

Elektronenstrahlithographie

VERSUCH ZUM FORTGESCHRITTENENPRAKTIKUM

AG Prof. Dr. U. Hartmann

Institut für Experimentalphysik, Universität des Saarlandes

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Stand der Lithographie in der Strukturierungstechnik	3
2.1.1	Direkte Strukturierungstechnik	3
2.1.2	Indirekte Strukturierungstechnik	4
2.2	Lithographiesystem	5
2.2.1	Grundlagen der Elektronenmikroskopie	5
2.2.2	Elektronenkanone	6
2.2.3	Elektronenoptisches System	7
2.2.4	Detektor- und Bildverarbeitungssystem	8
2.2.5	Steuerung der Ablenkspulen	9
2.2.6	Ausblendeinrichtung für den Elektronenstrahl	9
2.2.7	Rechnergestütztes CAD-System	11
3	Elektronenstrahlempfindliche Resiste	12
3.1	Fotochemische Wechselwirkungsprozesse	12
3.1.1	Positiv- und Negativ-Resiste	12
3.1.2	Streumechanismen von Elektronen	14
3.1.3	Proximity-Funktion	15
3.2	Intra-Proximity- und Inter-Proximity-Effekte	16
3.3	Polymethylmethacrylate	18
4	Versuchsdurchführung	19
4.1	Probenherstellung	19
4.2	Strukturierung der Proben mit dem Elektronenmikroskop	21
4.3	Bestimmung der Proximity-Parameter	25
5	Fragen	26

1 Einleitung

Elektronenstrahlithographie (ESL)

Elektronenstrahlithographie ist eine spezielle Technik, um extrem kleine Strukturen (im nm-Bereich) zu erzeugen. Dabei scannt ein fokussierter Elektronenstrahl die Oberfläche des zu strukturierenden Substrats ab, wobei das Substrat mit einem Resist (hier PMMA) bedeckt ist, der empfindlich gegenüber den Elektronen ist. Der meist aus einem organischen Material bestehende Photolack wird bei dieser Belichtung chemisch verändert, und so können in einem nachfolgenden Entwicklungsprozess entweder die belichteten Strukturen (Positivlack) oder die unbelichteten Strukturen (Negativlack) entfernt werden.

Bei dem hier verwendeten Photolack handelt es sich um 2%-iges PMMA mit einem Molekulargewicht von 950 k. PMMA ist ein aus langkettigen Monomeren bestehender Positivlack, dessen Bindungen infolge der Elektronenstrahlbelichtung aufgebrochen werden. In einem nachfolgenden Entwicklungsprozess können die belichteten Stellen entfernt werden.

Der Teil eines ESL-Systems, in dem der Elektronenstrahl erzeugt und fokussiert wird, heißt Säule. Eine ESL-Säule besteht aus einer Elektronenquelle, zwei oder mehr Linsen, einer Vorrichtung zur Strahlableitung, verschiedene Vorrichtungen um den Strahl zu fokussieren und Abbildungsfehler zu korrigieren und einem Elektronendetektor. Man kann ESL in einem REM betreiben, wenn ein Computer mit der entsprechenden Software angeschlossen ist. Die Strukturen, die lithographiert werden sollen, kann man einfach am Computer entwerfen. Anschließend werden diese punktwise belichtet. Dies hat den Vorteil, dass man auf Masken verzichten kann, anders als in der optischen Lithographie. Ein entscheidender Nachteil des Verfahrens liegt jedoch in seiner seriellen Natur, d.h. es ist viel langsamer als parallele Verfahren. Dies ist einer der Gründe dafür, dass ESL nur zur Herstellung von Masken für andere Lithographieverfahren oder in der Forschung und nicht z.B. für die Massenherstellung von Chips genutzt wird. Die wichtigsten Eigenschaften der ESL sind:

1. die hohe Auflösung (einige nm),
2. die flexible Technik, mit der eine grosse Anzahl von Materialien lithographiert werden kann und mit der Strukturen einfach am Computer entworfen werden können,
3. die serielle Technik, die das Verfahren langsamer macht als parallele Verfahren, so daß sie hauptsächlich in der Grundlagenforschung und zur Maskenproduktion für andere Lithographieverfahren eingesetzt wird,
4. der Preis, ESL-Maschinen kosten einige Millionen.

Wechselwirkungen mit dem Substrat, Proximityeffekt

Bei der Belichtung des Photolackes kommt es zu Streuprozesse der Elektronen in dem Photolack und dem darunterliegenden Substrat. Diese Streuprozesse resultieren in einer Strahlaufweitung. Beim Eintreten der Elektronen in den Lack werden diese an den Molekülen des Lacks gestreut und aufgrund der daraus resultierenden Vorwärtsstreuung (forward scattering) kommt es zu einer ersten Strahlaufweitung. Beim Eindringen der Elektronen in das Substrat kommt es zu einer weiteren Streuung der Elektronen an den Gitteratomen des Substrats. Dabei können Elektronen zurückgestreut werden und den Lack an ungewünschten Stellen belichten. Diese Rückstreuung (back scattering) ist für den Proximity-Effekt verantwortlich. Dieser kann als Intra- und Inter-Proximity-Effekt charakterisiert werden. Beim Intra-Proximity-Effekt wird nach der Belichtung unterschiedlich breiter Strukturen eine Unterbelichtung der kleineren Strukturen festgestellt, da die Streuanteile in diesen wesentlich geringer sind. Der Inter-Proximity-Effekt tritt bei der Belichtung benachbarter Strukturen auf. So kann es bei Unterschreitung eines Mindestabstandes zur gegenseitigen Belichtung kommen. Es zeigte sich, dass sich die Belichtungsintensitätsverteilung näherungsweise als Summe zweier Gauß'scher Intensitätsverteilungen schreiben läßt:

$$P(r) = \frac{1}{\pi(1 + \eta)} \left[\frac{1}{\alpha^2} \exp\left(\frac{-r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{\eta}{\beta^2} \exp\left(\frac{-r^2}{\beta^2}\right) \right] \quad (1.1)$$

mit dem bei einer Punktbelichtung entstehenden Kreis mit dem Radius r . Die Parameter α, β, η sind von der Energie der Elektronen, dem Resistmaterial und dessen Dicke, und dem Substratmaterial abhängig und können experimentell bestimmt werden. Der erste Summand in Glg. (1.1) beschreibt den Beitrag des einfallenden Elektronenstrahls, der zweite Summand den Beitrag der rückgestreuten Elektronen. Eine vor der Belichtung der gewünschten Struktur durchgeführte Monte-Carlo-Simulation mit den Parametern α, β, η variiert die Belichtungs Dosen so, daß unter Berücksichtigung des Proximityeffektes jede belichtete Stelle dieselbe Dosis erhält.

