei im Rahmen der Arbeit die Einsatzspannung  $U_{Th}$  des Transistors aus der Übertragungskennlinie im linearen Bereich durch Extrapolieren bestimmt wurde [San02]. Bei dieser Methode wird im linearen Bereich die Übertragungskennlinie auf die x-Achse extrapoliert. Der resultierende Schnittpunkt entspricht der Einsatzspannung  $U_{Th}$  (siehe Abb. 6.4).

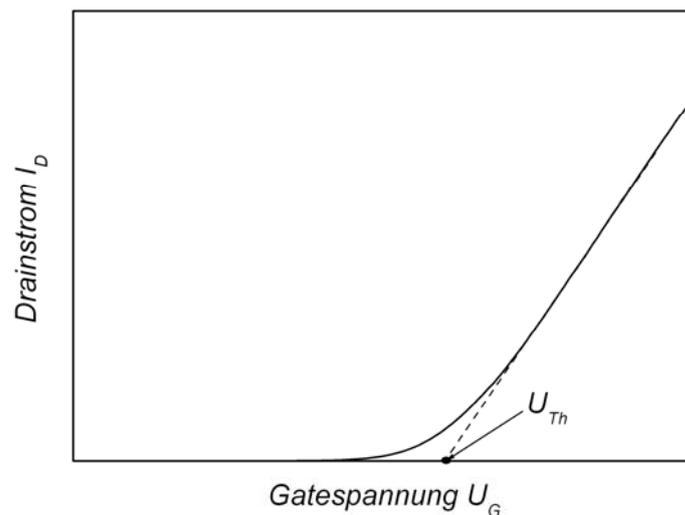


Abb. 6.4: Übertragungskennlinie eines n-Kanal MOSFETs

Die Einsatzspannung wird von unterschiedlichen Kenngrößen bestimmt und wird für den idealen n-Kanal MOSFET nach Gl. (6.3) berechnet [Nea92]:

$$U_{Th} = U_{FB} + 2\Phi_B + \frac{Q_{HL}}{C_{OX}}. \quad (6.3)$$

Hier ist  $U_{FB}$  die Flachbandspannung,  $\Phi_B$  die Potentialdifferenz zwischen dem Fermi-Potential  $E_F$  auf Grund der Substratdotierung und dem intrinsischen Fermi-Potential  $E_{Fi}$  sowie  $Q_{HL}$  die

Ladung im Substrat bei der Einsatzspannung [Nea92]. Für Kurzkanal MOSFETs beeinflussen zusätzliche Effekte die Einsatzspannung  $U_{Th}$ . So müssen für Kurzkanal MOSFETs die von Source und Drain in das Kanalgebiet reichenden Raumladungszonen zusätzlich betrachtet werden. Durch diese wird der Anteil der Ladung, die durch das Gate kontrolliert wird, reduziert und die Einsatzspannung verschiebt sich mit reduzierter Kanallänge für n-Kurzkanal MOSFETs ins Negative. Dieser Effekt ist umso ausgeprägter, je kleiner die Abmessung der Kanallänge ist [Nea92].

Wird der Drainstrom  $I_D$  logarithmisch über der Gatespannung  $U_G$  aufgetragen, so kann man aus der Übertragungskennlinie im Bereich von Gatespannungen unterhalb der Einsatzspannung (schwache Inversion) den Unterschwellenstrom bestimmen. Der Unterschwellenstrom wird durch den sogenannten „Swing“  $S$  charakterisiert. Der „Swing“ bezeichnet die Spannung, die zur Erhöhung des Unterschwellenstroms um eine Zehnerpotenz notwendig ist. Der „Swing“ gibt an wie effektiv ein MOSFET ausgeschaltet werden kann wenn  $U_G$  unter  $U_{Th}$  fällt [Wol95]. Je geringer der Wert für den „Swing“ ist, umso „schneller“ schaltet der Transistor. Der ideale Wert für den „Swing“  $S$  eines MOSFETs liegt bei etwa 60 mV/dec. Dieser Wert steigt mit der Dicke der Oxidschicht, mit steigender Oxidladung und mit der Kanaldotierung an [Wol95].

## 6.2 Entwickelter Herstellungsprozess für n-Kurzkanal MOSFETs

Für die Strukturierung der im Rahmen der Arbeit hergestellten n-Kurzkanal MOSFETs waren vier lithografische Schritte notwendig. Der erste Schritt erfolgt mittels UV-NIL, wobei die Kanallänge definierende Poly-Si Gatefinger und die Justiermarken strukturiert wurden. Die restliche lithografische Strukturierung erfolgte mittels optischer Lithografie („mix and match“). Die Herstellung der n-Kurzkanal MOSFETs soll im Rahmen der Arbeit das Potential der UV-NIL als Nanostrukturierungsverfahren für elektronische Bauelemente zeigen. Im Folgenden wird eines für den Herstellungsprozess optimales UV-Polymer für die UV-NIL Strukturierung evaluiert und danach die komplette Prozessierung beschrieben.

### 6.2.1 Auswahl der Ätzmaskierung für den Poly-Si Gatefinger

Für die Auswahl eines geeigneten UV-Polymers als Ätzmaskierung für den Poly-Si Gatefinger wurden die UV-Polymere aus der NIF-Serie untersucht. Diese UV-Polymere erlauben auf Grund ihrer niedrigen Viskosität geringe Restlackschichtdicken (siehe Kapitel 5.3) und nutzen die Antihafschicht der Prägeform (Optool DSX) nicht ab, weshalb eine große Anzahl an reproduzierbaren Prägungen möglich ist (siehe Kapitel 5.4). Um die UV-Polymere aus der NIF-

Serie auf ihre Eignung als Ätzmaskierung zu untersuchen, wurde deren Ätzbeständigkeit gegenüber dem Poly-Si Ätzprozess bestimmt (siehe Tab. 6.1). Hierfür wurden auf drei Si-Substraten Prägungen mit den UV-Polymeren aus der NIF-Serie durchgeführt. Um zusätzlich den Einfluss eines Ausheizschritts zu untersuchen, mit dem in der Halbleitertechnik typischerweise die Ätzbeständigkeit einer Lackmaskierung erhöht wird, wurden diese anschließend unterschiedlich thermisch behandelt. Das Substrat 1 wurde nicht ausgeheizt, Substrat 2 bei 120°C für 120 min und Substrat 3 bei 160°C für 120 min. Anschließend wurden die drei Substrate dem Poly-Si Ätzprozess aus Tab. 6.1 ausgesetzt und die Selektivitäten der UV-Polymere bestimmt (siehe Abb. 6.5).

Tab. 6.1: Parameter für den Poly-Si Ätzprozess. Verwendete Ätzanlage: ASE von STS (siehe Kapitel 2.2.1)

Parameter	Einstellung
Temperatur Probenaufgabe (°C)	20
Flussrate HBr (sccm)	50
Prozessdruck (mTorr)	7
HF-Leistung (W)	500
„Self-BIAS“ (V)	40

In Abb. 6.5 ist zu erkennen, dass eine thermische Nachbehandlung bei 120°C für 120 min zu den höchsten Ätzbeständigkeiten der UV-Polymere aus der NIF-Serie gegenüber dem Poly-Si Ätzprozess führt. So liegt die Selektivität der UV-Polymere NIF-A-1 und NIF-2 bei etwa 1,9 für den Poly-Si Ätzprozess und bei etwa 1,5 für die UV-Polymere NIF-A-5b,c,d. Für den Poly-Si Ätzprozess ist auf Grund der Dicken der Ätzmaskierung und des zu ätzenden Poly-Si eine Selektivität von 1,5 ausreichend, weshalb prinzipiell alle UV-Polymere aus der NIF-Serie verwendet werden könnten. Da von den zur Auswahl stehenden UV-Polymeren die UV-Polymere NIF-A-5b,c,d die geringste Viskosität (geringste Restlackschichtdicke) besitzen und von diesen drei Kandidaten NIF-A-5b die höchste Selektivität von 1,51 für den Poly-Si Ätzprozess besitzt, wurde dieses UV-Polymer für die Strukturierung des Poly-Si Gatefingers gewählt.

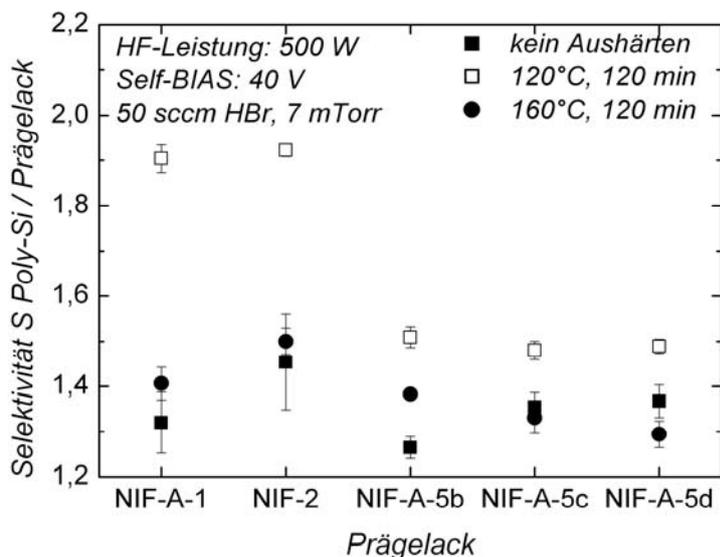


Abb. 6.5: Darstellung der Selektivität  $S$  für den Poly-Si Ätzprozess für die Prägelacke aus der NIF-Serie. Die Prägelacke wurden nach der UV-Aushärtung unterschiedlich thermisch behandelt

Vor dem Poly-Si Ätzprozess muss die Restlackschicht entfernt werden. Hierfür kommt im Rahmen der Arbeit ein physikalischer Plasmaätzprozess zum Einsatz. Für diesen Prozess erfolgt der Lackabtrag senkrecht, wodurch eine horizontale Verbreiterung der Lackstrukturen vermieden wird. Die Parameter für diesen Plasmaätzprozess sind in Tab. 6.2 aufgeführt.

Tab. 6.2: Parameter zur Entfernung der Restlackschicht. Verwendete Ätzanlage: ASE von STS (siehe Kapitel 2.2.1)

Parameter	Einstellung
Temperatur Probenaufgabe (°C)	20
Flussrate Ar (sccm)	20
Prozessdruck (mTorr)	3
HF-Leistung (W)	600
„Self-BIAS“ (V)	40

Um die Lackabtrageraten der UV-Polymere aus der NIF-Serie für die unterschiedlichen thermischen Behandlungen zu evaluieren, wurden auf drei Si-Substraten Prägungen mit den UV-Polymeren aus der NIF-Serie durchgeführt. Das Substrat 1 wurde nicht ausgeheizt, Substrat 2 bei 120°C für 120 min und Substrat 3 bei 160°C für 120 min. Im Anschluss wurden die Lack-

abtragraten  $r_{Pl}$  für den Plasmaätzprozess aus Tab. 6.2 bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abb. 6.6 dargestellt.

