Versuch 2: Fotolithographie

1. Motivation

1.1. Mikrosystemtechnik

Die Mikrosystemtechnik (MST) ist eine relativ junge Technologie die während der 80er Jahre als Weiterentwicklung der Mikroelektronik entstanden ist. Die MST nutzt dabei im Besonderen die Fertigungsverfahren der Mikroelektronik um die Techniken der Signalverarbeitung, Sensorik und Aktorik in einem intelligenten Gesamtsystem zu integrieren, welches dadurch eigenständig Umgebungseinflüsse erkennen und darauf reagieren kann. Die Fertigungsverfahren der MST werden traditionell unter dem Begriff der Mikrotechnik zusammengefasst, welcher alle Verfahren beinhaltet, die zur Schicht- und Strukturherstellung eingesetzt werden. Charakteristisch für die MST sind neben der Systemintegration auch die Abmessungen der gefertigten Komponenten. Typischerweise spricht man von Mikrotechnik, wenn mindestens eine der charakteristischen Dimensionen der gefertigten Struktur in der Größenordnung <100 µm liegt. Im Rahmen dieses Versuches werden besonders die Grundlagen der Fotolithographie behandelt, welche eine der Basistechnologie zur Herstellung von Strukturen darstellt.

1.2 Anwendungen im Kontext der Werkstoffwissenschaften

Die Anwendung der Mikrotechnischen Fertigungsverfahren, oder kompletter Mikrosystemen ist auch in der Werkstoff-Forschung von großem Interesse, weil sie einige einzigartige Möglichkeiten der Prozessierung bieten.

Diese Möglichkeiten umfassen zum Beispiel die Anwendung der Verfahren im Bereich der kombinatorischen Materialforschung. Diese bietet eine zeit- und kosteneffiziente Methode zur Herstellung und Charakterisierung von verschiedenen Materialzusammensetzungen. Ein Grundkonzept der kombinatorischen Materialforschung ist die Herstellung sogenannter Materialbibliotheken (Abb.1) mit beispielsweise kontinuierlichen Zusammensetzungsvariationen, die sich für eine anschließende systematische Analyse verschiedener Eigenschaften eignen. Kombinatorische Untersuchungen von komplexen Materialeigenschaften führen aufgrund des hohen Durchsatzes und der Systematik schnell zu Ergebnissen. Daher lassen sich die kombinatorischen Methoden als effektives Hilfsmittel der Materialforschung bezeichnen, mit der Hauptaufgabe: ein fundamentales Verständnis der Zusammenhänge zwischen Zusammensetzung, Struktur und Eigenschaften zu schaffen.

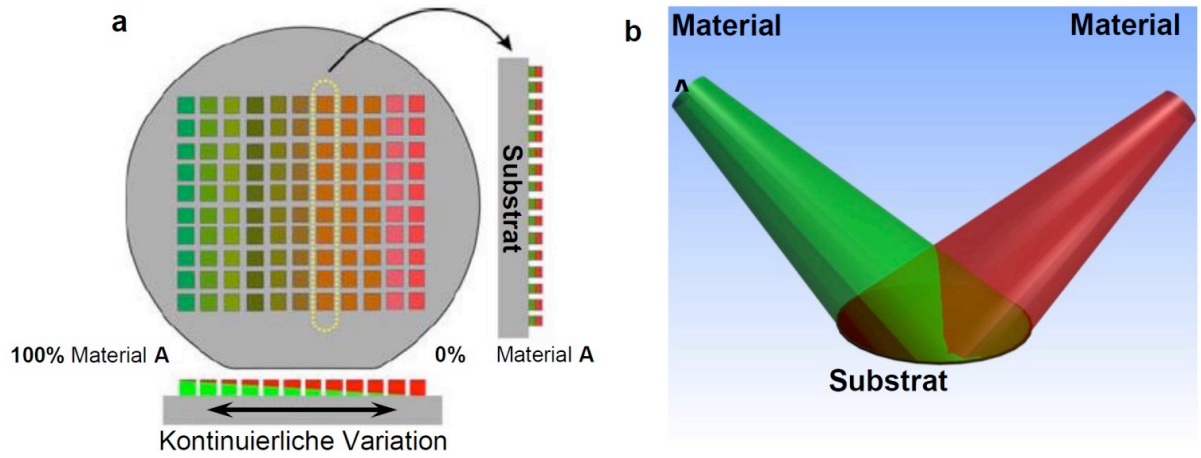

Abb. 1 a) Schematische Darstellung einer zweikomponentigen Materialbibliothek, b) Schematische Herstellung einer Materialbibliothek mit kontinuierlicher Zusammensetzungsvariation mittels Kathodenzerstäubung.

Im Anschluss an die Schichtherstellung können die Schichten bereits im abgeschiedenen Zustand charakterisiert werden oder sie können einer Nachbehandlung unterzogen werden. Dazu gehören unter anderem verschiedene Glühbehandlungen (Tempern, Rekristallisieren), Dotieren der Schicht oder weitere Schichtmodifikationen, wie beispielsweise chemisch-mechanisches Polieren. Zu den wichtigsten Schichteigenschaften zählen die Schichtdicke, Oberflächen-beschaffenheit, Kristallmorphologie, Gefüge, Dichte, Kontaminationen, Brechzahl, Schichthaftung, Härte, E-Modul, magnetische Eigenschaften und elektrischer Widerstand. Jede dieser Eigenschaften lässt sich durch verschiedene Charakterisierungsverfahren analysieren.

Die Anwendung von Mikrosystemen ist besonders aufgrund der kleinen Dimensionen interessant, weil sie hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften Versuche ermöglichen, welche durch makroskopische Systeme nicht zu realisieren sind. Exemplarisch sei hier die Verwendung von mikroskopischen Heizplatten genannt. Bei diesen Systemen wird eine meanderförmige Leiterbahn auf einer dünnen Membran als Heizelement genutzt. Durch die geringe thermische Masse der Membran und Leiterbahn können selbst mit geringen Leistungen Heiz- und Kühlraten von bis zu 10^4 K/s mit Temperaturen von über 1300 K erreicht werden. In Abb. 2 ist ein solches System für die Anwendung im Transmissionselektronenmikroskop zu sehen. Die Proben werden hier in durchstrahlbaren Bereichen zwischen der Heizwendel positioniert und werden während des Heizvorgangs durchstrahlt. Dadurch können die Einflüsse der Temperatur auf das Material (z.B. Phasenbildungsprozesse) in-situ beobachtet werden.