Begrenzung der Auflösung

Die Auflösung der ESL ist im Wesentlichen nur durch folgende Parameter begrenzt:

1. Strahldurchmesser (0,5 nm - 200 nm)
2. Resisteigenschaften (PMMA:10 nm)
3. Entwicklungsverfahren
4. Substrateigenschaften

2 Grundlagen

2.1 Stand der Lithographie in der Strukturierungstechnik

Am Anfang der Entwicklung eines jeden IC (*integrated circuits*) steht die Schaltungsidee, die mit Hilfe eines CAD-Systems (computer aided design) in einen Datensatz umgesetzt wird. Dieser enthält die erforderlichen elektronischen Schaltungselemente in Form geometrischer Strukturen. Bereits bei diesem Entwicklungsschritt sind bestimmte Entwurfsregeln im Hinblick auf die weitere Herstellungsmethode einzuhalten. Bei der Herstellung kommen zwei verschiedene Verfahren zur Anwendung: die indirekte und die direkte Strukturierungstechnik.

2.1.1 Direkte Strukturierungstechnik

Bei der direkten Strukturierungstechnik (direct writing) wird die Information des erzeugten Datensatzes direkt über ein einziges Übertragungsmedium auf das Substrat (den Wafer) kopiert. Im Fall der Elektronenstrahlolithographie bilden Elektronen das entsprechende Übertragungsmedium. Durch Anlegen eines elektrischen Feldes werden der Auftreffpunkt des Elektronenstrahls gesteuert, und durch einen Energieübertrag die chemischen Eigenschaften eines empfindlichen Fotolacks verändert. Der Auftreffpunkt des Strahls wird gemäß der Information des Datensatzes der zu erzeugenden Struktur synchronisiert (Rasterprinzip), wodurch eine direkte Abbildung von lateral ausgedehnten, geometrischen Strukturen ermöglicht wird. Ein großer Vorteil dieser Strukturierungstechnik ist das hohe, theoretisch erreichbare Auflösungsvermögen cd (critical dimension). Die Auflösung cd ist eine Funktion der Wellenlänge λ des Übertragungsmediums und der zugehörigen Numerischen Apertur NA :

$$cd = k_1 \cdot \frac{\lambda}{NA}, \text{ mit } NA = n \sin \theta = D(2f)^{-1} \quad (2.1)$$

NA beschreibt dabei den Öffnungswinkel der Quellenlinse mit dem Durchmesser D in Abhängigkeit des Brechungsindex n . Die Größe k_1 ist ein dimensionsloser Prozeßparameter, der maßgeblich von der Beschaffenheit des Fotolackes abhängt ($0.3 < k_1 < 1.1$). Mit f wird die Fokus-Länge der Quellenlinse erfaßt. Ein signifikanter Nachteil der direkten Strukturierungstechnik besteht darin, daß alle zu erzeugenden Strukturen seriell abgearbeitet werden müssen. Dadurch wird die Zeit für den Lithographieschritt vergleichsweise lang.

2.1.2 Indirekte Strukturierungstechnik

Bei der indirekten Strukturierung wird die Information des Datensatzes zunächst auf eine Schablone (Maske) übertragen, die dann zum Kopieren des Datensatzes auf das Substrat (Wafer) benutzt wird. Ein Nachteil dieser Technik besteht darin, daß eventuelle Fehler in der Maske auch auf das Substrat übertragen werden. Der entscheidende Vorteil der indirekten gegenüber der direkten Strukturierungstechnik liegt in der parallelen Verarbeitungsweise. Da die ursprüngliche Dateninformation typischerweise mehrfach auf der Maske enthalten ist, werden in einem einzigen Lithographieschritt vielfache Kopien gleichzeitig auf dem Substrat erzeugt. Die parallele Übertragung erfolgt standardmäßig mit Hilfe von Licht im Wellenlängenbereich um 400 nm. Um das wellenlängenbegrenzte Auflösungsvermögen (vgl. Gl. (2.1)) dabei zu erhöhen, wird auch nicht sichtbares Licht im Ultraviolettbereich verwendet ($\lambda < 250$ nm). In diesem Fall spricht man auch von der DUV-Belichtung (Deep Ultra Violett). Die zur Zeit kleinste Wellenlänge liegt im ultravioletten Bereich bei etwa 130 nm. Die mit einer solchen Quelle erzielten Spitzenwerte in bezug auf die Auflösung werden im Bereich von etwa 80 nm angegeben.

Zu deutlich geringeren Wellenlängen ohne Verzicht auf die Maskentechnik gelangt man mit Hilfe der Röntgenstrahlolithographie. Die Erzeugung paralleler Röntgenstrahlen, der sogenannten Synchrotronstrahlung, erfolgt in Teilchenlinearbeschleunigern. Die Bereitstellung dieser hochenergetischen Strahlenquelle ist sehr aufwendig. Zusätzlich besteht das Problem, geeignete Fotolacke bereitzustellen, die diese Energien absorbieren können, ohne dabei zerstört zu werden. Darüber hinaus ist ein weiteres wichtiges Kriterium die thermische Beständigkeit des Fotomaskenmaterials selbst. Eine technisch einfachere Möglichkeit, Quellen mit kleinsten Wellenlängen bereitzustellen, besteht im Einsatz von Elektronen. Glühkathoden sind heute von hoher Qualität reproduzierbar herzustellen, mit deren Hilfe freie Elektronen im Vakuum erzeugt werden können. Darüber hinaus ist die Palette elektronenstrahlempfindlicher Fotolacke reichhaltig, ohne bereits an dieser Stelle detaillierter darauf einzugehen. Forschungsrelevant sind auch der Einsatz von Ionen und Atomen. Auch wird die Rasterkraftlithographie derzeit verstärkt diskutiert. Der entscheidende Nachteil der drei zuletzt genannten Quellen ist aber der notwendige Übergang von der o.g. Maskentechnik zur seriell arbeitenden Direktschreibtechnik. Einen Überblick über die derzeit eingesetzten, direkten und indirekten Lithographieverfahren gibt Tabelle 2.1:

Indirekte Lithographieverfahren	Direkte Lithographieverfahren
lichtoptisch ($\lambda = 465$ nm, i-line)	Elektronenstrahlolithographie
Ultraviolett (UV, DUV)	Ionenstrahlolithographie
Röntgenstrahlolithographie	Atomstrahlolithographie
hochauflösende Drucktechnik	

Tabelle 2.1: Direkte und indirekte Lithographieverfahren

Eine Sonderstellung im Bereich der indirekten Strukturierungstechnik (vgl. Tab. 2.1) nimmt das Verfahren der hochauflösenden Drucktechnik (imprint lithography) ein, da sie als einziges Verfahren nicht auf der strahlenden Lithographie basiert. Hierbei wird zunächst eine

meist elektronenstrahlgeschriebene Muttermaske erzeugt, die anschließend als mechanische Druckmaske zur Strukturierung im Mikro- und Nanometerbereich benutzt wird. Damit sind die Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften des zu verwendenden Maskenmaterials extrem hoch, wenn man allein an die zu unterdrückende Lackadhäsivität denkt. Mit Hilfe von hochentwickelten, speziellen, flexiblen Polymeren sind aber auf diese Art bereits Strukturen mit lateralen Abmessungen von 10 nm und darunter erzeugt worden.