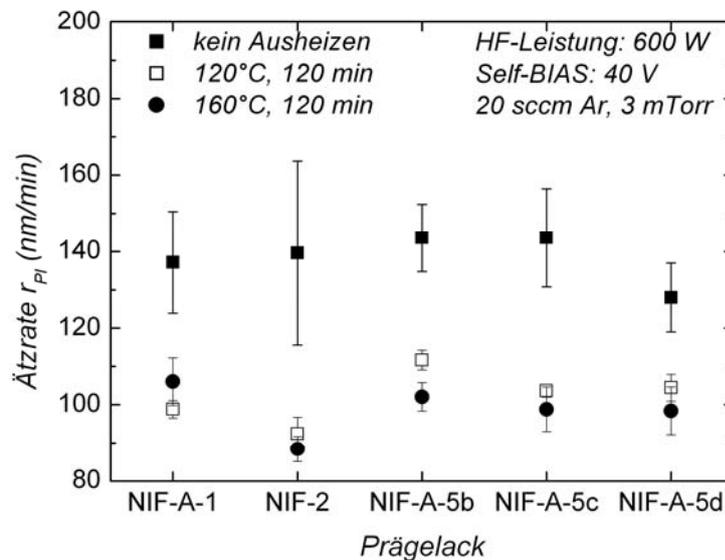


Abb. 6.6: Darstellung der Ätzraten  $r_{Pl}$  zur Entfernung der Restlackschichtdicke für die Prägelacke aus der NIF-Serie. Die Prägelacke wurden nach der UV-Aushärtung unterschiedlich thermisch behandelt

Abb. 6.6 zeigt, dass die UV-Polymere, die nicht ausgeheizt wurden, die höchsten Abtragraten haben und die Lackabtragraten  $r_{Pl}$  für die UV-Polymere, die bei 120°C und 160°C ausgeheizt wurden, durch die thermische Nachbehandlung geringer sind. Somit hat sich die Ätzbeständigkeit der UV-Polymere aus der NIF-Serie durch den Ausheizenschritt gegenüber dem rein physikalisch wirkenden Ar-Plasmaätzprozess erhöht. Auf Grund der Ergebnisse zu den Abtragraten der UV-Polymere aus der NIF-Serie kann die Restlackschichtdicke für die Prägungen des Transistorprozesses definiert entfernt werden.

Nach der Evaluierung der Ätzprozesse wurde für die Strukturierung der Poly-Si Gatefinger der n-Kurzkanal MOSFETs das UV-Polymer NIF-A-5b verwendet. Für die Prägeprozesse wurde das UV-Polymer NIF-A-5b zum Erzielen einer geringen Restlackschichtdicke mit dem „Ink-Jet“-System auf das Substrat aufgebracht. Hierbei wurde die Lackverteilung an die Prägeformstrukturen angepasst, um eine möglichst geringe und homogene Restlackschichtdicke zu erzielen (siehe Kapitel 2.1.3 und 5.3). Zusätzlich wurden die Parameter wie UV-Belichtung, Prägedruck und -zeit sowie das Prozessgas angepasst.

Zur Untersuchung der Dicke und der Homogenität der Restlackschichtdicke wurden 25 Imprints auf einer Prozessscheibe mit dem UV-Polymer NIF-A-5b und einer speziellen Prägeform mit Gatefingern durchgeführt. An allen 25 Prägungen auf der Scheibe wurden im An-

schluss je 10 Messungen der Restlackschichtdicke mit dem Interferometer vorgenommen (siehe Abb. 6.7). Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass die mittlere Restlackschichtdicke  $h_f$  für die 25 Prägungen zwischen 44 nm und 54 nm schwankt. Betrachtet man die mittlere Restlackschichtdicke für alle 250 Messpunkte, so beträgt diese 50,1 nm mit einer Standardabweichung  $\sigma$  von 12,6 nm. Diese Werte erfüllen die Bedingungen an eine homogene und möglichst dünne Restlackschichtdicke.

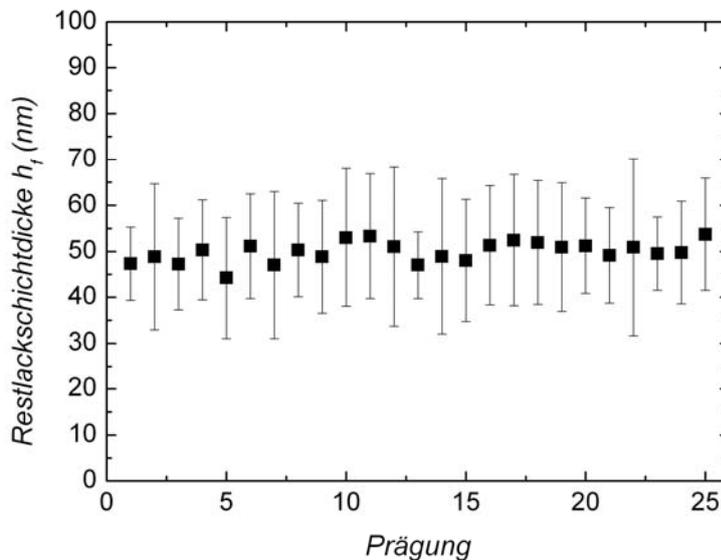


Abb. 6.7: Darstellung der Restlackschichtdicke  $h_f$  von 25 Prägungen mit dem UV-Polymer NIF-A-5b auf einer Si-Scheibe für den Transistorprozess

Mit dem Abschluss der Experimente zur Evaluierung eines optimalen Prägelacks und Prägebedingungen konnte die Prozessierung der n-Kurzkanal MOSFETs erfolgen.

### 6.2.2 Prozessierung

Als Substratmaterial für den n-Kurzkanal MOSFET Prozess wurden doppelseitig polierte, p-dotierte Si-Scheiben (Durchmesser: 150 mm, Orientierung: 100) mit einem spezifischen Widerstand zwischen  $1 \Omega\text{cm}$  und  $10 \Omega\text{cm}$  verwendet. Nach Aufbringen eines 24 nm dicken Streuoxids wurde mittels Ionenimplantation ( $\text{BF}_2$ ,  $4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , 25 keV) und anschließendem Ausheilschritt bei  $950^\circ\text{C}$  für 30 min die Dotierung ( $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) nahe der Oberfläche eingestellt (Kanaldotierung). Nach Entfernen des Streuoxids wurde ein 10 nm dickes Gateoxid und sofort im Anschluss daran ein 150 nm dickes, in-situ n-dotiertes Poly-Si mit einem Schichtwiderstand von etwa  $74 \Omega/\square$  aufgebracht. Vor der nachfolgenden UV-NIL Strukturierung wurde als Haftvermittler zwischen dem Poly-Si und dem UV-Polymer NIF-A-5b eine etwa 10 nm dicke

PMMA Schicht aufgeschleudert und bei 160°C für 1 h ausgehärtet. Die UV-NIL Strukturierung erfolgte mit einer Prägeform, auf der Gatefinger mit Kanallängen von 100 nm, 130 nm, 250 nm, 300 nm und 650 nm vorhanden waren. Nach der Übertragung der Prägeformstrukturen in das UV-Polymer NIF-A-5b wurden die mit dem Lack strukturierten Scheiben bei 120°C für 120 min ausgeheizt und die Restlackschichtdicken der strukturierten Substrate mit dem Interferometer bestimmt. Die Restlackschichtdicken lagen für die Prozessscheiben alle im Bereich um die 50 nm, vergleichbar mit den Werten aus Abb. 6.7. Darauf folgte die Entfernung der Restlackschichtdicke mit dem Prozess nach Tab. 6.2 für 44 sec. Die Ätzzeit resultierte in einem Lackabtrag von etwa 80 nm. Für eine mittlere Restlackschichtdicke von 50 nm und zusätzlich einer 10 nm dicken PMMA-Schicht (Haftvermittler) ergibt sich somit eine mittlere Überätzung von 20 nm. Die Überätzung stellt sicher, dass die Restlackschicht auf dem gesamten Substrat entfernt wird. Anschließend wurde das Poly-Si mit dem Prozess nach Tab. 6.1 für 85 sec geätzt. Da die SiO<sub>2</sub>-Ätzrate für den Poly-Si Ätzprozess sehr gering ist, diente die SiO<sub>2</sub>-Schicht als Ätzstopp [Kim07][Miw02]. Nach dem Ätzprozess wurden die Scheiben gereinigt und die 10 nm dicke Oxidschicht auf 35 nm reoxidiert. Die Reoxidation reduziert Oxidschädigungen am Übergang von den Poly-Si Gatefingern zum Oxid, die durch das aggressive Ätzgas verursacht werden und die elektrischen Eigenschaften des Transistors verschlechtern [Bro96]. Zusätzlich bewirkt die Reoxidation am Poly-Si Gatefinger die Bildung von sogenannten „Spacern“ (Herstellung üblicherweise durch chemische Gasphasenabscheidung), die für die nachfolgende Source und Drain Implantation den Kanal vor einer unerwünschten n-Dotierung maskieren. Mittels optischer Lithografie wurden die Source- und Draingebiete definiert und die n-Dotierung der zwei Gebiete erfolgte durch Ionenimplantation (As,  $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ , 40 keV). Nach Entfernen der Lackmaske erfolgte ein RTA-Schritt (RTA: „rapid thermal annealing“) bei 800°C für 20 sec und 1070°C für 10 sec. Durch den Ausheilschritt werden die implantierten Ionen elektrisch aktiviert. Zusätzlich verhindert die schnelle Ausheilung, dass die Dotieratome in das Kanalgebiet diffundieren können und dabei im Extremfall Source und Drain kurzschließen. Nach dem RTA-Schritt wurde ein 200 nm dickes Oxid zur Isolation abgeschieden. Mittels optischer Lithografie wurden darauf die Kontaktgebiete für Source, Drain und Gate definiert. Das Entfernen der abgeschiedenen Oxidschicht erfolgte mittels BOE (BOE: „buffered oxide etch“). Nach dem Öffnen der Kontaktgebiete wurde sofort im Anschluss mittels Elektronenstrahlverdampfen die komplette Prozessscheibe mit 100 nm Titan und 500 nm Aluminium beschichtet. Durch optische Lithografie und einen Plasmaätzprozess wurden für die Source-, Drain- und Gateanschlüsse je 200·200 μm<sup>2</sup> große Kontaktflächen („Pads“) für die elektrische Kontaktierung freigelegt. Durch geeignete Messbedingungen konnten dann unter anderem die

Ausgangs- und Übertragungskennlinien aufgenommen werden. Eine REM-Übersichtsaufnahme eines fertig prozessierten n-Kurzkanal MOSFETs ist in Abb. 6.8 gezeigt.

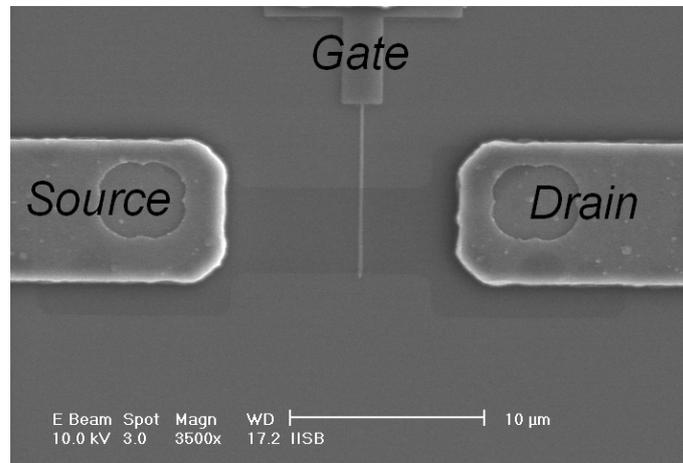


Abb. 6.8: REM-Übersichtsaufnahme eines fertig prozessierten n-Kurzkanal MOSFETs

### 6.3 Elektronenmikroskopische und elektrische Charakterisierung der n-Kurzkanal MOSFETs

Nach der Prozessierung der n-Kurzkanal MOSFETs wurden ausgewählte MOSFETs elektronenmikroskopisch und elektrisch charakterisiert. So wurden die Ausgangs- und Übertragungskennlinien von fünf MOSFETs mit unterschiedlicher Kanallänge  $L_{\text{Soll}}$  und einer Kanalweite  $W$  von 5  $\mu\text{m}$  gemessen und anschließend die Querschnitte der Gatefinger mittels Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) untersucht (siehe Abb. 6.9). Die Präparation der Gatefinger für die TEM-Aufnahmen erfolgte mittels FIB.