Mikrosysteme können allerdings auch für andere Charakterisierungsmethoden wie z.B. Zugversuche, Sensoren für intrinsische Spannungen, Kalorimetrie, Ermüdungsversuche und viele weitere eingesetzt werden.

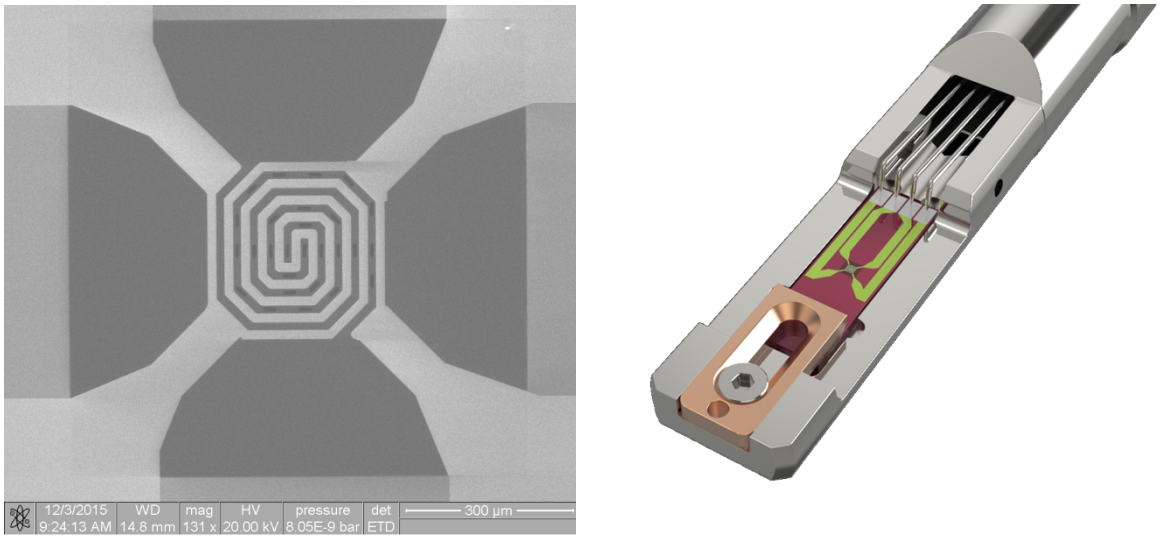

Abb. 2 a) Vergrößerte Ansicht der Membran eine mikrotechnisch hergestellten Heizsystems für in-situ TEM Untersuchungen. Zentral ist die Leiterbahn der Heizwendel zu erkennen. b) Schematische Anordnung des Heizchips in einem TEM Halter.

2. Grundlagen und Hintergrundinformation

2.1 Reinraumtechnik

Aufgrund der geringen Strukturgröße mikrotechnischer Systeme können Kontaminationen durch Partikel aus der Produktionsumgebung schnell zur Zerstörung der hergestellten Strukturen und somit zu einer geringen Ausbeute Y (Yield) führen. Die Ausbeute ist das Verhältnis von intakten gefertigten Bauteilen im Verhältnis zu der Gesamtzahl aller hergestellten Bauteile. Die Ausbeute wird durch die Defektdichte D, die während der Herstellung auftritt, der Fläche A des Bauteils und die Prozessanzahl N beeinflusst. Sie lässt sich über die Formel (4.1) abschätzen.

$$Y = (1 + A * D)^{-N} \qquad (4.1)$$

Weil Partikel die größte Kontaminationsquelle sind und somit die Defektdichte stark beeinflussen, werden Reinräume als Fertigungsumgebung eingesetzt. Ihr Zweck ist die Vermeidung bzw. Minimierung von Partikeln. Reinräume werden entsprechend der vorliegenden Partikeldichte in Klassen eingeteilt, was oftmals noch nach den Vorgaben des „US Federal Standard 209e“ (Abb. 1) geschieht. Bei diesem Standard entspricht die Klasse des Reinraums der Anzahl an Partikeln (Durchmesser 0,5 µm) pro Kubikfuß (1 ft^3 ≈ 0,03 m^3). Partikel mit einem Durchmesser grösser 0,5 µm werden ebenfalls berücksichtigt und dürfen bei steigender Partikelgröße mit linear sinkender Anzahl vorhanden sein.

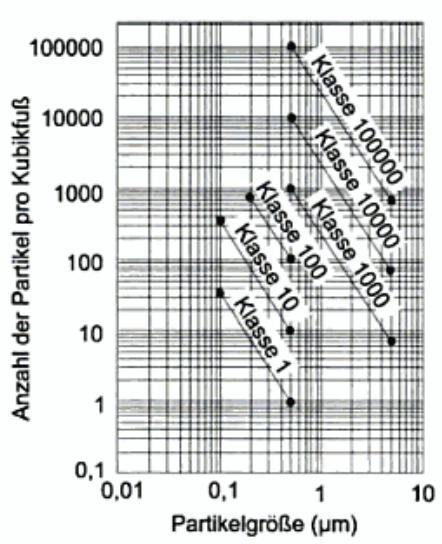

Abb. 1 Einteilung der Reinraumklassen nach Partikelgröße und -anzahl entsprechend dem US Fed. Std. 209E.

Aufgabenbereich	Reinraumklasse
Photolithographie	10-100
Beschichtung	100-1000
Nasschemie	100-1000
Analytik	1000-10000
Plasmabehandlung	1000-10000

Abb. 2 Typische Klassen eines MST-Reinraums, beginnend mit den Bereichen, die die höchsten Anforderungen an die Reinheit stellen.