Stellt man die Eigenschaften der verschiedenen direkten Lithographieverfahren einander gegenüber, so empfiehlt sich die Elektronenstrahlolithographie als die derzeit weitest entwickelte Technik. Darüber hinaus besitzen Elektronen im Vergleich zu den anderen Quellen mit Abstand die kleinste Wellenlänge. Nach Gl. (2.1) ist daher bei der Elektronenstrahlolithographie derzeit das größte Auflösungsvermögen in Abhängigkeit des Fotolackes zu erzielen.

2.2 Lithographiesystem

2.2.1 Grundlagen der Elektronenmikroskopie

Generell unterscheidet man zwischen dem Transmissionselektronenmikroskop (TEM) und dem Rasterelektronenmikroskop (REM).

Transmissionselektronenmikroskop

Transmissionselektronenmikroskope ähneln in ihrem Aufbau den Lichtmikroskopen. Die Elektronen werden in einer Glühkathode erzeugt und anschließend durch ein elektrisches Feld von 10 kV-125 kV zu einer Anode hin beschleunigt. Zur Abbildung verwendet man Magnetspulen, die Elektronenstrahlen ähnlich bündeln, wie dies Glaslinsen mit Licht tun. Die Elektronen durchdringen in ihrem Verlauf das ultradünne Präparat (70 nm - 100 nm) von dem durch die erste Linse im Abbildungsstrahlengang, dem Objektiv, ein vergrößertes Zwischenbild entsteht. Dieses Zwischenbild wird nun mit der zweiten Linse, dem Okular, weiter vergrößert und auf einen Leuchtschirm projiziert. Damit die Elektronen nicht von Gasmolekülen gestreut oder absorbiert werden können, befindet sich der ganze Aufbau im Hochvakuum. Mit dem TEM können Strukturen bis in den sub-nm Bereich sichtbar gemacht werden. Ein Nachteil dieser Methode ist jedoch, dass man nur sehr dünne Präparate (70nm-100nm) untersuchen kann.

Rasterelektronenmikroskop

Das Rasterelektronenmikroskop funktioniert ähnlich wie ein TEM. Der Unterschied besteht darin, dass die Probe nicht durchstrahlt wird, sondern die Oberfläche von dem gebündelten Elektronenstrahl abgerastert wird. Der Elektronenstrahl (Strahldurchmesser: 0.5 nm bis 200 nm) löst in dem Substrat Sekundärprozesse aus. Die ausgelösten Sekundärelektronen werden detektiert. Das Signal wird durch einen Signalverstärker verstärkt und steuert die Intensität des Elektronenstrahls des Monitors, der mit der Rasterbewegung

des primären Elektronenstrahls im Mikroskop synchronisiert ist. Die Beschleunigungsspannung in einem Rasterelektronenmikroskop liegt zwischen 1-30 kV. Die Auflösung liegt bei einigen nm.

Für die im Rahmen dieser Experimente zu leisteten Lithographieschritte steht in der Arbeitsgruppe ein Rasterelektronenmikroskop (REM) des Typs Hitachi 4500 mit externer Steuerung (Elphy System, Fa. Raith, Dortmund) zur Verfügung. Ein Rasterelektronenmikroskop basiert prinzipiell auf den folgenden drei Unterfunktionseinheiten:

- Elektronenkanone,
- elektronenoptisches System,
- Detektor- und Bildverarbeitungssystem.

Für den Einsatz als Lithographiegerät bedarf es folgender Erweiterungen:

- Steuerung der Ablenkspulen für die Belichtung,
- Ausblendeinrichtung für den Elektronenstrahl,
- Rechnergestütztes CAD-System,
- Steuerung für das Verfahren des Probestisches.

Im folgenden wird die Funktion der o.g. Komponenten innerhalb des eingesetzten Lithographiesystems kurz vorgestellt.

2.2.2 Elektronenkanone

Die Elektronenkanone besteht aus der Kathode, dem Wehnelt-Zylinder und der Anode, wie in Abb. 2.1 dargestellt.

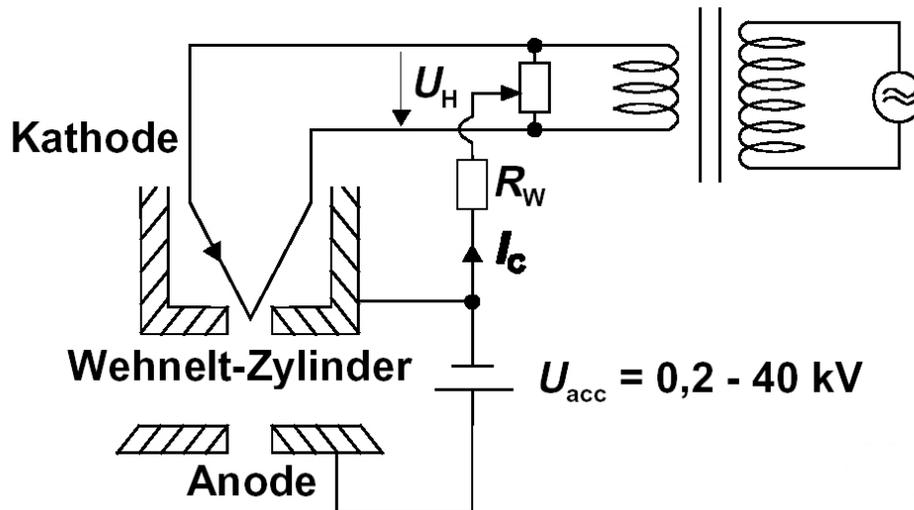


Abbildung 2.1: Prinzipieller Aufbau einer Elektronenkanone.