Die Poly-Si Gatefinger in Abb. 6.9 zeigen alle typische Poly-Si Körner und besitzen prinzipiell die gleiche Kontur, was auf eine stabile Prozessführung zurückzuführen ist. Die Gatefinger haben in der oberen Hälfte die gleiche Länge, nach unten hin verdicken sie sich. Die Verdickung wurde durch die Reoxidation des Poly-Si im Randbereich unterhalb des Gatefingers verursacht, was in einer Volumenzunahme und folglich zu einer Aufwölbung des Poly-Si führte („bird’s beak“). Daraus resultierte, dass die Dicke der Oxidschicht am Rande des Gatefingers auf 35 nm bis 39 nm (ursprünglich: 10 nm) deutlich erhöht wurde. Der Einfluss der dickeren Oxidschicht auf die Einsatzspannung  $U_{\text{Th}}$  wird bei der Auswertung der elektrischen Kennlinien diskutiert. Durch die Reoxidation wird Si im Bereich außerhalb des Gatefingers verbraucht, in den mittleren Bereichen unterhalb des Gatefingers nicht. Daraus resultiert die Erhebung des Si-Substrats zur Mitte des Poly-Si Gatefingers. In der Tab. 6.3 sind die aus den Abb. 6.9 ermittelten Größen wie die Länge  $L_M$  in der Mitte und die maximale Länge  $L_{\text{Max}}$  am

Boden des Poly-Si Gatefingers, die maximale Oxiddicke  $d_{OX}$  unterhalb des Gatefingers und die Dicke der Poly-Si Schicht  $d_{Poly}$  für die fünf untersuchten Kanallängen  $L_{Soll}$  zusammengefasst.

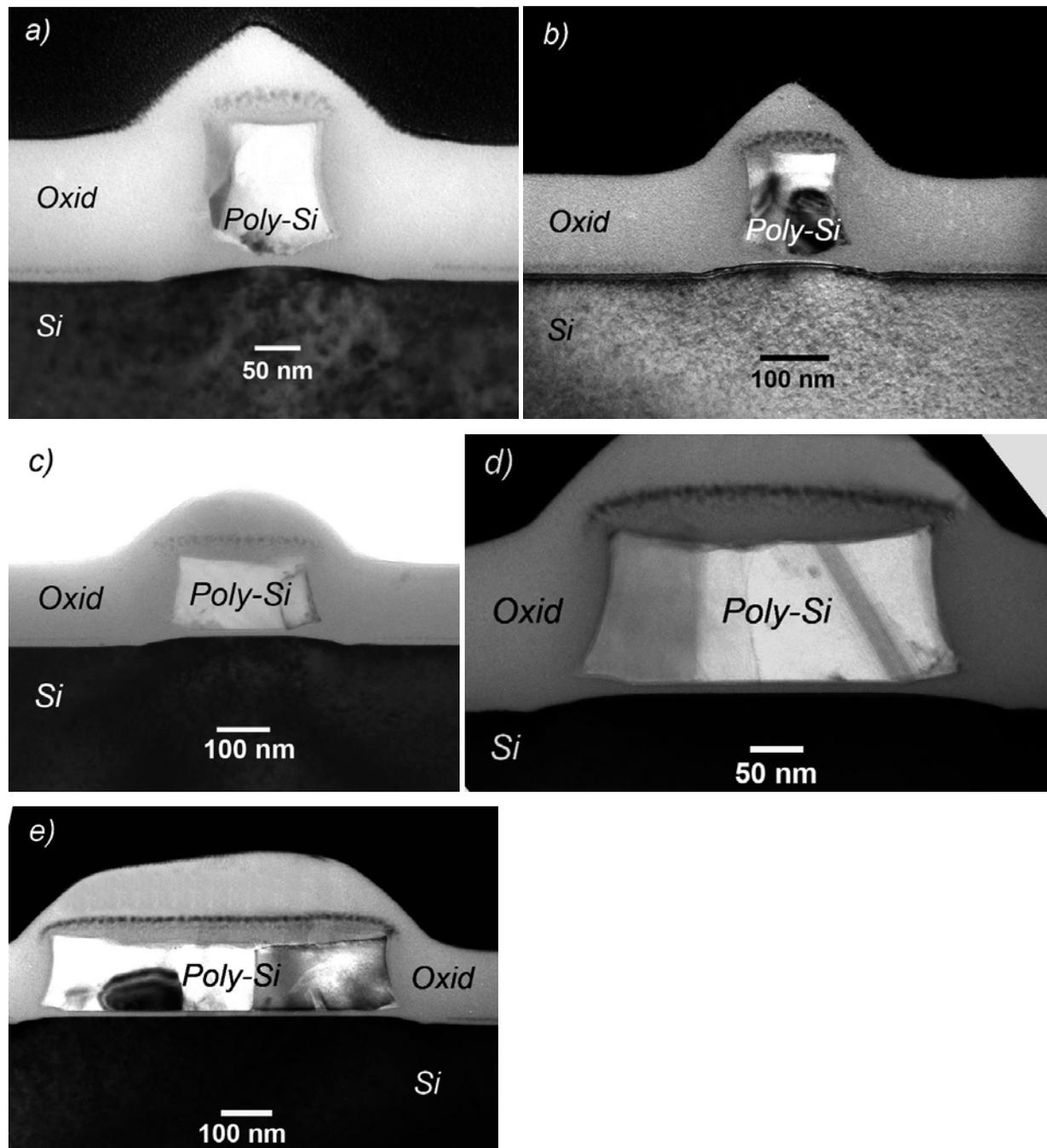


Abb. 6.9: TEM-Aufnahmen von Querschnitten durch den Poly-Si Gatefinger für die fünf prozessierten Kanallängen a) 100 nm, b) 130 nm, c) 250 nm, d) 300 nm und e) 650 nm

Für die elektrische Charakterisierung wurden das Ausgangskennlinienfeld und die Übertragungskennlinie der fünf n-Kurzkanal MOSFETs mit unterschiedlicher Kanallänge  $L_{Soll}$  und einer Kanalweite  $W$  von 5  $\mu\text{m}$  gemessen. In den Ausgangskennlinienfeldern (siehe Abb. 6.10 bis Abb. 6.14, jeweils links) sollte das Sättigungsverhalten der MOSFETs und aus der halb-

garithmischen Auftragung der Übertragungskennlinien (siehe Abb. 6.10 bis Abb. 6.14, jeweils rechts) der „Swing“  $S$  bestimmt werden. Die hier nicht dargestellte Ermittlung der Einsatzspannung erfolgte prinzipiell nach Abb. 6.4 durch Extrapolieren der Übertragungskennlinie im linearen Bereich.

Tab. 6.3: Zusammenfassung der Messwerte für die fünf n-Kurzkanal MOSFETs mit unterschiedlicher Kanallänge, ermittelt aus den TEM-Aufnahmen in Abb. 6.9

$L_{Soll}$ (nm)	$L_M$ (nm)	$L_{Max}$ (nm)	$d_{Poly}$ (nm)	$d_{OX}$ (nm)
100	85	124	138	38
130	115	159	140	39
250	249	282	133	36
300	300	336	135	35
650	660	690	135	35

Im Ausgangskennlinienfeld des n-Kurzkanal MOSFETs mit der kürzesten Kanallänge von  $L_{Soll}$  gleich 100 nm (siehe Abb. 6.10 links) ist kein Sättigungsverhalten zu erkennen. Dies ist auf die Kanallängenverkürzung  $\Delta L$  bei steigender Drainspannung zurückzuführen, in dessen Folge der Drainstrom ansteigt (siehe Kapitel 6.1). Die Übertragungskennlinien aus Abb. 6.10 rechts sind bei unterschiedlicher Drainspannung im Bereich des Unterschwellenstroms zueinander verschoben.

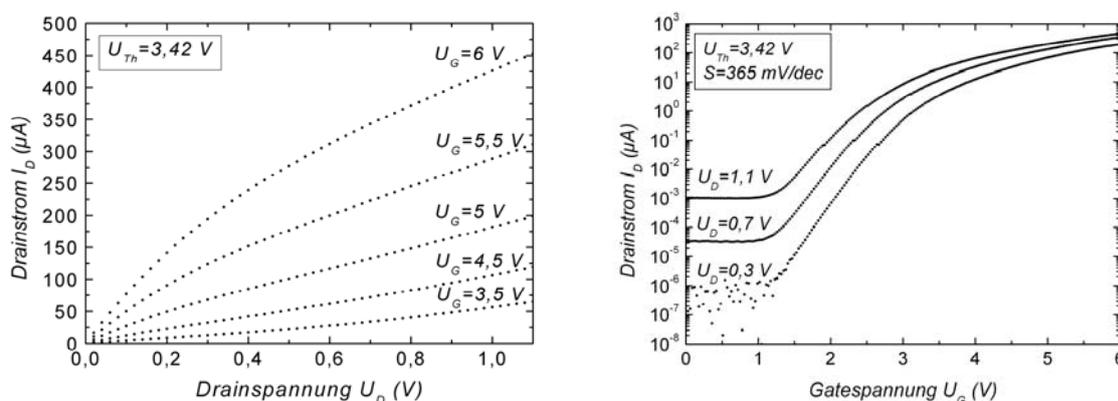


Abb. 6.10: Ausgangskennlinienfeld (links) und Übertragungskennlinie (rechts) des n-Kurzkanal MOSFETs mit einer Kanallänge  $L_{Soll}$  von 100 nm und einer Kanalweite  $W$  von  $5 \mu\text{m}$

Diese Verschiebung ist auf den Einfluss des sogenannten „Drain-Induced Barrier Lowering“ (DIBL) zurückzuführen [Tro79]. Beim DIBL vermindert eine erhöhte Drainspannung die

Potentialbarriere zwischen Source und Drain im Kanalgebiet. Die Kanalladung und der Drainstrom werden nicht mehr vom Gate alleine, sondern auch von der Drainspannung beeinflusst. Aus den Übertragungskennlinien wurde ein „Swing“ von 365 mV/dec für eine Drainspannung von 0,3 V und ein „Swing“ von 540 mV/dec für eine Drainspannung von 1,1 V ermittelt. Der Anstieg des „Swings“ zu höheren Drainspannungen ist auf den „Punch-Through“-Effekt zurückzuführen [Zhu88]. Der „Punch-Through“-Effekt tritt auf, wenn die Drain-Substrat Raumladungszone mit der Source-Substrat Raumladungszone im Kanalgebiet überlappt. Dies hat zur Folge, dass die Gatespannung einen geringeren Einfluss auf die Steuerung des Drainstroms hat und somit der „Swing“  $S$  mit dem Drainstrom ansteigt [Wol95]. Um den DIBL- und den „Punch-Through“-Effekt zu reduzieren, werden typischerweise die Kanaldotierung erhöht, eine „HALO“- / „Pocket“-Implantation oder ein sogenanntes „Delta-Doping“ durchgeführt [Zha98]. Die Einsatzspannung wurde aus der hier nicht dargestellten linearen Auftragung der Übertragungskennlinie (vgl. Abb. 6.4) zu 3,42 V bestimmt. In der Halbleitertechnik liegen die Einsatzspannungen typischerweise unter 1 V. Die hohe Einsatzspannung wird hauptsächlich durch die etwa 39 nm dicke Oxidschicht am Rande des Poly-Si Gatefingers verursacht, die sich aus dem Reoxidationsschritt ergeben hat.

Im Ausgangskennlinienfeld für den MOSFET mit einer Kanallänge  $L_{\text{Soll}}$  von 130 nm (siehe Abb. 6.11 links) ist der Einfluss von Kurzkanaleffekten zu erkennen, die sich aus der Reduzierung der Kanallänge  $\Delta L$  bei steigendem  $U_D$  ergeben. Durch die fortschreitende Reduzierung der Kanallänge  $\Delta L$  erhöht sich der Drainstrom  $I_D$ , weshalb der Transistor kein ideales Sättigungsverhalten zeigt.