Diese Norm wird noch häufig verwendet, wurde allerdings 2001 durch die Norm „ISO 14644“ ersetzt. Aufgrund des technologischen Fortschrittes in der Halbleiterindustrie steigen auch die Anforderungen an die Reinraumqualität stetig. Um diese Anforderungen zu berücksichtigen wurden die Reinraumklassen der ISO Norm über die Grenzen des „US Federal Standard“ hinweg erweitert. Darüber hinaus enthält die ISO Norm auch weitere Richtlinien wie z.B. die Reinheit von Prozessmedien, oder das Verhalten von Reinraumpersonal. Dabei sind besonders die Vorgaben zum Personalverhalten von großer Bedeutung, weil der Mensch eine der größten Partikelquellen und gleichzeitig auch am schwierigsten zu kontrollieren ist. Die meisten Partikel werden während der Bewegung emittiert, so dass langsame und gleichmäßige Bewegungsabläufe anzustreben sind.

ISO-Klassifizierungszahl (N)	Höchstwert der zulässigen Konzentrationen (Partikel je Kubikmeter Luft) gleich der oder größer als die betrachteten Größen, welche nachfolgend abgebildet sind[a]					
	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
ISO-Klasse 1	10[b]	d	d	d	d	e
ISO-Klasse 2	100	24[b]	10[b]	d	d	e
ISO-Klasse 3	1 000	237	102	35[b]	d	e
ISO-Klasse 4	10 000	2 370	1 020	352	83[b]	e
ISO-Klasse 5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	e
ISO-Klasse 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
ISO-Klasse 7	c	c	c	352 000	83 200	2 930
ISO-Klasse 8	c	c	c	3 520 000	832 000	29 300
ISO-Klasse 9	c	c	c	35 200 000	8 320 000	293 000

[a] Alle in der Tabelle angeführten Partikelkonzentrationen sind summenhäufigkeitsbezogen. Zum Beispiel schließen die 10 200 Partikel bei 0,3 µm für ISO-Klasse 5 sämtliche Partikel ein, welche gleich der oder größer als diese Partikelgröße sind.

[b] Diese Partikelkonzentrationen ergeben für die Klassifizierung beträchtliche Luftprobenvolumina. Es darf das Verfahren für aufeinanderfolgende Probenahmen angewandt werden, siehe Anhang D.

[c] Aufgrund einer sehr hohen Partikelkonzentration sind Angaben zu Konzentrationsgrenzen in diesem Bereich der Tabelle ungeeignet.

[d] Probenahme- und statistische Begrenzungen für Partikel in niedrigen Konzentrationen eignen sich nicht für eine Klassifizierung.

[e] Begrenzungen gesammelter Probenahmen sowohl für Partikel in niedriger Konzentration als auch für Partikel, welche größer als 1 µm sind, eignen sich aufgrund möglicher Partikelverluste im Probenahmeverfahren nicht zur Klassifizierung.

Abb. 3 Einteilung der Reinraumklassen nach der ISO 14644-1 nach der erlaubten Partikelanzahl und –größe.

Zur Herstellung von Reinraumbedingungen wird Umgebungsluft mittels Klimaanlagen und Luftfiltern aufbereitet. So werden zum einen Partikel entfernt und zum anderen vorbestimmte Temperatur- und Luftfeuchtigkeitswerte eingestellt. Die so aufbereitete Luft wird von der Decke des Reinraums eingeleitet und durch einen gelochten Boden abgesaugt. Durch diesen Luftstrom werden Partikel aus dem Reinraum abgeführt. Bis zu einer Reinraumklasse von ca. 1000 kann die Luft in einer turbulenten Strömung durch den Raum geführt werden. Zum Erreichen höherer Reinraumklassen sollte die Luft laminar geführt werden, weil durch die Vermeidung von Verwirbelungen der Abtransport von Partikeln erleichtert wird. Darüber hinaus muss bei steigender Reinraumklasse der Volumenstrom, der für den Luftaustausch genutzt wird, stetig erhöht werden. Die Erhöhung dient nicht nur der Partikelreduktion, sondern verursacht auch einen Überdruck im Reinraum gegenüber der Umgebung. Dieser ist bei angrenzenden Bereichen mit einer geringeren Reinraumklasse, aufgrund des kleineren Volumenstroms, geringer. Mit dieser Technik wird eine Druckkaskade zwischen Bereichen unterschiedlicher Reinraumklasse erzeugt, welche verhindert, dass Partikel ohne Fremdeinwirkung in Bereiche höherer Reinheit eindringen können.

Reinräume sind in Zonen steigender Reinheit gestaffelt. Wartungsbereiche für die Maschinen, Lagerbereiche und Verbindungsgänge zwischen den einzelnen Arbeitsbereichen haben meist eine Reinraumklasse von ca. 1000 und werden Grauräume genannt. Die Bereiche, in denen die kritischen Fertigungsschritte (z.B. Fotolithographie, Beschichtung, Nasschemie) durchgeführt werden, haben typischerweise eine Reinraumklasse von 100 und weniger. Sie werden aufgrund der höheren Reinheit als Weißraum bezeichnet. Die verschiedenen Bereiche werden durch Schleusen voneinander getrennt, um die Druckkaskade aufrecht zu erhalten und den Transport von Partikeln in angrenzende Bereiche einzuschränken.

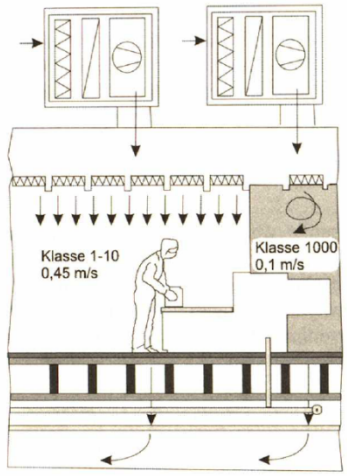

Abb. 4 Schematische Darstellung der Aufteilung eines Reinraums mit einem Weißbereich als Arbeitsumgebung links und einem Grauraum zur Wartung der Maschine rechts.