Bei einem typischen Druck von circa $1 - 5 \cdot 10^{-6}$ mbar erfolgt der Elektronenaustritt aus der Kathode in das Vakuum nach dem Prinzip der Kathodenemission. Man unterscheidet zwischen thermischer, Schottky- (feldunterstützte, thermische Emission) und der reinen Feldemission. Bei Glühkathoden wird im Gegensatz zu Spitzenkathoden das elektrische Feld am Ort der Kathode gering gehalten, damit sich eine Raumladung ausbilden kann. Dieser Zustand wird durch den Wehnelt-Zylinder als Hilfselektrode zwischen Kathode und Anode aufrecht erhalten. Der Wehnelt-Zylinder befindet sich gegenüber der Kathode auf einem negativen Potential von circa -100 V, so das unmittelbar hinter dem Wehnelt-Zylinder der erste Kreuzungspunkt (cross over) der Elektronen mit einem typischen Durchmesser von 20 - 50 μm (1 - 10 μm bei Feldemissionskathoden) auftritt. Die Stromdichte J im Bereich des cross over ist örtlich nicht konstant, sondern zeigt ein Gauß'sches Profil gemäß Gl. (2.2):

$$J(r) = J_0 \exp \left[- \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

Hierbei bezeichnet r den Radius, J_0 die maximale Stromdichte und r_0 die Standardabweichung. Das Gauß'sche Profil resultiert aus dem Temperaturgradienten der Kathode. Durch die Variation im Temperaturprofil werden in Abhängigkeit der Heizleistung P_H Elektronen unterschiedlicher Energie erzeugt. Diese Energieschwankung bewirkt eine unerwünschte Aufweitung des zu fokussierenden Elektronenstrahls. Bei Überschreitung der optimalen Heizleistung $P_{H,opt}$ wird dieser Effekt weiter verstärkt. Darüber hinaus wird aufgrund dieser Überhitzung die Lebensdauer der Kathode deutlich herabgesetzt. Wird dagegen die optimale Heizleistung unterschritten, macht sich ebenfalls die örtlich verteilte Energieverteilungsfunktion der Elektronen durch Ausbildung von Nebenmaxima deutlich bemerkbar. Auch dieser Betriebszustand der Kathode resultiert in einer Verbreiterung des Elektronenstrahldurchmessers und damit in einem Verlust des Auflösungsvermögens des REM. Durch Anlegen einer Saugspannung zwischen Anode und Hilfselektrode werden die Elektronen aus dem Wehnelt-Zylinder heraus beschleunigt (vgl. Abb. 2.1). Die Beschleunigungsspannung U_{acc} (accelerating voltage) dient der weiteren Fokussierung des Elektronenstrahls.

2.2.3 Elektronenoptisches System

Nach dem Verlassen der Anode tritt der Elektronenstrahl in das elektronenoptische System ein, das den Hauptteil der Elektronensäule des REM bildet. Für die gezielte Ablenkung und Fokussierung des Elektronenstrahls werden elektronenoptische Linsen benötigt, die in Abhängigkeit des gewünschten Ablenkwinkels mit Hilfe von elektrostatischen oder elektromagnetischen Feldern realisiert werden können. Magnetische Elektronenlinsen sind hysteresebehaftet, so daß sie von Zeit zu Zeit entmagnetisiert werden müssen. Im REM sind alle Linsen jeweils paarweise angeordnet, um eine zweidimensionale Ablenkung zu ermöglichen. In Abb. 2.2 ist eine Prinzipskizze des Querschnitts durch die gesamte Elektronensäule des verwendeten REM dargestellt. Zusätzlich ist in Abb. 2.2 die prinzipielle Anordnung der Module zur Erweiterung zum Lithographiesystem angegeben.

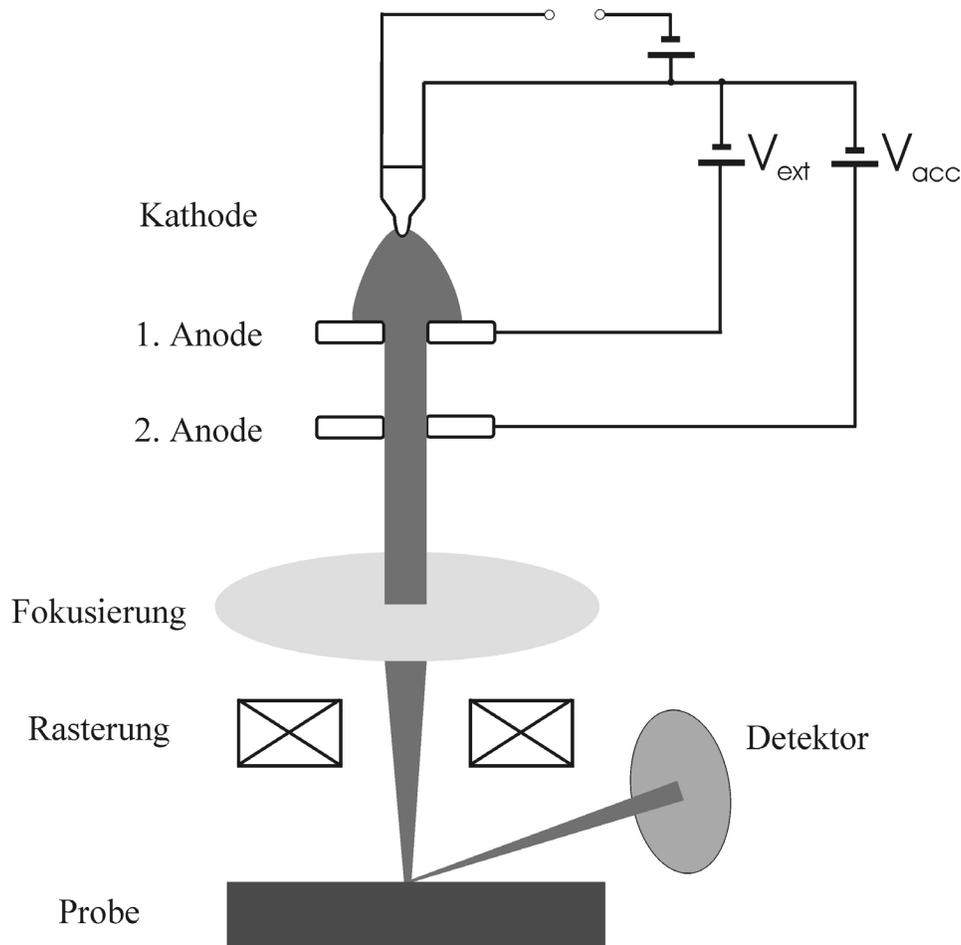


Abbildung 2.2: Querschnitt durch die Elektronensäule des REM Hitachi 4500.

Ein erstes Spulenpaar hinter der Anode (nicht eingezeichnet) dient zur Zentrierung des Elektronenstrahles innerhalb der Säule. Die weitere Verkleinerung des Elektronenstrahldurchmessers erfolgt nach Durchlauf durch die Kondensorenlinse, mit deren Hilfe auch die Vergrößerung des REM eingestellt wird. Eine nachfolgende mechanische Objektivblende ($50 \mu\text{m} < NA_{\text{mech}} < 170 \mu\text{m}$) dient der groben Ausblendung von Randstrahlen. Das darunter liegende Ablenkspulenpaar wird durch einen externen Ablenkgenerator gesteuert und zur rasterförmigen Abtastung der Probenoberfläche genutzt. Die letzte Linse, die Objektivlinse (probe forming lense), im Arbeitsabstand d_{work} vor der Probe reduziert noch einmal den Elektronenstrahldurchmesser, gefolgt von den Fokus- und Stigmatorspulen, wobei die Stigmatorspule zum Ausgleich von Verzerrungen benötigt wird.