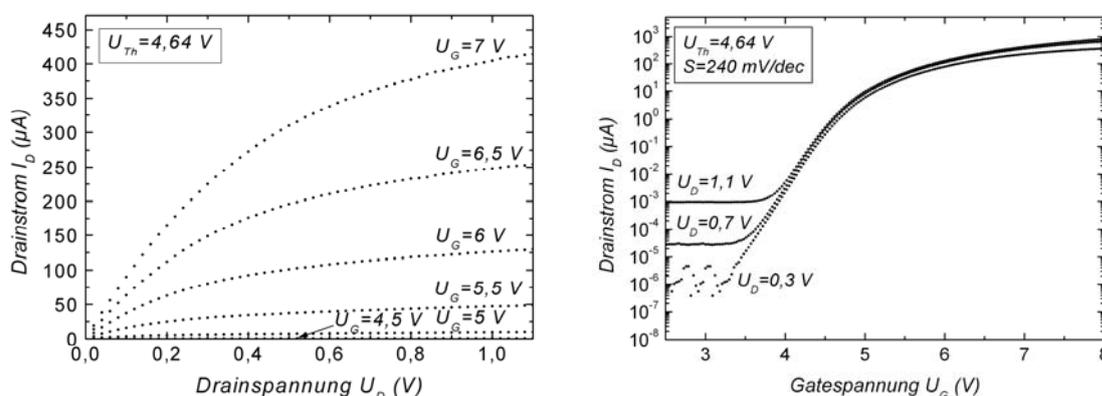


Abb. 6.11: Ausgangskennlinienfeld (links) und Übertragungskennlinie (rechts) des n-Kurzkanal MOSFETs mit einer Kanallänge  $L_{\text{Soll}}$  von 130 nm und einer Kanalweite  $W$  von 5  $\mu\text{m}$

Dieser Effekt wirkt umso stärker, je geringer die Kanallänge  $L$  ist [Nea92]. Aus der Übertragungskennlinie (siehe Abb. 6.11 rechts) wurde ein „Swing“  $S$  von 240 mV/dec bei einer

Drainspannung  $U_D$  von 0,3 V ermittelt. Sowohl der DIBL als auch der „Punch-Trough“-Effekt sind in dieser Auftragung nicht mehr zu erkennen. Die Einsatzspannung  $U_{Th}$  liegt bei 4,64 V. Die Ausgangskennlinienfelder für die n-Kurzkanal MOSFETs mit einem  $L_{Soll}$  von 250 nm (siehe Abb. 6.12 links) und  $L_{Soll}$  von 300 nm (siehe Abb. 6.13 links) zeigen eine ähnliche Charakteristik. So sind die Kurzkanaleffekte auf Grund der gestiegenen Kanallänge reduziert, aber immer noch vorhanden. Aus den Übertragungskennlinien wurde ein „Swing“  $S$  von 255 mV/dec für die Kanallänge  $L_{Soll}$  von 250 nm (siehe Abb. 6.12 rechts) und ein  $S$  von 250 mV/dec für ein  $L_{Soll}$  von 300 nm (siehe Abb. 6.13 rechts) ermittelt. Die Einsatzspannungen liegen bei 5,63 V für ein  $L_{Soll}$  von 250 nm und bei 5,76 V für ein  $L_{Soll}$  von 300 nm.

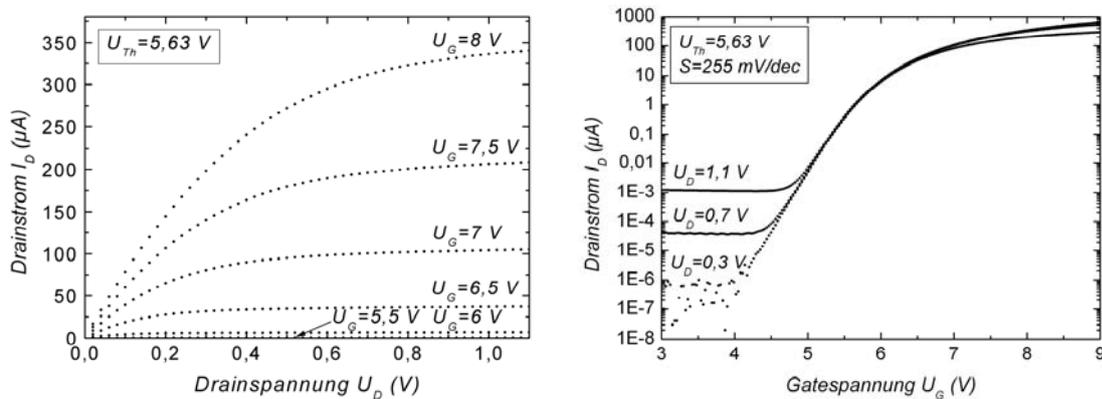


Abb. 6.12: Ausgangskennlinienfeld (links) und Übertragungskennlinie (rechts) des n-Kurzkanal MOSFETs mit einer Kanallänge  $L_{Soll}$  von 250 nm und einer Kanalweite  $W$  von 5  $\mu\text{m}$

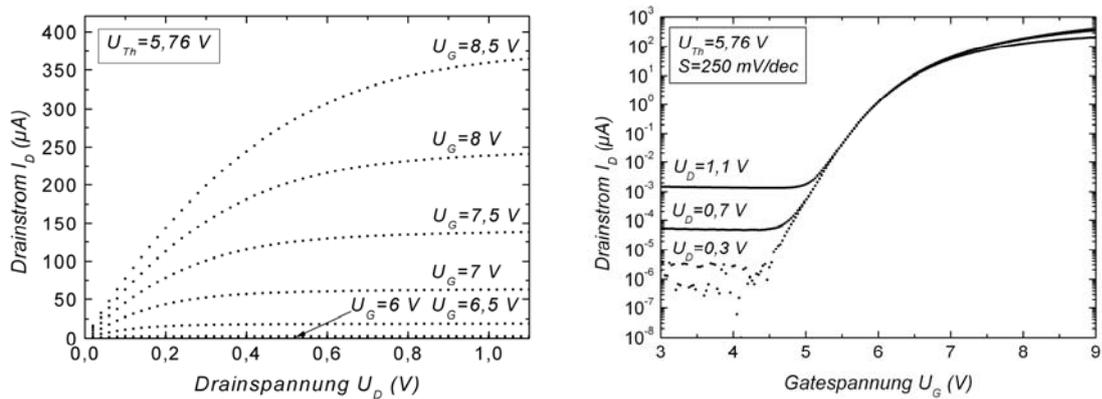


Abb. 6.13: Ausgangskennlinienfeld (links) und Übertragungskennlinie (rechts) des n-Kurzkanal MOSFETs mit einer Kanallänge  $L_{Soll}$  von 300 nm und einer Kanalweite  $W$  von 5  $\mu\text{m}$

Im Ausgangskennlinienfeld für den MOSFET mit einer Kanallänge  $L_{Soll}$  von 650 nm (siehe Abb. 6.14 links) sind kaum noch Kurzkanaleffekte zu erkennen. Für die Kennlinien zeigt sich

ein nahezu ideales Sättigungsverhalten. Aus der Übertragungskennlinie (siehe Abb. 6.14 rechts) wurde der „Swing“ zu 280 mV/dec ermittelt. Die Einsatzspannung  $U_{Th}$  beträgt 6,22 V.

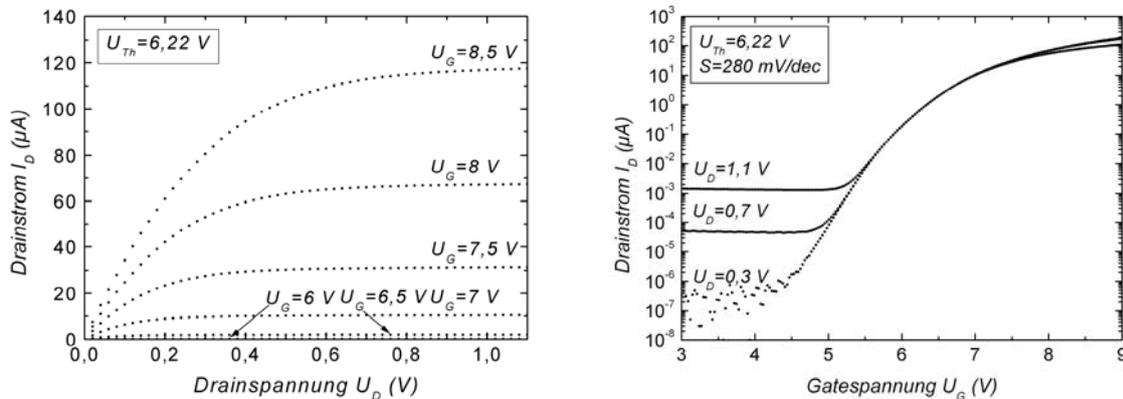


Abb. 6.14: Ausgangskennlinienfeld (links) und Übertragungskennlinie (rechts) des n-Kurzkanal MOSFETs mit einer Kanallänge  $L_{Soll}$  von 650 nm und einer Kanalweite  $W$  von 5  $\mu\text{m}$

In Tab. 6.4 sind die Messwerte für die Einsatzspannung  $U_{Th}$  und den „Swing“  $S$  bei einer Drainspannung  $U_D$  von 0,3 V für die fünf n-Kurzkanal MOSFETs mit unterschiedlicher Kanallänge  $L_{Soll}$  und einer Kanalweite  $W$  von 5  $\mu\text{m}$  zusammengefasst.

Tab. 6.4: Zusammenfassung der elektrischen Messwerte für die fünf n-Kurzkanal MOSFETs mit unterschiedlicher Kanallänge  $L_{Soll}$

$L_{Soll}$ (nm)	$U_{Th}$ (V)	$S$ (mV/dec)
100	3,42	365
130	4,64	240
250	5,63	255
300	5,76	250
650	6,22	280

Es zeigt sich, dass die Einsatzspannungen mit sinkender Kanallänge  $L_{Soll}$  geringer wird (siehe Abb. 6.15). Dies ist auf die bereits oben beschriebenen Kurzkanaleffekte zurückzuführen. Der Wert für den „Swing“  $S$  fällt (bei konstanter Drainspannung) von 280 mV/dec ( $L_{Soll}$  gleich 650 nm) auf 240 mV/dec ( $L_{Soll}$  gleich 130 nm) und steigt dann auf 365 mV/dec ( $L_{Soll}$  gleich 100 nm) an. Der Anstieg des Swings bei der Kanallänge  $L_{Soll}$  von 100 nm ist auf den „Punch-Through“-Effekt zurückzuführen [Wol95]. Der ideale Wert für den „Swing“  $S$  eines MOSFETs liegt bei etwa 60 mV/dec. Die hohen gemessenen Werte können durch die nicht optimale

Prozessführung bei der Reoxidation erklärt werden. Bei diesem Prozessschritt wurde teilweise das Poly-Si des Gates oxidiert, wodurch die Gateoxidicke bis auf 39 nm anstieg (siehe Abb. 6.9), was zu starken Verspannungen und zahlreichen Oxidladungen führte [Wol95].