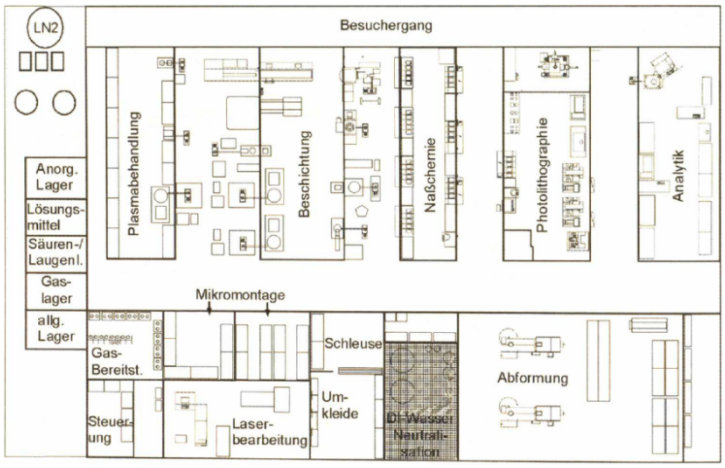

Abb. 5 Aufbau eines typischen Reinraums für die MST am Beispiel des Reinraums des Instituts für Mikrotechnik Mainz.

Reinräume werden in Weiß- und Graubereiche unterteilt, weil die durch den Bau und Betrieb anfallenden Kosten sehr hoch sind und mit steigender Reinraumklasse ansteigen. Deshalb sollte die Größe der verschiedenen Bereiche durch die räumliche Trennung optimal an die eingesetzten Prozesse angepasst werden um die Kosten zu reduzieren.

Weil annähernd alle in der MST eingesetzten Prozesse in einer „sauberen“ Umgebung durchgeführt werden müssen, ist die Reinraumtechnik ist eine der wichtigsten Technologien. Denn nur durch sie wird eine effiziente Produktion mit einer großen Ausbeute ermöglicht. Allerdings ist sie auch eine der

kostenintensivsten Techniken, weil zusätzlich zu den enormen Investitionskosten bei der Beschaffung auch entsprechend hohe Wartungs- und Betriebskosten anfallen.

2.2 Fotolithographie

Die Fotolithographie ist ein Verfahren zur Strukturübertragung und wird in der MST meist zur Übertragung einer Maskenstruktur auf eine dünne Schicht genutzt. Sie ist eine Basistechnologie der MST, weil es mit ihr möglich ist, Strukturen mit hohem Durchsatz, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit zu übertragen, was in geringen Kosten pro Stück resultiert. Für die Übertragung werden lichtempfindliche Lacke (sog.: „Fotolacke“) eingesetzt die in mehreren Prozessschritten strukturiert werden. Diese Schritte sind das Lackaufschleudern (engl.: „Spin Coating“), eine erste Wärmebehandlung (engl: „Softbake“), die Belichtung, das Entwickeln, und eine zweite Wärmebehandlung (engl.: „Hardbake“).

Die eingesetzten Fotolacke sind Mehrkomponentensysteme, die aus schichtbildenden Polymeren oder Epoxidharzen (z.B. Novolack Harz), einem flüssigen Lösungsmittel und einer fotoempfindlichen Komponente (DNQ) bestehen. Aufgrund des Lösungsmittels sind die Lacke im Ausgangszustand flüssig mit einer hohen Viskosität. Für die Lithographie wurden unterschiedliche Lacktypen entwickelt, die sich besonders in ihren fotosensitiven Eigenschaften und der Prozessierung unterscheiden.

Die zwei Typen, die am häufigsten eingesetzt werden, sind Positiv- und Negativlacke. Bei Positivlacken findet in den belichteten Bereichen eine Depolymerisation statt, was eine Schwächung des Lacks und damit eine erhöhte Löslichkeit während der Entwicklung zur Folge hat. Bei Negativlacken hingegen findet in den belichteten Bereichen eine Photopolymerisation statt. Durch die zusätzliche Verkettung des Polymers wird der Lack stabilisiert, wodurch seine Löslichkeit während der Entwicklung verringert wird.

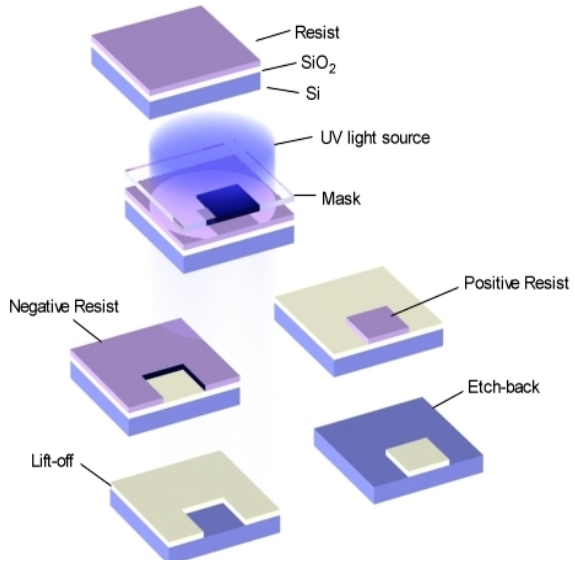

Abb. 6 Schematischer Ablauf der Strukturübertragung in der Fotolithographie mit einem Beispiel für eine Belichtung durch eine Maske und der nach dem Entwickeln resultierenden Struktur für einen Positiv- (links) und Negativlack (rechts).

Neben diesen beiden Typen existieren auch weitere Lacke für Spezialanwendungen, die sich sowohl in ihren fotosensitiven Eigenschaften, als auch in ihrer Prozessierung unterscheiden. Ein Bespiel sind sogenannte Umkehrlacke, die sich bei einer Belichtung erst wie ein Positivlack und nach einer Wärmebehandlung wie ein Negativlack verhalten.

Zusätzlich dazu existieren je nach Anwendungsfall unterschiedliche Lackgeometrien. Wenn der Lack genutzt werden soll, um eine mittels Aufdampfen, oder Kathodenzerstäubung hergestellte Schicht zu strukturieren, werden sogenannte „Lift-Off“ Lacke verwendet. Diese bilden nach der Entwicklung des Lacks einen markanten Unterschnitt aus (Lackkante im Winkel >90° zum Substrat). Bei einer folgenden Abscheidung wird sowohl die Oberseite des Lacks, als auch das Substrat an der entwickelten Stelle des Lacks beschichtet. Die abgeschiedene Schicht auf dem Lack und dem Substrat sind aufgrund des Lackunterschnitts nicht miteinander verbunden. Wenn der Lack nun in einem letzten Schritt entfernt wird, verbleibt nur die Beschichtung auf dem Substrat und die gesamte Beschichtung auf dem Lack wird entfernt, wodurch auf dem Substrat die gewünschte Struktur reproduziert wird.