2.2.4 Detektor- und Bildverarbeitungssystem

Die Erzeugung des aus einer Vielzahl von Rasterpunkten zusammengesetzten Bildes basiert auf der Ausnutzung von Sekundärelektronen (SE), die infolge des Elektronenbeschusses durch inelastische Stöße in der Probenoberfläche generiert werden. Die SE erhalten dabei eine so hohe Energie, daß sie die materialspezifische Austrittsarbeit überwinden und den

Festkörper verlassen können. Mittels eines positiv geladenen Kollektorgitters, das als SE-Detektor seitlich oberhalb der Probe angeordnet ist, lassen sich die SE einfach abgreifen. Dieses SE-Signal wird einem Videoverstärker zugeführt und anschließend mit Hilfe des o.g. Ablenggenerators zur synchronen Darstellung der Probe auf einer Bildröhre genutzt.

2.2.5 Steuerung der Ablenkspulen

Um das REM als Lithographiegerät nutzen zu können, ist zunächst eine Steuerung der Ablenkspulen erforderlich. Die Vorgabe, zweidimensionale Strukturen lithographisch zu erzeugen, macht es notwendig, den Elektronenstrahl entsprechend der lateralen Geometrie (x- und y-Achse) der Strukturen über die Probe zu führen. Dazu werden die Raster-Ablenkspulen mit Hilfe von zwei 16Bit-Digital/Analog-Wandlern (kurz: D/A-Wandler) rechnergestützt angesteuert (vgl. Abb. 2.2).

2.2.6 Ausblendeinrichtung für den Elektronenstrahl

Um den Strahl nur an definierten Orten auf der Probe ein- und auszutasten (beam blanking), wird in den Strahlengang des REM zwischen Elektronenkanone und erster Justierspule ein Kondensator in Form einer Schlitzblende (Schlitzweite = 1 mm) eingebaut (vgl. Abb. 2.2). Aufgrund der nur geringen notwendigen Auslenkungen wird hierzu eine Gleichspannung von 100 - 200 V benötigt. Die Steuerung erfolgt über einen separaten Verstärker. Für eine fehlerfreie Belichtung ist es notwendig, daß die Ausblendzeit im Vergleich zur Zeit für eine Punktbelichtung wesentlich kürzer ist. Die Belichtung von Strukturen innerhalb eines vordefinierten Schreibfeldes wird bei dem hier verwendeten System in vektorieller Form durchgeführt. Den Unterschied zur rasterförmigen Strahlaustastung zeigt Abb. 2.3 auf.

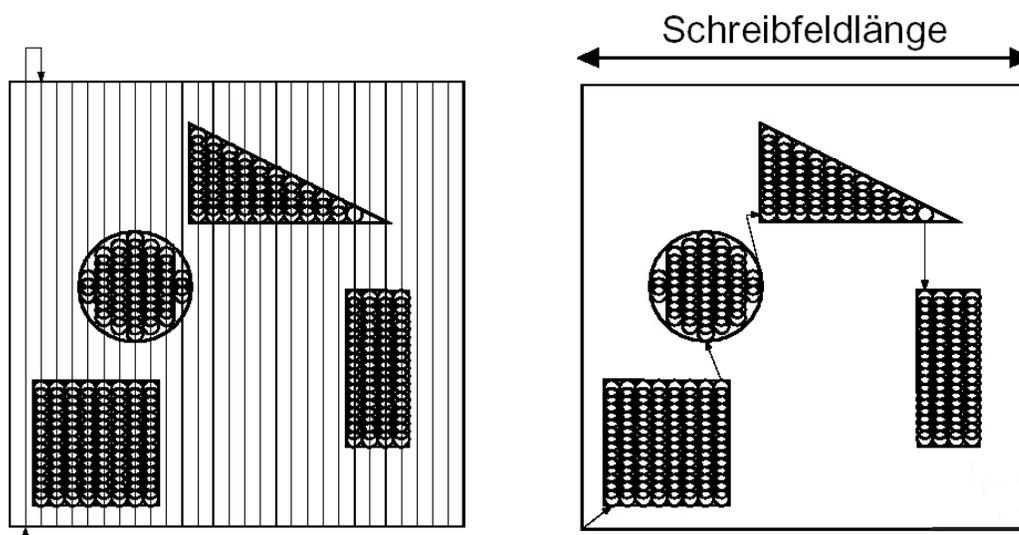


Abbildung 2.3: Prinzip der rasterförmigen (links) und vektoriellen (rechts) Strahlsteuerung

Bei der rasterförmigen Austastung folgt die Elektronenoptik Zeilen, die stets eine gesamte Schreibfeldlänge betragen. Nur in den zu belichtenden Bereichen findet ein Eintasten des Elektronenstrahls statt (vgl. Abb. 2.3 links). Im Gegensatz dazu werden die Ein- und Austastensituationen bei der vektoriellen Belichtungsart durch eine Logik geeigneter Start- und Endpunkte der zu belichtenden Strukturen vorgegeben (Abb. 2.3 rechts). Jede in sich geschlossene Struktur wird zunächst vollständig belichtet. Danach wird der Elektronenstrahl ausgetastet, die Elektronenoptik innerhalb des Schreibfeldes zur nächsten Struktur justiert, und für den neuen Schreibvorgang wieder eingetastet. Das vektorielle Verfahren beinhaltet zusätzlich zur strukturabhängigen Austastung eine zeilenweise Austastung. Je nachdem, wie die Strukturen im Schreibfeld angeordnet sind, wird über die Software die günstigste Schreibrichtung, d.h. diejenige mit den geringsten Austastzeiten ermittelt, und der Elektronenstrahl entsprechend geführt.

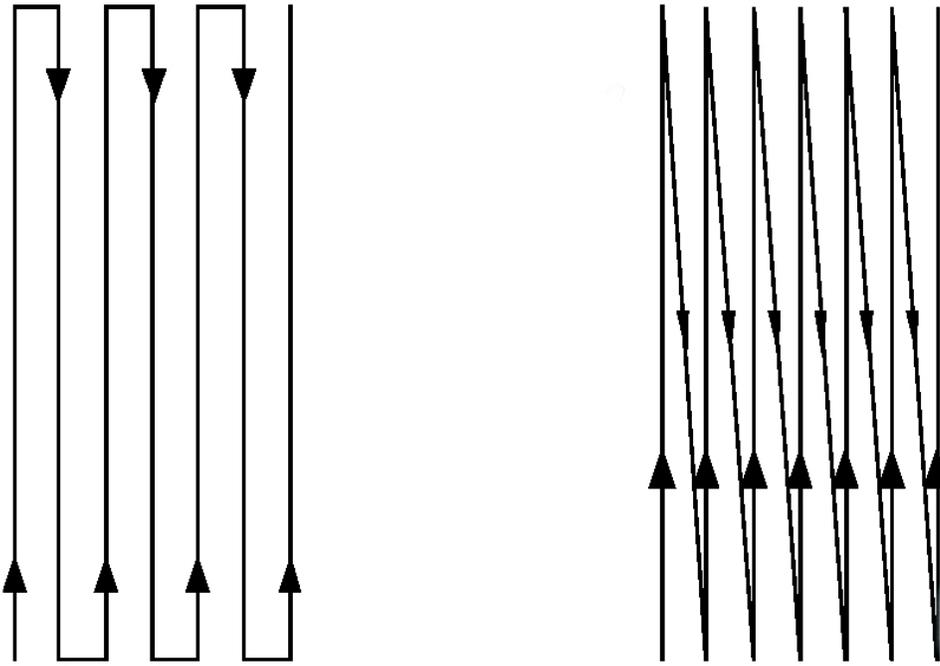


Abbildung 2.4: Elektronenstrahlableitung im Meander- (links) und Zeilenmodus (rechts).