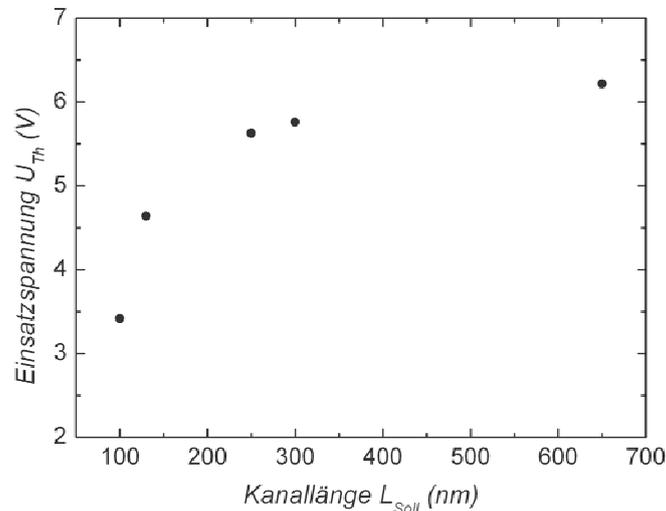


Abb. 6.15: Darstellung der Einsatzspannung  $U_{Th}$  gegenüber der Kanallänge  $L_{Soll}$

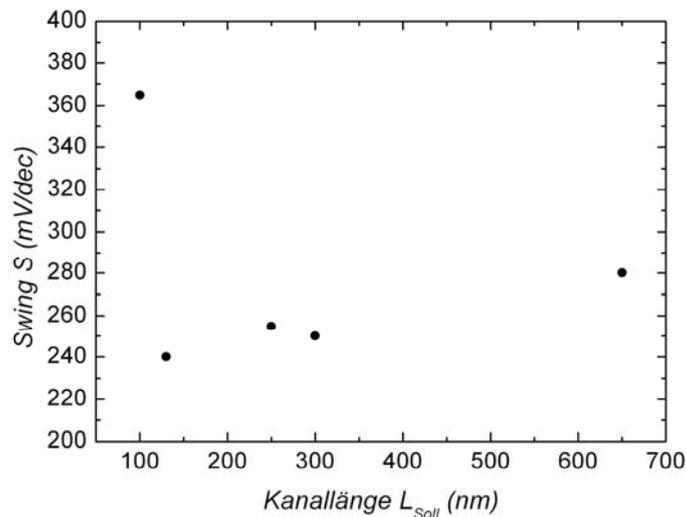


Abb. 6.16: Darstellung des „Swing“  $S$  gegenüber der Kanallänge  $L_{Soll}$

Die prozessierten n-Kurzkanal MOSFETs zeigen auf Grund des durch die Reoxidation entstandenen „bird’s beak“ eine zu hohe Einsatzspannung, deren Optimierung allerdings auch nicht Ziel dieser Arbeit gewesen ist. Vielmehr sollten das Potential der UV-NIL als kostengünstiges Nanostrukturierungsverfahren für elektronische Bauelemente und die Kompatibilität der UV-NIL zur etablierten Si-Halbleitertechnologie demonstriert werden. Diese Ziele wurden durch die Herstellung und die nachgewiesene Funktionalität der n-Kurzkanal MOSFETs erfolgreich erreicht.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Lithografieverfahren sind im Bereich der Halbleitertechnik ein häufig eingesetztes Werkzeug, um Bereiche einer Oberfläche entweder zu entfernen oder zu beschichten. Das Grundprinzip der Strukturierung basiert hierbei typischerweise auf der optischen Abbildung, weshalb zum Erreichen hoher Auflösungen immer komplexere, stabilere und folglich kostenintensivere Belichtungsanlagen notwendig sind. Diese Faktoren machen moderne Belichtungsanlagen nur als Industrieanlagen für hohe Stückzahlen rentabel. Um hier zukünftig Alternativen anbieten zu können ist man in der Forschung und Industrie auf der Suche nach kostengünstigen Verfahren zur Nanostrukturierung. Ein Kandidat hierfür ist die UV-Nanoimprint-Lithografie, deren Potential als kostengünstiges Strukturierungsverfahren für elektronische Bauelemente im Rahmen der Arbeit untersucht wurde.

Ein wichtiger Faktor bei der Strukturierung mittels UV-NIL ist die Verfügbarkeit von UV-transparenten Prägeformen. Aktuell kann man Prägeformen für einige 1000 € bis 10 000 € pro Stück erwerben. Für die Herstellung der etablierten Prägeformen werden 6 Zoll Maskenblanks mit einer Dicke von 6,35 mm verwendet und aus diesem Substrat werden vier Prägeformen mit einer Größe von 65·65 mm<sup>2</sup> hergestellt. Um hier eine kostengünstige Alternative bereit zu stellen, wurden im Rahmen der Arbeit ein neues Konzept und eine entsprechende Prozessfolge zur Herstellung von Quarzprägeformen entwickelt. Mit dem neuen Konzept wurden aus einem Quarzsubstrat mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Dicke von 675 µm, 64 Quarzprägeformen hergestellt, die auf einen 65·65 mm<sup>2</sup> großen Quarzhalter mittels eines UV-transparenten Schmelzklebers befestigt wurden. Die Prägeformen konnten beliebig auf dem Quarzhalter ausgetauscht werden. Zusätzlich wurde im Vergleich zum etablierten Konzept das sogenannte Mesaätzen vermieden. Mit dem neuen Konzept war es möglich, die Gesamtkosten pro Prägeform, im Vergleich zu den aktuell erhältlichen Prägeformen, um eine Größenordnung zu reduzieren.

Vor der Entwicklung der notwendigen Prozessschritte zur Herstellung der Quarzprägeformen wurden hochreine Quarzsubstrate (Lithosil LQ1) mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Dicke von 675 µm ausgewählt, die eine geringe Rauheit, eine hohe Transmission bei der Belichtungswellenlänge und eine geringe Dickenschwankung besitzen. Die Substrate wurden nach einer Reinigung mit einer Cr- bzw. Ti-Schicht bedampft, die als Ätzmaskierung und zur Vermeidung von Aufladungseffekten bei der Elektronenstrahl-Lithografie diente. Hierfür wurden die notwendigen Aufdampfprozesse optimiert, um eine homogene Schichtdicke (die Dickenschwankung betrug 5,8% über der Scheibenfläche) mit einer geringen Oberflächenrau-

heit zu erhalten. Nach der Metallisierung erfolgte die Definition von Strukturen im  $\mu\text{m}$ -Bereich mittels optischer Lithografie. Die Definition von Strukturen bis 50 nm erfolgte extern mittels Elektronenstrahl-Lithografie.

Ein wichtiges Kriterium bei der Entwicklung des Herstellungsprozesses für die Prägeformen ist die Maßhaltigkeit der Strukturübertragung. Um diese zu erreichen war es notwendig, reaktive Ionenätzprozesse für die Quarzprägeformen zu entwickeln, die eine hohe Selektivität gegenüber dem verwendeten Maskenmaterial aufweisen. Hierbei ergaben die Experimente, dass Cr eine um den Faktor 10 höhere Selektivität gegenüber dem Quarzätzprozess aufweist als Ti. Bei der Optimierung der Cr-Strukturierung zeigte sich, dass eine Überätzung von 115% notwendig war, um steile Flanken von  $80^\circ$  zu erreichen. Die Untersuchungen zur Quarzstrukturierung ergaben, dass die Parameter „Self-BIAS“-Spannung und der  $\text{C}_4\text{F}_8$ -Gasfluss den größten Einfluss auf die Selektivität zur verwendeten Cr-Maskierung zeigten. Für den optimierten Prozess wurde eine Selektivität des Quarzätzprozesses gegenüber der Cr-Maskierung von etwa 85 erreicht, die Oberflächenrauheit des geätzten Bereichs betrug ca. 0,58 nm, die Flankensteilheit  $88^\circ$  und die Ätzrate ca. 140 nm/min.

Neben der Herstellung von Quarzprägeformen stellt die Strukturierung von UV-Polymeren und in diesem Zusammenhang die defektfreie Trennung der Quarzprägeform vom UV-Polymer nach dem Aushärtevorgang einen wichtigen Aspekt für das Erreichen hoher Ausbeuten im Speziellen und dem Erfolg der UV-NIL im Allgemeinen dar. So wurden UV-Polymere im Hinblick auf die für die UV-NIL relevanten Eigenschaften charakterisiert. Hierbei sind eine geringe Viskosität, im ausgehärteten Zustand keine Haftung zu der Prägeform, dagegen eine hohe Haftung zum Substrat, eine schnelle Aushärtung, eine hohe Ätzbeständigkeit, sowie eine hohe Reinheit und Kompatibilität zu Prozessen in der Halbleitertechnologie notwendig.

Vor der Untersuchung der Haftungseigenschaften wurde das Benetzungsverhalten von UV-Polymeren zu verschiedenen Oberflächen mittels Kontaktwinkelmessung bestimmt. Zusätzlich wurde die Oberflächenspannung der UV-Polymere nach einer im Rahmen der Arbeit neu entwickelten Auswertemethode evaluiert, die eine deutliche Vereinfachung gegenüber den bisherigen Methoden zeigt. Die Werte der Kontaktwinkelmessungen und der Oberflächenspannungen zeigten, dass die Zusammensetzung der UV-Polymere stark unterschiedlich ist. Während die UV-Polymere aus der NIF-Serie eine PTFE-ähnliche Zusammensetzung besitzen, bestehen die übrigen UV-Polymere größtenteils aus Acrylatmischungen. Die Zusammensetzung der verschiedenen UV-Polymere beeinflusste in einem großen Maß deren Haftung zu verschiedenen Oberflächen. So war es für die UV-Polymere aus der NIF-Serie notwendig, die Si-Substratoberfläche mit einer etwa 10 nm dicken PMMA-Schicht zu bedecken, um eine hohe

Haftung auf dem Substrat zu erreichen. Die übrigen UV-Polymere zeigten zumeist auf gereinigten Si-Oberflächen eine hohe Haftung. Die PTFE-ähnliche Zusammensetzung der UV-Polymere aus der NIF-Serie sorgte generell dafür, dass die Eigenschaft an Oberflächen haften zu bleiben, reduziert wurde. So wurde die Antihafschicht (abgeschieden aus der Chemie Optool DSX), welche die Oberfläche der Prägeformen bedeckt hat, selbst nach 500 Prägeprozesse in das UV-Polymer NIF-1-A nicht messbar abgenutzt.

Für die Maßhaltigkeit der Strukturübertragung stellt die Viskosität der UV-Polymere ein wichtiges Kriterium dar, da diese entscheidend für die Minimierung der Restlackschichtdicke ist. Die Restlackschicht muss vor der Substratstrukturierung in einem Plasmaprozess entfernt werden, der selbst zur Quelle partikulärer Defekte werden aber auch die Dimensionen der geprägten Strukturen verändern kann. Auf Grund der im Rahmen der Arbeit gewonnen Erkenntnisse wurde der in die Imprintanlage integrierte Eintropfendosierer durch ein „Ink-Jet“-System ersetzt. Mit Hilfe des „Ink-Jet“-Systems konnten die UV-Polymere aus der NIF-Serie mit Viskositäten kleiner als 25 mPa·s verwendet und die minimale Tropfengröße von 3 nl auf 60 pl reduziert werden. In Folge dessen konnten das aufgebrachte Volumen der UV-Polymere an die Prägeformstrukturen angepasst und die Restlackschichtdicken von ca. 400 nm (Eintropfendosierer) auf ca. 30 nm („Ink-Jet“-System) reduziert werden, womit optimale Voraussetzungen geschaffen wurden, um eine maßhaltige Strukturübertragung zu erzielen.