Wenn eine Strukturierung mittels Ätzen, oder Galvanik erreicht werden soll, werden typischerweise Lacke verwendet, die nach der Entwicklung eine Geometrie mit senkrechten Seitenwänden (Winkel =90°) ausbilden. Durch die senkrechten Wände können die gewünschten Strukturen mit höchster Genauigkeit reproduziert werden.

Wenn die Lackstruktur als formgebender, permanent verbleibender Strukturwerkstoff eingesetzt wird und auch weiter beschichtet wird, werden Lacke verwendet, die nach der Entwicklung eine Geometrie mit leicht geneigten Seitenwänden (Winkel <90°) ausbilden. Dadurch ist sichergestellt, dass bei einer folgenden Abscheidung auch die komplette Seitenwand des Lacks fehlerfrei beschichtet wird.

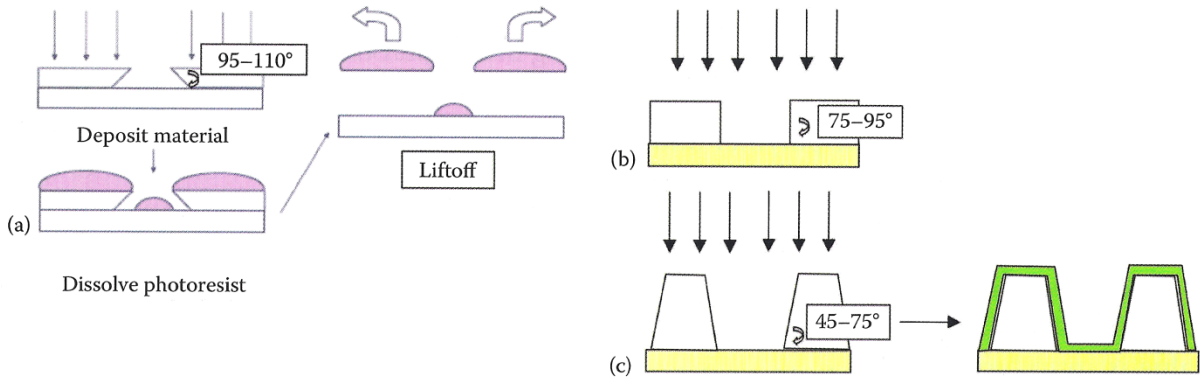

Abb. 7 Schematische Darstellung der wichtigsten Fotolackprofile mit (a) einem Lack Profil mit unterschnitt, (b) vertikalen Seitenwänden für eine möglichst präzise Reproduktion der gewünschten Struktur und (c) einem Seitenwandprofil mit geringem Winkel um eine gleichmäßige Beschichtung der zu ermöglichen.

2.2.1 Spin Coating

Der erste Schritt der Fotolithographie ist das Lackaufschleudern. Dabei wird der flüssige Fotolack mit einer Dosiervorrichtung mittig auf einem Substrat aufgebracht (Abb. 8a). Danach wird er durch Rotation des Substrats gleichmäßig auf der Oberfläche verteilt (Abb. 8b). Während der Rotation verringert sich die Schichtdicke des Lacks durch die Zentrifugalkraft (Abb. 8c). Parallel dazu sinkt der Lösungsmittelanteil im Lack durch Verdampfen, wodurch die Festigkeit des Lacks ansteigt (Abb. 8d). Mit steigender Prozessdauer stellt sich annähernd ein Gleichgewicht zwischen der Zentrifugalkraft und der Festigkeit ein, so dass die Schichtdicke des Lacks nur noch in einem geringen Maß abnimmt. In Abb. 9 ist beispielhaft die Schichtdicke eines Lacks in Abhängigkeit der Drehzahl des Substrats angegeben. Diese Werte gelten typischerweise für eine Prozesszeit von ca. 30 - 60 s können aber je nach Hersteller und Lack deutlich variieren.

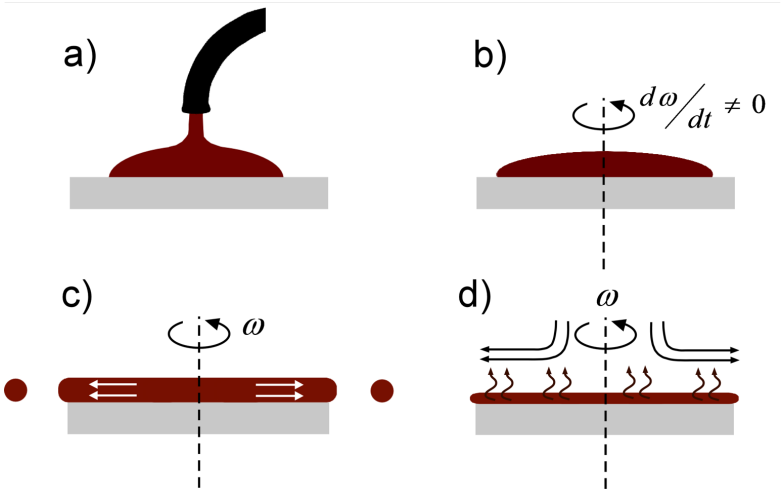

Abb. 8 Prozessabfolge des spin coatings. a) Zuerst wird der Lack mit einer Dosiervorrichtung auf das Substrat aufgebracht und dann b) durch Rotation auf der Oberfläche verteilt. c) Während der Rotation wird überschüssiger Lack vom Substrat abgeschleudert und es stellt sich eine gleichmäßige Schichtdicke ein. d) Während der Rotation verdampft das Lösungsmittel aus dem Lack, wodurch dieser beginnt sich zu verfestigen.