Bei der Belichtung einer geschlossenen Struktur unterscheidet man zwischen dem sogenannten Meander-Modus (MM-Modus) und dem Zeilen-Modus (LM-Modus). Das Prinzip dieser Schreibmodi ist in Abb. 2.4 dargestellt. Beim MM-Modus wird im Gegensatz zum LM-Modus der Elektronenstrahl entlang jeder zu belichtenden Zeile meanderförmig, d.h. in alternierender Schreibrichtung geführt. Da sich die Schreibrichtung beim LM-Modus von Zeile zu Zeile nicht ändert, ist es hierbei notwendig den Strahl am Ende jeder Zeile solange auszutasten, bis die Elektronenoptik wieder auf den Beginn der nächsten Zeile ausgerichtet ist. Damit ist der Belichtungsvorgang derselben Struktur im LM-Modus zeitintensiver als im MM-Modus. Darüber hinaus hat sich gezeigt, daß die Synchronisation beim zeilenweisen Eintasten des Elektronenstrahles im LM-Modus schwieriger ist als im

MM-Modus. Ein typischer Effekt des LM-Modus besteht darin, das verzerrte Randgebiete belichteter Strukturen aufgrund des fehlerhaft synchronisierten Eintastens auftreten. Wichtig bei beiden Belichtungsverfahren ist, daß sich die Spots des Elektronenstrahls wegen des Gauß'schen Profils (vgl. Gl. (2.2)) zu einem bestimmten Teil überlagern, um eine gleichmäßige und homogene Belichtung zu gewährleisten.

2.2.7 Rechnergestütztes CAD-System

Mit Hilfe des rechnergestützten CAD-Systems können Entwürfe (Layouts) im GDSII-Standard erstellt oder auch importiert werden. Die prinzipielle Vorgehensweise zur Erstellung eines Layouts für die Belichtung wird im folgenden kurz vorgestellt. Zunächst wird eine geeignete Größe für das Schreibfeld ausgewählt. Das Schreibfeld ist dabei als diejenige Fläche definiert, innerhalb der die Belichtung von Strukturen ohne Verfahren des Probenisches durchgeführt werden kann. Die Wahl der Schreibfeldgröße hängt daher primär von der Größe der zu belichtenden Struktur, aber auch von der Einstellung der Vergrößerung des REM ab. Die implementierte Software basiert auf der Festlegung quadratischer Schreibfelder. Aufgrund der 16Bit-D/A-Wandler wird die Seitenlänge eines Schreibfeldes in 65536 (2^{16}) Pixel quantisiert erfaßt. Mit der Festlegung der Schreibfeldgröße ist somit die minimal mögliche Schrittweite für die Elektronenstrahlablenkung gemäß Gl. (2.3) festgelegt:

$$\text{Schrittweite} = \frac{\text{Schreibfeldkantenlänge}}{2^{16}} \quad (2.3)$$

So ergibt sich bei einer Festlegung eines Schreibfeldes der Kantenlänge 500 μm eine minimale Schrittweite von $d_S = 7.629 \text{ nm}$.

3 Elektronenstrahlempfindliche Resiste

Für die Anwendung in der Strukturierungstechnik werden Resiste zunächst nach ihrer wellenlängenspezifischen Fotoempfindlichkeit unterschieden. Mehrkomponenten-Resiste (Novolacke oder AZ-Lacke) werden im sichtbaren Wellenlängenbereich und dort vorzugsweise bei $\lambda = 365 \text{ nm}$ (i-line) und 435 nm (g-line) eingesetzt. Dagegen bilden Polymere und Copolymere als Einzelkomponenten-Resiste die chemische Basis der meisten elektronenstrahlempfindlichen Fotolacke. Aufgrund der Vielfalt der Lösungsmittel, der Molekulargewichte und Feststoffgehalte existiert eine große Anzahl unterschiedlicher Produkte. Daher ist es wichtig, für eine spezielle Anwendung die richtige Auswahl zu treffen. Kriterien hierfür sind:

- gefordertes Auflösungsvermögen,
- Fotoempfindlichkeit,
- Schichtdicke,
- chemische Beständigkeit.

3.1 Fotochemische Wechselwirkungsprozesse

Wird Fotolack einer Strahlung ausreichender Energie ausgesetzt, erfolgt ein chemischer Umbildungsprozeß des Ausgangsproduktes zu Zwischenprodukten. Diese besitzen veränderte chemische Eigenschaften. Im Fall der Elektronenstrahlbelichtung müssen die auf den Resist auftreffenden Elektronen eine kinetische Energie besitzen, die betragsmäßig größer ist als die Bindungsenergie der Elektronen des Resistes. Bei der Ionisierung charakteristischer Bestandteile entstehen Radikale des Polymers. Diese können im nachfolgenden Entwicklungsprozeß herausgelöst werden oder zu neuen Verbindungen, die im Entwickler unlöslich sind, genutzt werden.

3.1.1 Positiv- und Negativ-Resiste

Der prinzipielle, chemische Aufbau von elektronenstrahlempfindlichen Polymeren besteht in der Kettenbildung durch Monomere, wie in Abb. 3.1 dargestellt.

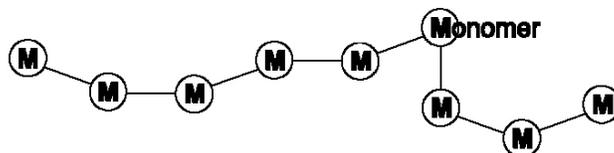


Abbildung 3.1: Prinzipieller Aufbau einer Polymerkette aus Monomeren.