Mit der Herstellung von Quarzprägeformen, der Evaluierung von geeigneten UV-Polymeren, Substratvorbehandlungen und Antihafschichten wurden wichtige Voraussetzungen geschaffen, um die UV-NIL als Nanostrukturierungsverfahren einsetzen zu können. Um von der Übertragung der Prägeformstrukturen in ein UV-Polymer zu einem elektronischen Bauelement zu gelangen, war es notwendig, eine Vielzahl weiterer Prozessschritte zu untersuchen und zu optimieren. Hierfür wurden die UV-Polymere nach ihrer UV-Aushärtung verschiedenen Ausheizbedingungen unterzogen und die resultierende Selektivität gegenüber dem reaktiven Ionenätzprozess für Poly-Si untersucht. Hierbei wurde ermittelt, dass das Ausheizen der UV-Polymere aus der NIF-Serie bei 120°C für 120 min in der höchsten Selektivität von etwa 1,5 für die UV-Polymere NIF-A-5b,c,d und von etwa 1,9 für die UV-Polymere NIF-A-1 und NIF-2 resultierte. Dies war ausreichend, um den Poly-Si Gatefinger von n-Kurzkanal MOSFETs mittels UV-NIL und reaktiven Ionenätzens zu strukturieren. Der Poly-Si Gatefinger stellt die kritische Strukturgröße bei den Transistoren dar. Durch das Messen der Übertragungs- und Ausgangskennlinien der fertig prozessierten n-Kurzkanal MOSFETs wurde demonstriert, dass die UV-NIL ein großes Potential als alternatives Nanostrukturierungsverfahren hat. Dies gilt sowohl für industrielle Anwendungen, wenn weitere Prozessfragen wie Ausbeute und Repro-

duzierbarkeit untersucht werden als auch für Forschungseinrichtungen, denen durch die UV-NIL ein Instrument gegeben ist, kostengünstig Nanostrukturierung durchführen zu können. Um die Möglichkeiten der UV-NIL als kostengünstige und höchstauflösendes Lithografieverfahren weiter zu entwickeln und voll ausnutzen zu können, müssen vor allem für industriennahe Anwendungen der Durchsatz erhöht werden. Der Durchsatz liegt bei dem hier vorgestellten Verfahren für die verwendete Imprintanlage noch deutlich unter dem der optischen Projektions-Lithografieanlagen. Auch die für Mehrlagenprozesse notwendige Überlagegenauigkeit ist bei der verwendeten Anlage noch nicht erreicht. So zeigten erste Untersuchungen, dass die Überlagegenauigkeit für die verwendete Imprintanlage bei 250 nm liegt, was etwa zwei Größenordnungen zu gering ist. Um dies zu verbessern wird aktuell an Konzepten gearbeitet, um durch eine Kontaktjustierung die Überlagegenauigkeit deutlich zu verbessern und somit interessant für industrielle Mehrlagenprozesse zu machen. Im Bereich der Anwendung der UV-NIL als Nanostrukturierungsverfahren können die Kanallängen der vorgestellten n-Kurzkanal MOSFETs reduziert und der Gesamtprozess weiter optimiert werden. Mit den hier teilweise grundlegenden Resultaten zur UV-NIL können zukünftig Prozessentwicklungen mit dem Ziel durchgeführt werden, den Einsatz der UV-NIL im Bereich der „dual damascene“ Technologie und der Herstellung von nanoskaligen Datenspeichern („crossbar array“) zu untersuchen, wofür ein großes wirtschaftliches Potential gesehen wird.

## 8 Literaturverzeichnis

- [Abe76] H. Abe, K. Nishioka, S. Tamura, and A. Nishimoto, *Suppl. Jpn. J. Appl. Phys.* **15**, 25 (1976)
- [Bai00] T. Bailey, B. J. Choi, M. Colburn, M. Meissl, S. Shaya, J. G. Ekerdt, S. V. Sreenivasan, and C. G. Willson, *J. Vac. Sci. Technol. B* **18**, 3572 (2000)
- [Bel90] M. N. Bellon-Fontaine, N. Mozes, H. C. van der Mei, and O. Sjollem, *Cell Biophysics* **17**, 93 (1990)
- [Bro92] I. Brodie and J. J. Muray, *The Physics of Micro/Nano-Fabrication*, 1st ed. (Plenum Press, New York and London, 1992)
- [Bro96] T. Brozek, V. Prabhakar, J. Werking, Y. D. Chan, and C. R. Viswanathan, 1st International Symposium on Plasma-Induced Damage (Santa Clara, California, 1996), pp. 177-180
- [Bru07] W. H. Bruenger, A. H. Dietzel, and H. Loeschner, *Surf. Coat. Technol.* **201**, 8437 (2007)
- [But91] J. W. Butterbaugh, D. C. Gray, and H. H. Sawin, *J. Vac. Sci. Technol. B* **9**, 1461 (1991)
- [Cha77] B. N. Chapman and V. J. Minkiewicz, *J. Vac. Sci. Technol.* **15**, 329 (1977)
- [Cho95] S. Y. Chou, P. R. Krauss, and P. J. Renstrom, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 3114 (1995)
- [Chr98] S. D. Christian, A. R. Slagle, E. E. Tucker, and J. F. Scamehorn, *Langmuir* **14**, 3126 (1998)
- [Con97] C. Constantine, D. J. Johnson, R. J. Westerman, T. Coleman, T. Faure, and L. Dubuque, *Proc. of SPIE* **3236**, 94 (1997)
- [Dau06] W. J. Dauksher, N. V. Le, E. S. Ainley, K. J. Nordquist, K. A. Gehoski, S. R. Young, J. H. Baker, D. Conve, and P. S. Mangat, *Microelectron. Eng.* **83**, 929 (2006)
- [Dra07] M. Drapeau, V. Wiaux, E. Hendrickx, S. Verhaegen, and T. Machida, *Proc. of SPIE* **6521**, 652109 (2007)

- [Ede06] S. Eder-Kapl, E. Haugeneder, H. Langfischer, K. Reimer, J. Eichholz, M. Witt, H.-J. Doering, J. Heinitz, and C. Brandstaetter, *Microelectron. Eng.* **83**, 968 (2006)
- [Fla79] D. L. Flamm, C. J. Mogab, and E. R. Sklaver, *J. Appl. Phys.* **50**, 6211 (1979)
- [Fra90] G. Franz, *Oberflächentechnologie mit Niederdruckplasmen*, 2. Aufl. (Springer, Berlin Heidelberg New York, 1990)
- [Fre06] M. G. Freire, P. J. Carvalho, A. J. Queimada, I. M. Marrucho, and J. A. P. Coutinho, *J. Chem. Eng. Data* **51**, 1820 (2006)
- [Got92] R. A. Gottscho, C. W. Jurgensen, and D. J. Vitkavage, *J. Vac. Sci. Technol. B* **10**, 2133 (1992)
- [Hab97] G. Habenicht, *Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendungen*, 3. Aufl. (Springer, Berlin Heidelberg New York, 1997)
- [Hae87] R. A. Haefer, *Oberflächen- und Dünnschicht-Technologie Teil I*, 1. Aufl. (Springer, Berlin Heidelberg New York, 1987)
- [Har54] E. F. Hare, E. G. Shafrin, and W. A. Zisman, *J. Phys. Chem.* **58**, 236 (1954)
- [Har07] N. Harned, M. Goethals, R. Groeneveld, P. Kuerz, M. Lowisch, H. Meijer, H. Meiling, K. Ronse, J. Ryan, M. Tittnich, H.-J. Voorma, J. Zimmermann, U. Mickan, and S. Lok, *Proc. of SPIE* **6517**, 651706 (2007)
- [Her99] E. Hering, R. Martin und M. Stohrer, *Physik für Ingenieure*, 7. Aufl. (Springer, Berlin Heidelberg New York, 1999)
- [Hop98] B. Hoppe, *Mikroelektronik 2*, 1. Aufl. (Vogel Verlag, Würzburg, 1998)
- [Irm05] M. Irmischer, J. Butschke, G. Hess, F. Letzkus, M. Renno, H. Sailer, H. Schulz, A. Schwersenz, E. Thompson, and B. Vratzow, *Proc. of SPIE* **5992**, 59922E (2005)
- [Iwa04] H. Iwai, *Solid-State Electronics* **48**, 497 (2004)
- [Jen07] W.-L. Jen, F. Palmieri, B. Chao, M. Lin, J. Hao, J. Owens, K. Sotoodeh, R. Cheung, and C. G. Willson, *Proc. of SPIE* **6517**, 65170K-1 (2007)
- [Kah60] D. Kahng and M. M. Atalla, *Silicon-Silicon Dioxide Field Induced Surface Devices*, presented at IRE Solid-State Device Research Conf. (Carnegie Inst. Technol., Pittsburgh, 1960)

- [Kel93] J. H. Keller, J. C. Forster, and M. S. Barnes, *J. Vac. Sci. Technol. A* **11**, 2487 (1993)
- [Kil76] J. S. Kilby, *IEEE Trans. Electron Devices* **23**, 648 (1976)
- [Kin05] H. Kinoshita, *J. Vac. Sci. Tech. B* **23**, 2584 (2005)
- [Kim07] D.-k. Kim, Y. K. Kim, and H. Lee, *Mater. Sci. Semicond. Process.* **10**, 41 (2007)
- [Klo88] J. G. Kloosterboer, in *Advances in Polymer Science - Network Formation by Chain Crosslinking Photopolymerization and its Applications in Electronics*, 1st ed. (Springer, Berlin Heidelberg New York, 1988)
- [Lec99] H. Lechner, *Die Kontaktwinkelmessung: Ein Verfahren zur Bestimmung der freien Grenzflächenenergie von Festkörpern* (Seminarskript, KRÜSS GmbH SÜD, 1999)
- [Leh05] C. Lehrer, *Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg* (2005)
- [Li02] X. Li, L. Ling, X. Hua, M. Fukasawa, G. S. Oehrlein, M. Barela, and H. M. Anderson, *J. Vac. Sci. Technol. A* **21**, 284 (2002)
- [Lin03] B. J. Lin, *J. Microlith., Microfab., Microsyst.* **2**, 88 (2003)
- [Lon02] P. M. Lonardo, D. A. Lucca, and L. De Chiffre, *Annals of the CIRP* **51**, 701 (2002)
- [Mac05] S. MacDonald, G. Hughes, M. Stewart, F. Palmieri, and C. G. Willson, *Proc. of SPIE* **5992**, 88 (2005)
- [Mat01] M. Matsui, T. Tatsumi, and M. Sekine, *J. Vac. Sci. Technol.* **19**, 2089 (2001)
- [Miw02] K. Miwa and T. Mukai, *J. Vac. Sci. Technol. B* **20**, 2120 (2002)
- [Moo65] G. E. Moore, *Electronics* **8**, 38 (1965)
- [Muz00] E. Muzio, *Optical Lithography Cost of Ownership (CoO) – Final Report for LITG501, International SEMATECH* (2000)
- [Nak80] H. Nakata, K. Nishioka, and H. Abe, *J. Vac. Sci. Technol.* **17**, 1351 (1980)
- [Nak07] T. Nakata, T. Kodama, M. Komori, N. Onoda, and T. Uchiyama, *Proc. of SPIE* **6519**, 65190I (2007)

- [Nea92] D. A. Neanen, *Semiconductor physics and devices*, 1st ed. (IRWIN, Burr Ridge Boston Sydney, 1992)
- [Nis99] T. Nishino, M. Meguro, K. Nakamae, M. Matsushita, and Y. Ueda, *Langmuir* **15**, 4321 (1999)
- [Ort02] A. Ortiz-Conde, F. J. Garcia Sanchez, J. J. Liou, A. Cerdeira, M. Estrada, and Y. Yue, *Microelectronics Reliability* **42**, 583 (2002)
- [Owe69] D. K. Owens and R. C. Wendt, *J. Appl. Polym. Sci.* **13**, 1741 (1969)
- [Pan00] S. W. Pang, in *Handbook of advanced plasma processing techniques - Surface damage induced by dry etching*, edited by R. J. Shul and S. J. Pearton, 1st ed. (Springer, Berlin Heidelberg New York, 2000)
- [Pal07] F. Palmieri, M. Stewart, K. Jen, C. G. Willson, and G. Schmid, *Solid State Technol.* **9**, 42 (2007)
- [Rei77] L. Reimer und G. Pfefferkorn, *Rasterelektronenmikroskopie*, 2. Aufl. (Springer, Berlin Heidelberg New York, 1977)
- [Res00] D. J. Resnick, in *Handbook of advanced plasma processing techniques – Photomask etching*, edited by R. J. Shul and S. J. Pearton, 1st ed. (Springer, Berlin Heidelberg New York, 2000)
- [Ro07] H. W. Ro, H.-J. Lee, E. K. Lin, A. Karim, D. R. Hines, D. Y. Yoon, and C. L. Soles, *Proc. of SPIE* **6517**, 651715-1 (2007)
- [San02] F. J. Garcia Sanchez, A. Ortiz-Conde, A. Cerdeira, M. Estrada, D. Flandre, and J. J. Liou, *IEEE Trans. Electron Devices* **49**, 82 (2002)
- [San03] A. Sankara and M. J. Kushner, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 1824 (2003)
- [Sch76] J. Schultz, K. Tsutsumi, and J. B. Donnet, *J. Colloid Interface Sci.* **59**, 272 (1976)
- [Sch98] M. Schaepkens and G. S. Oehrlein, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 1293 (1998)
- [Sch03] H. Schiff and L. J. Heyderman, in *Alternative Lithography – Nanorheology*, edited by C. M. Sotomayor Torres, 1st edition (Kluwer Academic Publisher, Boston Dordrecht London, 2003)
- [Sch06] H. C. Scheer, N. Bogdanski, M. Wissen, T. Konishi, and Y. Hirai, *Microelectron. Eng.* **83**, 843 (2006)