Zusätzlich zur Drehzahl und Prozessdauer sind die Schichtdicke und -homogenität von den Parametern Lackmenge, Beschleunigung, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit abhängig. Über die Drehzahl, Prozessdauer und Lackmenge wird hauptsächlich die Schichtdicke des Lacks wie oben beschrieben eingestellt. Die benötigte Lackmenge ist dabei besonders von der Fläche des Substrates abhängig.

Die Homogenität der Schichtdicke wird primär durch die Beschleunigung, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit beeinflusst. Die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit haben einen großen Einfluss auf die Viskosität des Lacks und werden deshalb durch die Nutzung der Reinraumtechnik konstant gehalten. Durch die korrekte Einstellung der Beschleunigung wird eine homogene Verteilung des Lacks auf dem Substrat gewährleistet. Sie ist von der Fläche des Substrats und der Viskosität des Lacks abhängig. Die Beschleunigung muss in der Regel anwenderspezifisch ermittelt werden, weil sie stark von den Umgebungsbedingungen abhängig ist.

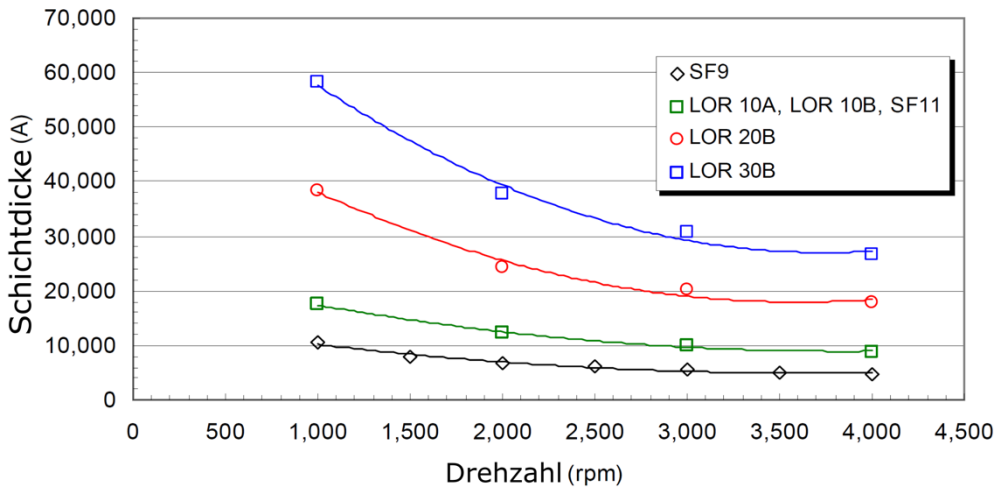

Abb. 9 Typische Spinkurve von Fotolacken am Beispiel verschiedener Lacke der „LOR“ Serie der Firma „MicroChem“ für eine Prozessdauer von ca. 50 s.

Nach dem Aufschleudern des Lacks wird die erste Wärmebehandlung des Lacks durchgeführt. Der Zweck dieser Wärmebehandlung ist die weitere Reduzierung des Lösungsmittelanteils im Lack (Abb. 10(a)). Zum wird dadurch die Haftung zum Substrat und die Stabilität des Lacks erhöht. Zum anderen wird durch Aushärtung die Wahrscheinlichkeit des „Verklebens“ mit der Maske während der Belichtung verringert. Allerdings wird dadurch auch eine generelle Stabilisierung des Lacks gegenüber Chemikalien erreicht, was als Konsequenz auch eine Verringerung der Abtragsrate während der Entwicklung nach sich zieht (Abb. 10(b)). Deshalb sollte für die Prozessdauer der Wärmebehandlung ein Kompromiss zwischen Stabilität und Entwicklungsrate angestrebt werden. Die Wärmebehandlung dauert typischerweise ca. 30 min. bei der Nutzung eines Konvektionsofens, oder 1 - 3 min. unter Benutzung einer Heizplatte. Die Temperatur ist stark von dem Typ des Lacks abhängig und liegt typischerweise in einem Bereich von ca. 100 - 200 °C. Sollte der Lack in einem späteren Prozessschritt als Maskierung für einen Ätzprozess eingesetzt werden, kann das Ausheizen das Lacks allerdings auch durchaus erwünscht sein, um die Widerstandsfähigkeit gegenüber dem Ätzmittel zu erhöhen.

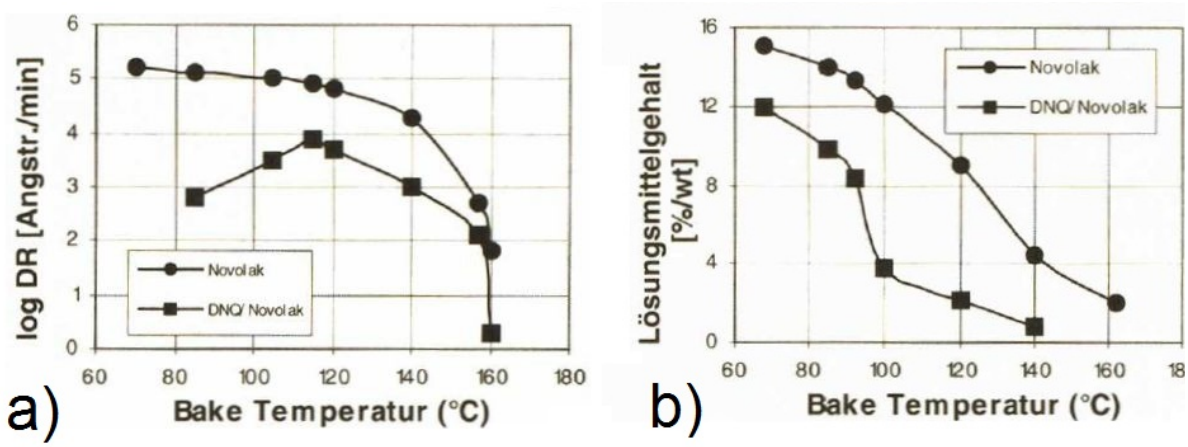

Abb. 10 Entwicklungsrate (a) und Lösungsmittelgehalt (b) eines Fotolacks in Abhängigkeit der Temperatur während der Wärmebehandlung. Mit sinkendem Lösungsmittelanteil wird der Lack stabilisiert, wodurch die Entwicklungsrate abnimmt.