Die Bestrahlung eines solchen Polymers mit Elektronen verursacht ein Aufbrechen der Polymerkette (De-Polymerisation). Die entstehenden Radikale sind nicht stabil und haben das Bestreben, wieder zu polymerisieren. Damit bleibt nach der Belichtung nur ein gewisser Prozentsatz an gespaltenen Polymerketten übrig. Aufgrund dieses Sachverhaltes unterscheidet man zwei mögliche Prozesse, wie in Abb. 3.2 illustriert:

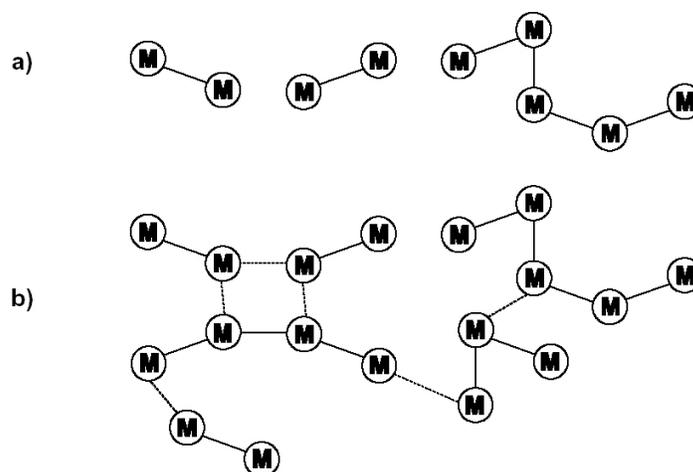


Abbildung 3.2: Prinzip der De-Polymerisation (a) und Re-Polymerisation (b) nach dem Belichtungsvorgang.

a) Der erste Prozeß (vgl. Abb. 4.2a) ist die kettenspaltende De-Polymerisation (chain-scission), bei der sich die Polymerketten in mehrere kleine Molekülketten aufspalten.

b) Der zweite Prozeß (vgl. Abb. 4.2b) besteht in der Wiedervernetzung (Re-Polymerisation, cross-linking) der einzelnen Molekülketten zu längeren Polymeren als das Ausgangsprodukt. Hierbei werden neue Verbindungen zwischen Monomeren aus derselben oder aus benachbarten Ketten hergestellt. Ein Resist, bei dem die Strahlungsempfindlichkeit für De-Polymerisation überwiegt, stellt einen positiv arbeitenden Fotolack dar. Entsprechend spricht man im Fall von überwiegender Wiedervernetzung von einem negativ arbeitenden Fotolack. Positiv (negativ) bedeutet dabei, daß im nachfolgenden Entwicklungsprozeß nur das belichtete (unbelichtete) Resistmaterial herausgelöst, und somit eine positive (negative) Abbildung geleistet wird. Festzuhalten ist, daß stets beide chemischen Prozesse im Fotolack ablaufen, wobei der jeweils dominierende Effekt die Abbildungseigenschaft des Resistes definiert.

3.1.2 Streumechanismen von Elektronen

Aufgrund des Massenunterschieds zwischen den zur Belichtung genutzten Elektronen und den Molekülen des Polymers bzw. des Substrats stellen sich Streueffekte ein, deren Auswirkung den Lithographieprozeß maßgeblich beeinflussen (Abb. 3.3). Bei Eintritt des Elektronenstrahls in den Resist erfolgt eine erste Strahlaufweitung aufgrund der Vorwärtsstreuung. Vernachlässigt man zunächst die Resistdicke, dann entspricht diese Strahlaufweitung dem Radius α , der sich umgekehrt proportional zur Elektronenenergie W_{el}

$$\alpha \propto W_{el}^{-1.1} \quad (3.1)$$

und damit auch zur Beschleunigungsspannung U_{acc} verhält. Dringt der Primärstrahl in das Substrat ein, werden die Elektronen an den Gitteratomen ein weiteres Mal gestreut. Diejenigen Elektronen, die bei diesem Prozeß eine Impulsänderung in der Art erfahren, daß eine Rückstreuung in den Fotolack möglich wird, zählen zu den Rückstreuelektronen (back scattered electrons, BSE, vgl. Abb. 3.3). Die BSE tragen damit zu einer rückwärtigen Belichtung des Resistes bei. Der Radius β , innerhalb dessen BSE nachgewiesen werden, kann deutlich größer als der Primärstrahldurchmesser α sein. Der Radius der BSE nimmt im Gegensatz zu α mit steigender Elektronenenergie W_{el} zu:

$$\beta \propto W_{el}^{1.7} \quad (3.2)$$

Dies ist in der erhöhten Eindringtiefe der Primärelektronen in das Substrat begründet, was Streuungen damit wahrscheinlicher macht. Mit gesteigerter Eindringtiefe ist aber auch eine Erhöhung der mittleren Reichweite der BSE verbunden (vgl. Gl. (3.2)), so daß sich die Austrittsfläche zwischen Substrat und Resist deutlich erhöht. Damit nimmt aber die Dichte der BSE ab, was eine verringerte, rückwärtige Belichtungsintensität bedeutet. Zusätzliche Streumechanismen, die nicht unmittelbar zu Lithographieeffekten führen und daher an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden, führen zur Erzeugung von sogenannten Auger-Elektronen (AE) und von Röntgenstrahlen (X) (vgl. Abb. 3.3).

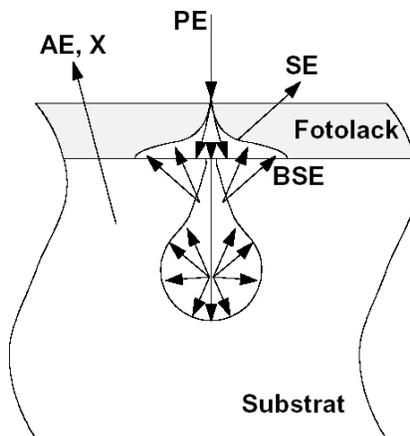


Abbildung 3.3: Streuprozesse bei der Elektronenstrahlbelichtung; PE: Primärelektronen, SE: Sekundärelektronen, BSE: Rückstreuelektronen (back-scattered electrons), AE: Auger-Elektronen, X: Röntgenstrahlung (X-ray).

3.1.3 Proximity-Funktion

Die mathematische Beschreibung der eingeführten Streueffekte gelingt mit Hilfe der Belichtungsintensitätsverteilung (exposure intensity distribution, EID). Hiernach kann die Belichtungsintensität I_P eines infinitesimal kleinen Punktes einer belichteten Struktur der Fläche A , wie folgt, berechnet werden:

$$I_P = \int P_f(r) dA \quad (3.3)$$

Hierbei bezeichnet P_f die Funktion der EID in Abhängigkeit vom Radius r des Elektronenstrahls. Aufgrund des Gauß'schen Charakters für die örtliche Verteilung der Elektronen innerhalb des gesamten Strahls kann P_f mit Hilfe der eingeführten Parameter α und β wie folgt mathematisch formuliert werden:

$$P_f(r) = \frac{1}{\pi(1+\eta)} \left[\frac{1}{\alpha^2} \exp\left(\frac{-r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{\eta}{\beta^2} \exp\left(\frac{-r^2}{\beta^2}\right) \right] \quad (3.4)$$