- [Sch07] H. Schmitt, L. Frey, M. Rommel, C. Lehrer, and H. Ryssel, *J. Vac. Sci. Technol. B* **25**, 785 (2007)
- [Set07] E. van Setten, W. de Boeij, B. Hepp, N. le Masson, G. Swinkels, and M. van de Kerkhof, *Proc. of SPIE* **6520**, 65200C (2007)
- [Smi01] K. H. Smith, J. R. Wasson, P. J. S. Mangat, W. J. Dauksher, and D. J. Resnick, *J. Vac. Sci. Technol. B* **19**, 2906 (2001)
- [Ste05] M. D. Stewart and C. G. Willson, *MRS Bulletin* **30**, 947 (2005)
- [Sug98] M. Sugawara, *Plasma Etching – Fundamentals and Applications*, 1st ed. (Oxford University Press, New York, 1998)
- [Tro79] R. R. Troutman, *IEEE Trans. Electron Devices* **26**, 461 (1979)
- [Vra03] B. Vratzow, A. Fuchs, M. Lemme, W. Henschel, and H. Kurz, *J. Vac. Sci. Technol. B* **21**, 2760 (2003)
- [Wid96] D. Widmann, H. Mader, und H. Friedrich, *Technologie hochintegrierter Schaltungen*, 2. Aufl. (Springer, Berlin Heidelberg New York, 1996)
- [Wol95] S. Wolf, *Silicon Processing for the VLSI Era Volume 3*, 1st ed. (Lattice Press, Sunset Beach, 1995)
- [Wol00] S. Wolf and R. N. Tauber, *Silicon Processing for the VLSI Era Volume 1*, 2nd ed. (Lattice Press, Sunset Beach, 2000)
- [Wor03] M. J. Word, I. Adesida, and P. R. Berger, *J. Vac. Sci. Technol. B* **21**, L12 (2003)
- [Wu06] B. Wu, *J. Vac. Sci. Technol. B* **24**, 1 (2006)
- [Wur07] S. Wurm, C.-U. Jeon, and M. Lercel, *Proc. of SPIE* **6517**, 651705 (2007)
- [Yan98] K. Yang, *Proc. of SPIE* **3412**, 233 (1998)
- [You05] T. Young, *Philos. Trans. R. Soc. London* **95**, 65 (1805)
- [Zha98] W.-L. Zhang and Z.-L. Yang, *Microelectronics Reliability* **38**, 1465 (1998)
- [Zhu88] J. Zhu, R. A. Martin, and J. Y. Chen, *IEEE Trans. Electron Devices* **35**, 145 (1988)

*Quellen aus dem Internet*

- [WWW1] <http://public.itrs.net> (21.2.2008)
- [WWW2] <http://www.asml.com/asml/show.do?ctx=6720&rid=27376> (21.2.2008)
- [WWW3] <http://www.kruss.de/newsletter/news0707/microsite/index.php?seite=applikation.html> (21.2.2008)
- [WWW4] [http://www.veeco.com/search.php?search\\_term=rms+ra&x=15&y=11](http://www.veeco.com/search.php?search_term=rms+ra&x=15&y=11)  
(21.2.2008)
- [WWW5] [http://fy.chalmers.se/assp/snl/public/chemicals/Balzers\\_Chrome\\_Etch.html](http://fy.chalmers.se/assp/snl/public/chemicals/Balzers_Chrome_Etch.html)  
(21.2.2008)

*Eigene Veröffentlichungen*

- [1] P. J. Wellmann, T. L. Straubinger, P. Desperrier, R. Müller, U. Künecke, S. A. Sakwe, H. Schmitt, A. Winnacker, E. Blanquet, J.-M. Dedulle, and M. Pons, *Modified physical vapor transport growth of SiC – Control of gas phase composition for improved process conditions*, Mater. Sci. Forum **483-485**, 25-30 (2005)
- [2] R. Müller, U. Künecke, R. Weingärtner, H. Schmitt, P. Desperrier, and P. Wellmann, *High Al-doping of SiC using a modified PVT (M-PVT) growth set-up*, Mater. Sci. Forum **483-485**, 31-34 (2005)
- [3] H. Schmitt, R. Müller, M. Maier, A. Winnacker, and P. Wellmann, *Photoluminescence study of in-situ rare earth doped PVT-grown SiC single crystals*, Mater. Sci. Forum **483-485**, 445-448 (2005)
- [4] H. Schmitt, L. Frey, H. Ryssel, M. Rommel, and C. Lehrer, *UV nanoimprint materials: Surface energies, residual layers, and imprint quality*, J. Vac. Sci. Technol. B **25**, 785-790 (2007)
- [5] P. J. Wellmann, U. Karl, S. Kleber, and H. Schmitt, *Cathodoluminescence characterization of organic semiconductor materials for light emitting device applications*, J. Appl. Phys. **101**, 113704 1-6 (2007)
- [6] H. Schmitt, M. Zeidler, M. Rommel, A. J. Bauer, and H. Ryssel, *Custom-specific UV nanoimprint templates and life-time of antisticking layers*, Microelectron. Eng. **85**, 897-901 (2008)

## Anhang

Im Folgenden wird eine im Rahmen der Arbeit neu entwickelte Auswertemethode hergeleitet, mit der die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten mittels Kontaktwinkelmessung bestimmt werden kann.

Nach Owens und Wendt [Owe69] gilt folgender Zusammenhang:

$$\sigma_{ls} = \sigma_s + \sigma_l - 2\sqrt{\sigma_l^d \sigma_s^d} - 2\sqrt{\sigma_s^p \sigma_l^p} . \quad (1)$$

Hier ist  $\sigma_{ls}$  die Oberflächenenergie zwischen der festen und der flüssigen Phase,  $\sigma_s$  die Oberflächenenergie für die Festkörperoberfläche und  $\sigma_l$  die Oberflächenspannung für die Flüssigkeit (UV-Polymer). Die hochgestellten Indices d und p beschreiben jeweils den dispersiven und den polaren Anteil an der Oberflächenenergie. Kombiniert man Gl. (1) mit der Gl. (2) von Young [You05],

$$\sigma_s = \sigma_{ls} + \sigma_l \cos \Theta , \quad (2)$$

wobei  $\Theta$  dem Kontaktwinkel am Tripelpunkt von Festkörperoberfläche, UV-Polymer und Gasphase entspricht, erhält man folgende Gl. (3):

$$\sigma_l(1 + \cos \Theta) = 2\sqrt{\sigma_l^d \sigma_s^d} + 2\sqrt{\sigma_l^p \sigma_s^p} . \quad (3)$$

Wenn nun die Festkörperoberfläche 1 ein rein dispersives (PTFE) und die Festkörperoberfläche 2 ein rein polares (Quarzglas) Material ist, so kann Gl. (3) für die Festkörperoberfläche 1 zu Gl. (4):

$$\frac{1 + \cos \Theta_1}{2\sqrt{\sigma_{s1}^d}} = \frac{\sqrt{\sigma_l^d}}{\sigma_l} , \quad (4)$$

und für die Festkörperoberfläche 2 zu Gl. (5):

$$\frac{1 + \cos \Theta_2}{2\sqrt{\sigma_{s2}^p}} = \frac{\sqrt{\sigma_l^p}}{\sigma_l}, \quad (5)$$

vereinfacht werden. Weiter folgt mit dem Zusammenhang aus Gl. (6):

$$\sigma = \sigma^p + \sigma^d, \quad (6)$$

für Gl. (4) die Gl.(7):

$$\begin{aligned} \frac{1 + \cos \Theta_1}{2\sqrt{\sigma_{s1}^d}} &= \frac{\sqrt{\sigma_l^d}}{\sigma_l^p + \sigma_l^d} = v_1 \\ \Rightarrow \sigma_l^p &= \frac{\sqrt{\sigma_l^d}}{v_1} - \sigma_l^d, \end{aligned} \quad (7)$$

und für Gl. (5) die Gl. (8):

$$\frac{1 + \cos \Theta_2}{2\sqrt{\sigma_{s2}^p}} = \frac{\sqrt{\sigma_l^p}}{\sigma_l^p + \sigma_l^d} = v_2. \quad (8)$$

Die Abkürzungen  $v_1$  und  $v_2$  wurden hier eingeführt, um die Komplexität nachfolgender Gleichungen zu verringern. Setzt man nun im Folgenden Gl. (7) in Gl. (8) ein, so ergibt sich nach Umformung:

$$\frac{\sqrt{\frac{\sqrt{\sigma_l^d}}{v_1} - \sigma_l^d}}{\frac{\sqrt{\sigma_l^d}}{v_1} - \sigma_l^d + \sigma_l^d} = v_2,$$

und weiter:

$$\frac{\sqrt{\frac{\sqrt{\sigma_l^d}}{v_1} - \sigma_l^d}}{\sqrt{\sigma_l^d}} = \frac{v_2}{v_1}. \quad (9)$$

Löst man die Gl. (9) nach dem dispersiven Anteil der Oberflächenspannung der Flüssigkeit auf, so ergibt sich folgende Gl. (10):

$$\sigma_l^d = v_1^{-2} \left[ \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 + 1 \right]^{-2}. \quad (10)$$

Der polare Anteil der Oberflächenspannung kann durch Einsetzen von Gl. (10) in Gl (7) ermittelt werden:

$$\sigma_l^p = v_1^{-2} \left\{ \left[ \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 + 1 \right]^{-1} - \left[ \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 + 1 \right]^{-2} \right\}. \quad (11)$$

Die gesamte Oberflächenspannung der untersuchten Flüssigkeit wird dann additiv aus den polaren und dispersiven Anteilen nach Gl. (6) ermittelt.