2.2.2 Belichtungstechniken

Der zweite Schritt ist die Belichtung des Fotolacks. Wie bereits erwähnt wird durch die Belichtung die Löslichkeit des Lacks in der Entwicklungsflüssigkeit beeinflusst. Im Laufe der Zeit wurden viele Belichtungsverfahren entwickelt, die sich primär in den Merkmalen der erreichbaren Auflösung/Strukturgrösse und dem maximalen Durchsatz unterscheiden.

Die in der Mikrotechnik am häufigsten eingesetzte Belichtungstechnik ist die Breitbandbelichtung mittels UV licht. Dabei wird der Lack in einem „Mask Aligner“ (Abb. 11) durch eine Maske hindurch mit UV-Licht ($\lambda \approx 365 – 435$ nm) bestrahlt. Mit dieser Methode kann ein komplettes Substrat gleichzeitig belichtet werden, weswegen man von einem parallelen Belichtungsverfahren spricht.

In diesem Prozess können zwei unterschiedliche Maskentypen eingesetzt werden. Der erste Typ sind mit strukturiertem Cr beschichtete Glasscheiben. Das Cr fungiert dabei als Maskierung und das Glas als transparenter Träger für die Cr Schicht. Diese Masken werden mit einer minimalen Strukturgröße von ca. 1 µm gefertigt, was der maximalen Auflösung dieser Technik entspricht, welche durch die Wellenlänge des UV-Lichtes beschränkt ist.

Beim zweiten Maskentyp handelt es sich um Folienmasken. Diese bestehen aus einem transparenten Polymer, das mit einer lichtundurchlässigen Schicht bedruckt wird. Die Strukturen, die auf Folienmasken hergestellt werden können, sind durch die eingesetzte Drucktechnik allerdings auf eine minimale Auflösung von ca. 20 µm beschränkt. Der Vorteil dieser Technik ist, dass sie wesentlich günstiger ist als

die Fertigung einer Glasmaske. Allerdings ist die Widerstandsfähigkeit der Materialien geringer. Aufgrund dieser Eigenschaften sind Folienmasken besonders für die Fertigung von Kleinserien mit geringen Anforderungen an die Strukturgenauigkeit interessant.

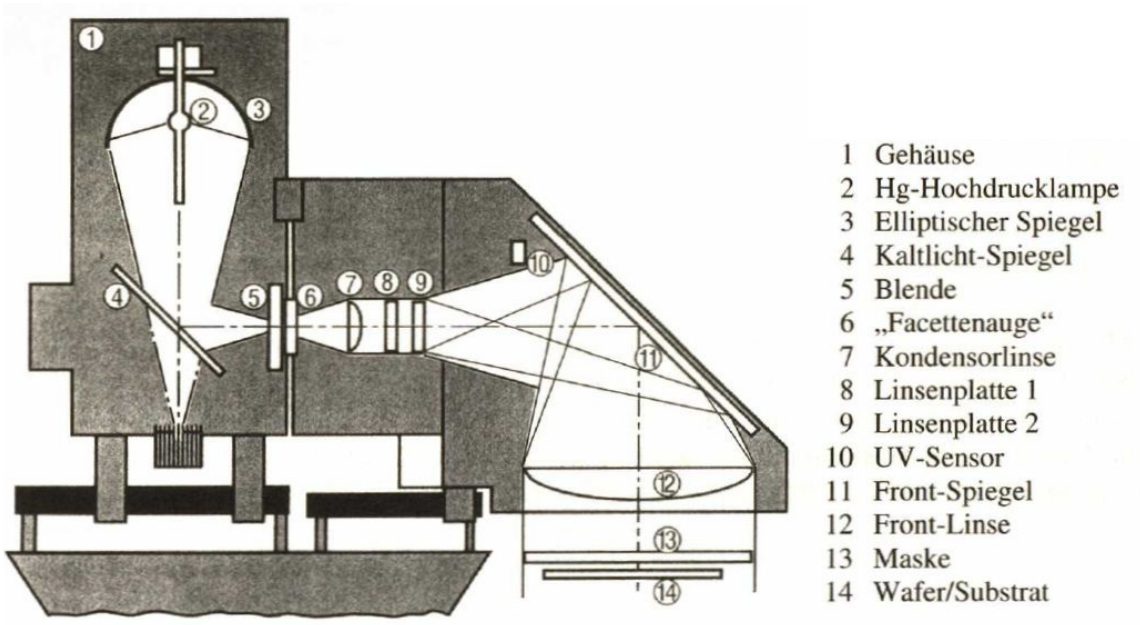

Abb. 11 Schematischer Aufbau eines Mask Aligners zur einseitigen und parallelen Belichtung eines Substrates mit den typischerweise enthaltenen Bauelementen 1 - 14.

Alternativ werden auch serielle Belichtungsverfahren eingesetzt. Bei diesen Verfahren werden z.B. fokussierte Laser- oder Elektronenstrahlen zur Belichtung des Lacks benutzt. Der Strahl wird während des Prozesses über die zu belichtenden Bereiche des Wafers gerastert (Abb. 12a)). Es wird also keine vorgefertigte Maske benötigt, sondern die zu belichtende Struktur wird softwareseitig definiert. Dadurch sind diese schreibenden Verfahren sehr flexibel, falls ein Design häufig angepasst werden muss. Diese Strukturierungsmethode ist sehr zeitintensiv, weshalb sie meist für das Strukturieren von Glasmasken, welche dann für die parallele Belichtung genutzt werden, oder die Prototypenfertigung eingesetzt wird. Der Vorteil ist allerdings der, dass aufgrund der eingesetzten Wellenlängen, Strukturen mit Abmessungen <100 nm gefertigt werden können.

Eine weitere Form der seriellen Belichtung ist die sogenannte Projektionsbelichtung (Abb. 12b)). Hierbei wird wie bei einem Mask Aligner auch eine Maske durchstrahlt und zur Abbildung genutzt. Diese Maske wird hier allerdings nicht im Verhältnis 1:1 abgebildet, sondern durch eine komplexe Optik verkleinert. Dadurch kann eine höhere Auflösung als beim traditionellen Mask Aligner erreicht werden. Aufgrund der verkleinerten Abbildung können allerdings nicht alle Strukturen auf einem Substrat gleichzeitig belichtet werden, sondern dies geschieht in mehreren, sich wiederholenden Schritten (Step and Repeat), bis das komplette Substrat belichtet ist. Dieses Verfahren wird heutzutage primär in der Halbleiterfertigung von z.B. Computerprozessoren eingesetzt, weil durch den Einsatz besonderer Lichtquellen und Immersionsbelichtung (Belichten in einer Flüssigkeit anstelle von Luft als Umgebungsmedium) minimale Auflösungen bei gleichzeitig hohem Durchsatz erreicht wird.

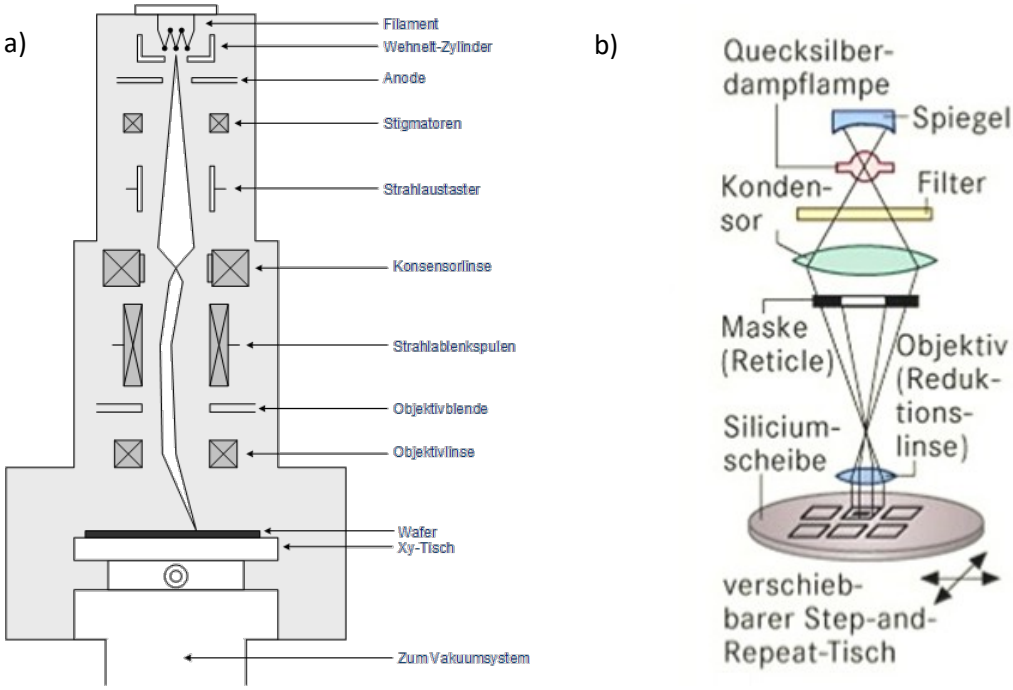

Abb.12 a) Schematischer Aufbau eines Systems zur Elektronenstrahllithographie. Der Aufbau ist vergleichbar mit dem eines Transmissionselektronenmikroskops, wobei der Stahl nicht zur Bilderzeugung, sondern zur Belichtung des Lacks eingesetzt wird. b) Schematischer Aufbau eines einfachen „"Wafer-steppers". Wie bei einem Mask Aligner wird hier eine Maske zur Belichtung eingesetzt, allerdings erfolgt die Belichtung durch eine Optik in einem verkleinerten Bereich.

2.2.3 Entwicklung

Nach der Belichtung folgt die Entwicklung des Fotolacks. Dabei wird durch einen nasschemischen Prozess der lösliche Teil des Lacks, der durch die Belichtung strukturiert wurde, entfernt. Als Entwickler werden meist alkalische Lösungen auf Kaliumhydroxid Basis (KOH), oder gepufferte Tetramethylammoniumhyroxid Lösungen ($C_4H_{13}NO$; kurz: TMAH) eingesetzt. Typische Entwicklungszeiten betragen für eine Lackdicke von 1 µm ca. 1 min. Typischerweise wird die Entwicklungszeit länger gewählt als nötig, was zu einer leichten Überentwicklung der Struktur führt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass der Lack rückstandslos entfernt wird. Diese Überentwicklung muss bei der Auslegung der Strukturen berücksichtigt werden.

Nach der Entwicklung wird die zweite Wärmebehandlung durchgeführt. Dieser Schritt dient der weiteren Lösungsmittelreduktion im Lack. Das Ziel ist es, sowohl die chemische als auch physikalische Widerstandsfähigkeit der Lackstruktur zu erhöhen. Dabei ist die Prozessdauer abhängig von den im Anschluss durchgeführten Prozessen. Sie kann von einer Minute als Vorbereitung für eine Beschichtung bis hin zu 30 min. als Stabilisierung gegen den Abtrag eines subtraktiven Verfahrens betragen. Bei dieser Wärmebehandlung liegt die Temperatur ca. 10 – 20 °C höher als bei der ersten Wärmebehandlung.

Die mit der Fotolithographie hergestellten Lackstrukturen werden in vielen Prozessen als Maskierung zur Strukturübertragung genutzt. Dazu gehören additive Verfahren wie z.B. das Kathodenzerstäuben, oder auch subtraktive Verfahren wie z.B. Flusssäureätzen. Bei diesen beiden Verfahrensgruppen findet in den geöffneten Bereichen des Lacks entweder eine Materialabscheidung oder ein Abtrag statt. Die Lithographie kann aber auch für Abformtechniken, oder bei ausreichender Schichtdicke, direkt als Strukturwerkstoff genutzt werden. Ein Beispiel für die Nutzung als Strukturwerkstoff ist der Lack „SU-8" der Firma „MicroChem Corp.", der mit einer Schichtdicke von bis zu 650 µm in der MST, z.B. als Kanal in der Mikrofluidik, eingesetzt wird.