## Stichwortverzeichnis

### A

Abschnürpunkt .....	93
Acrylate .....	73, 76, 81, 83, 87
Adhäsion .....	82
mechanische .....	44, 68
spezifische .....	33, 76, 83
Adsorption .....	33
AFM .....	37
Anisotropie .....	23, 25, 49
Antihafschicht .....	17, 20, 69, 74
Abnutzung .....	74, 88, 89, 111
F <sub>13</sub> TCS .....	70, 88
Kontaktwinkel .....	70, 76
Oberflächenenergie .....	71
Optool DSX .....	70, 88
Quarzoberfläche, Modifizierung der ....	17
Antireflexionsschicht .....	5, 76
Arrhenius-Abhängigkeit .....	27
Aspektverhältnis .....	23, 29, 39, 41
Ätzanlage	
ICP .....	28
RIE .....	27, 30
Substratkühlung .....	29
Ätzgas .....	22, 24, 27, 31, 59, 64, 66
Ätzmaskierung .....	18, 46
Auswahl der .....	49, 96
Flankensteilheit .....	53, 54
Reinigung .....	50, 69
Selektivität .....	50, 97
Ätzprofil .....	24, 60, 63
Flankenwinkel .....	15, 37, 54

Microtrenching .....	16, 31, 61, 63, 68
Ätzrate .....	22, 28, 56
Druck, abhängig von .....	25, 30, 53
Gasfluss, abhängig von .....	24, 59, 62, 64
HF-Leistung, abhängig von .....	26, 30, 57
Messung der .....	37
RIE-lag .....	29
Self-BIAS, abhängig von .....	27, 62, 64
Temperatur, abhängig von .....	27, 58
Ätzstopp .....	101
Ätzverfahren	
nasschemisch .....	22, 30, 52
trockenchemisch .....	22, 31, 49, 53
Ausgangskennlinie .....	93, 103

### B

Bauelement, MOSFET .....	92, 99
Benetzung .....	33, 76, 81
Bird's beak .....	102, 108

### C

Carosche Säure .....	45
Chromätzprozess	
nasschemisch .....	30, 52
trockenchemisch .....	30, 52
Chromätzprozess, trockenchemisch	
Druck .....	30, 53
Flankenwinkel .....	54
Maßhaltigkeit .....	30, 50, 55
Überätzung .....	30, 53, 55

### D

Delta-Doping .....	105
--------------------	-----

Drainspannung .....95, 104  
 Drainstrom.....95, 104

**E**

Eintropfendosierer .....21, 85  
 Elektronenstrahlaufdampfen .....46  
 Elektronenstrahl-Lithografie ....**8**, 49, 54, 83  
   Auflösung.....9, 41, 54  
   Feldemission .....9  
   Glühkathode .....9  
   Lack.....9, 49  
   Wellenlänge.....9

**F**

Ferminiveau.....93  
 Fokussierte Ionenstrahlen.....56  
   Anlage .....56  
   Defekte .....56, 61, 63  
   Platinabscheidung .....56  
   Sputtererosion.....56  
 Fresnel-Beugung .....4

**G**

Gasfluss .....**24**, 59, 62, 64  
 Gatespannung .....93, 95, 105  
 Generationsrate.....24

**H**

Haftung.....18, 20, 33, 48, 73, **76**, 87  
 Haftvermittler .....20, 76, 100  
 Heißprägen .....12  
   Defekte .....13  
   Prägeform .....12  
   Prägelack .....12

HF-Leistung.. 24, 26, 30, 49, 50, 57, 64, 67,  
   69, 97  
 HMDS.....33, 76, 82  
 HSQ .....9, 10

**I**

Impedanzanpassung.....27, 28  
 Implantation.....11, 56, 100, 105  
 Imprintanlage.....15, 21, 44, 85  
 Ink-Jet-System .....14, 20, 22, 85, 99  
 Interferometer .....84, 100  
 Inversion .....92  
   schwache.....93, 96  
   starke.....93

**K**

Kohäsion .....33  
 Kollimator.....21  
 Kontaktlochätzen .....30  
 Kontaktwinkel.....33, 70, 73, 77, 79  
 Kontaktwinkelmessung.....33, 70, 78  
   3-Phasen-System.....33  
   Messgerät.....35  
   Young .....34  
 Korngrenzenätzung.....52

**L**

line edge roughness.....52  
 Lithografie  
   Elektronenstrahl .....**8**, 49  
   EUV .....7  
   Nanoimprint.....**11**, 96  
   Optische .....**4**, 48, 96  
 Lithosil LQ1.....44

<b>M</b>	
Maskenblank .....	42
Moore, G. ....	3
MOSFET .....	92
Aufbau .....	92
Ausgangskennlinie .....	94, 104
Charakterisierung .....	102
Einsatzspannung .....	95, 107
Herstellungsprozess .....	96
Kurzkanal .....	95
Prinzip .....	92
Swing .....	96, 107
Übertragungskennlinie .....	95, 104
MOSFET, Kurzkanaleffekte .....	95
DIBL .....	104
Kanallängenmodulation .....	104
Punch-Through .....	105, 107
<b>N</b>	
Numerische Apertur .....	5, 10
<b>O</b>	
Oberflächenenergie .....	33
Auswertung .....	35, 70
PTFE .....	78
Quarzglas .....	70, 78
Quarzglas mit F <sub>13</sub> TCS .....	70
Quarzglas mit Optool DSX .....	71
Teflon .....	71
Oberflächenenergie	
dispersiver Anteil .....	35
polarer Anteil .....	35
Oberflächenrauheit .....	45, 66, 110
Chrom .....	47
Einfluss auf Prägung .....	16
EUV-Lithografie .....	7
Lithosil LQ1 .....	45
Messung der .....	37
Ra .....	39
RMS .....	39
Oberflächenspannung .....	34
1-Oktanol .....	36, 80
Auswertung .....	78
dispersiver Anteil .....	79
DI-Wasser .....	36, 80
polarer Anteil .....	79
Prägelacke .....	77, 80
Tensiometer .....	77
Optische Lithografie .....	4, 48, 76, 96
Auflösung .....	5
Defekte .....	4
Entwickler .....	48
Fotolack .....	48
Fresnel-Beugung .....	4
Kontakt-Lithografie .....	4
Maskenjustierer .....	48
Nahfeld-Lithografie .....	4
Negativ-Prozess .....	4
Positiv-Prozess .....	4, 48
Projektions-Lithografie .....	5
Projektions-Lithografieanlage .....	7
Rayleigh-Kriterium .....	5, 10
Rayleigh-Tiefe .....	5
<b>P</b>	
Parallelplattenreaktor .....	27
Plasma .....	22
Anregungsfrequenz .....	27

Dichte .....	32	optimierte Einstellungen .....	67
Elektronen .....	22, 26	Optimierung der .....	55
induktiv gekoppeltes .....	28	Profil .....	31, 56, 60, 63
Ionen .....	26	Rauheit .....	56
Potentialgefälle .....	26, 28	Seitenwandpassivierung .....	31
Reinigung .....	49, 69	Selektivität .....	56
Stoßionisation .....	27	Self-BIAS, Einfluss der .....	62, 64
Verweilzeit .....	24	Temperatur, Einfluss der .....	57
Weglänge, mittlere freie .....	25, 29	Quarzprägeformen .....	15, 41
PMMA .....	9, 12, 76, 82, 101	Anforderungen .....	15, 44
Prägelack .....	15	Antihafschicht .....	17, 70, 89
Ätzbeständigkeit .....	98	Hersteller .....	42
Ätzmaskierung .....	96	Herstellung etabliertes Konzept .....	42
Aufbringen .....	14	Herstellung neues Konzept .....	43
Benetzung .....	76	Mesa .....	43
Haftung .....	20, <b>76</b> , <b>81</b>	Reinigung .....	69
Heißprägen .....	12		
Kontaktwinkel .....	77	<b>R</b>	
Oberflächenspannung .....	<b>77</b> , 80	Radikalfotoinitiator .....	74
Restlackschicht .....	18, 20, <b>83</b> , 98	Rasterkraftmikroskop .....	37, 45
UV-härtend .....	14, 44, <b>73</b>	Raumladungszone .....	93, 105
Viskosität .....	20, <b>83</b>	Rayleigh-Kriterium .....	5, 10
Wechselwirkung Antihafschicht .....	87	Rayleigh-Tiefe .....	5
PTFE .....	76	Reaktives Ionenätzen .....	22
<b>Q</b>		Anisotropie .....	23
Quarzätzprozess .....	30	Ätzanlagen .....	27
Ätzgase .....	31	Ätzgaszusammensetzung .....	24
Ätzmaskierung .....	49, 51	Chrom .....	29, 52
Ätzrate .....	31, 56	Erwärmung Oberfläche .....	22
Gasflussrate, Einfluss der .....	62	Gasfluss .....	24
Gaszusammensetzung, Einfluss der ...	59,	HF-Leistung .....	26
64		Microtrenching .....	31
HF-Leistung, Einfluss der .....	57	physikalisch .....	23
		Poly-Si .....	97

Prägelack .....	98	Sputterätzen .....	23
Prozessdruck.....	25	Stufenhöhenmessverfahren.....	37
Quarz .....	30, 55	Messungen .....	50, 84
RIE-lag .....	29	Swing .....	<b>96</b> , 104
Selektivität.....	22		
Self-BIAS.....	26	<b>T</b>	
Strahlenschäden.....	29	Teflon.....	17, 71, 81
Temperatur .....	27	TEM.....	103
Reoxidation .....	101, 105, 108		
Restlackschicht.....	18, <b>83</b>	<b>U</b>	
Dicke .....	19	Übertragungskennlinie.....	95, 102, 103
Entfernen .....	98	Unterswellenstrom .....	96
Homogenität.....	99	UV-Nanoimprint-Lithografie .....	11
Keilfehler.....	19	Imprintanlage.....	21
Lackvolumen, abhängig von .....	85	Prägeformen.....	15, 29
Viskosität, abhängig von.....	20, 73, 83	Prägelack.....	14
		Prägelacke..	<b>18</b> , 44, 73, 76, 80, 83, 87, 98
<b>S</b>		Prinzip.....	14
Sättigungsspannung.....	94	Restlackschicht .....	18, 83, 85, 98
Sekundärelektronen.....	9	Separation .....	15, 20, 68, 77, 87
Selektivität.....	<b>22</b> , 27, 30, 32, 49, 56	Strukturübertragung.....	41, 73, 91
Self-BIAS .....	24, <b>26</b> , 49, 53, 57, 61		
Silan.....	17, 70	<b>W</b>	
Spektrometer .....	44	Weak boundary layer .....	33, 76, 83

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Professor Dr. H. Ryssel danke ich für die Möglichkeit zur Durchführung dieser Arbeit am Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente und für die Betreuung.

Herrn Professor Dr. P. Wellmann danke ich herzlich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Herrn Prof. Dr. Frey, Dr. Christoph Lehrer und Dr. Mathias Rommel danke ich für die hilfreichen Anregungen und deren Interesse an der Arbeit.

Den Firmen SUSS MicroTec, S.E.T., Asahi Glass Company und NanoWorld Services GmbH danke ich für die sehr gute Kooperation.

Mein Dank gilt ebenfalls allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Elektronische Bauelemente und des Fraunhofer Instituts für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie. Im Besonderen den Kolleginnen und Kollegen der Gruppe „Analytik und Messtechnik“ sowie meinen Zimmerkollegen Anette Daurer, Silke Petersen und Dr. Mathias Rommel für die nette Atmosphäre und deren Unterstützung. Auch dem Team im Reinraum mit Stephanie Natzer, Martin Heilmann, Barbara Kupfer, Sieglinde Elsesser, Angela Meixner, Stefan Knopf, Herbert Hofmann und Erich Pauer danke ich für die Hilfe bei den Prozessen. Dr. Michael Jank und Christian Kampen danke ich für die Hilfe bei der Erstellung des Transistorprozesses. Susanne Beuer danke ich ganz herzlich für ihre Unterstützung angefangen von Maskezeichnungen bis zu den FIB-Querschnitten, wobei bei Letzteren auch Jörg Stockmeyer eine große Hilfe war. Silke Petersen und Brigitte Amon danke ich für die schönen TEM-Aufnahmen.

Meinem Diplomanden Martin Zeidler und meinem ehemaligen Azubi Mathias Herbst danke ich für die Arbeiten zu den Quarzprägeformen.

Abschließend danke ich ganz besonders meiner Familie und vor allem meiner Freundin Kerstin, die mir mit Geduld stets den Rücken frei gehalten und mich immer unterstützt hat.

## **Lebenslauf**

### Persönliche Daten:

Name, Vornamen: Schmitt, Holger Jörg  
geboren am: 2. Juni 1977  
in: Würzburg  
Familienstand: ledig

### Schulausbildung:

9/84-7/88 Grundschole Veitshöchheim  
9/88-7/97 Friedrich-König-Gymnasium Würzburg  
Abschluss: Abitur

### Wehrersatzdienst:

9/97-9/98 Arbeiter-Samariter-Bund

### Studium:

10/98-5/04 Studium der Werkstoffwissenschaften an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Abschluss: Diplom

### Beruflicher Werdegang:

7/04-3/08 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente (LEB), Cauerstraße 6, 91058 Erlangen  
seit 4/08 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB), Schottkystraße 10, 91058 Erlangen