Gl. (3.4) wird Proximity-Funktion genannt und ist in dem vorliegenden Fall auf $1/m^2$ normiert. Sie stellt als Intensitätsprofil den Querschnitt durch die EID dar und setzt sich aus den Gauß'schen Intensitätsverteilungsfunktionen der vor- bzw. rückwärts gestreuten Elektronen zusammen. Damit beschreibt P_f die Überlagerung zweier gewichteter Gauß-Funktionen, für die jeweils ihre Standardabweichungen α und β charakteristisch sind. In Abb. 3.4, in der die Proximity-Funktion beispielhaft für vorgegebene Werte α , β und η dargestellt ist, kommt dieses Verhalten deutlich zum Ausdruck:

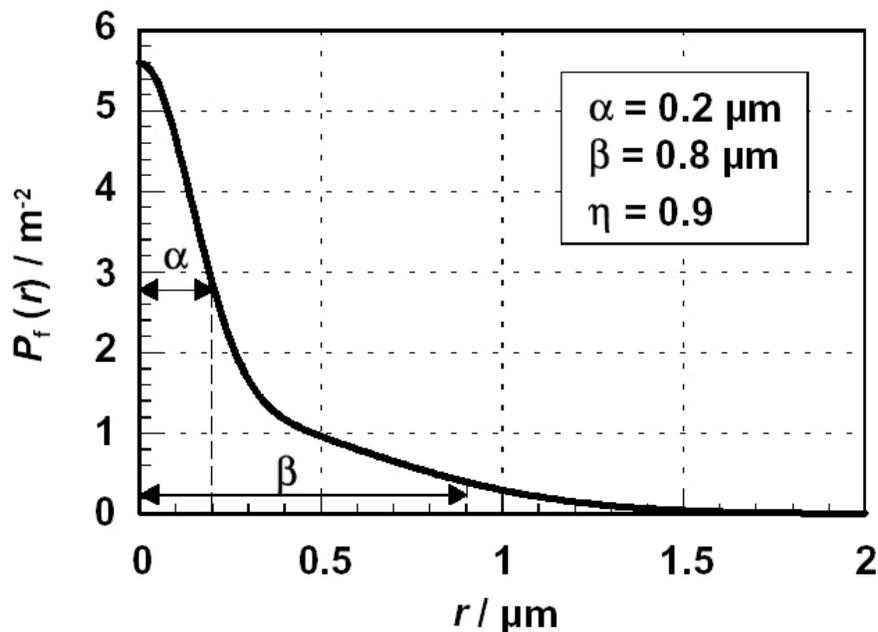


Abbildung 3.4: Proximity-Funktion P_f in Abhängigkeit vom Radius r des Strahlauftreffpunktes für $\alpha = 0.2 \mu\text{m}$, $\beta = 0.8 \mu\text{m}$ und $\eta = 0.9$.

Die Abbildung zeigt das Simulationsergebnis für die Proximity-Funktion P_f einer Punktbelichtung in Abhängigkeit vom Radius r für die vorgegebenen Proximity-Parameter $\alpha = 0.2 \mu\text{m}$, $\beta = 0.8 \mu\text{m}$ und $\eta = 0.9$. Der noch nicht näher diskutierte Parameter η ist eine willkürlich eingeführte Größe. Diese wird oft unzureichend als das Verhältnis des Anteils rückgestreuter zu vorwärtsgestreuter Elektronen bezeichnet. Die obige Definition basiert auf den grundlegenden Arbeiten von T.H.P. Chang, der sich erstmals quantitativ mit den Proximity-Effekten beschäftigte. In Verbindung mit der experimentellen Bestimmung der drei Proximity-Parameter ist η als ein Gewichtungsfaktor zu verstehen, der aus der Extraktion der Koeffizienten der anzunehmenden Proximity-Funktion resultiert. Dies wird deutlich, wenn die Proximity-Funktion einmal nicht normiert dargestellt wird:

$$P_f(r) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{k_1}{\alpha^2} \exp\left(\frac{-r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{k_2}{\beta^2} \exp\left(\frac{-r^2}{\beta^2}\right) \right] \quad (3.5)$$

Bei der Extraktion der Parameter α , β , k_1 und k_2 aus einem experimentell ermittelten Meßergebnis wird die Anzahl der unbekanntenen Größen aus Gl. (3.5) reduziert, indem die Koeffizienten k_1 und k_2 zum Parameter η zusammengefaßt werden:

$$\eta = \frac{k_2}{k_1} \quad (3.6)$$

3.2 Intra-Proximity- und Inter-Proximity-Effekte

Die im Fall von Punktbelichtungen diskutierte Proximity-Funktion äußert sich bei der Belichtung von lateral ausgedehnten, benachbarten Strukturen in zwei grundlegenden Phänomenen: Werden Strukturen unterschiedlicher lateraler Abmessungen mit derselben Dosis belichtet, ist bei den kleineren Strukturen stets eine Unterbelichtung festzustellen, da dort die Streuanteile wesentlich geringer sind. Dieser Intra-Proximity-Effekt ist in Abb. 3.5 deutlich zu erkennen. Während die Linie der Breite von $2 \mu\text{m}$ völlig frei belichtet und entwickelt ist, zeigt das Ergebnis für die Linie der Breite von $1 \mu\text{m}$ bereits unsaubere Kantenabschlüsse. Bei Betrachtung der $0.5 \mu\text{m}$ breiten Linie sind schließlich sogar deutliche Residuen zu erkennen, die auf eine nicht ausreichende Belichtungsintensität hinweisen. Die Belichtung benachbarter Strukturen kann bei Unterschreitung eines prozeßabhängigen Mindestabstandes zur gegenseitigen Belichtung führen. Dieser Inter-Proximity-Effekt äußert sich in der Aufwölbung der jeweiligen Randbereiche hin zur benachbarten Struktur (vgl. Abb. 3.6).

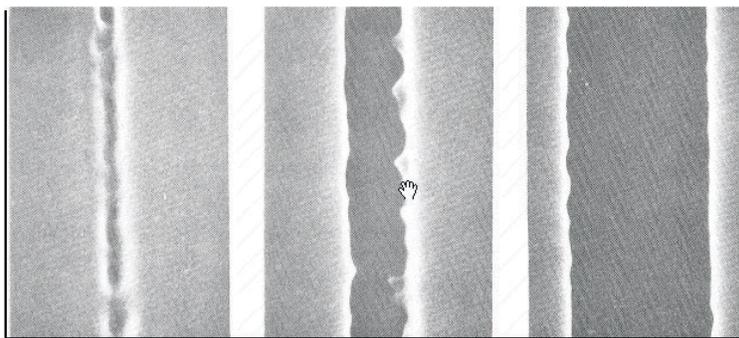


Abbildung 3.5: REM-Aufnahme von mit gleicher Dosis belichteter Linien-Strukturen der Breite 0.5 µm, 1 µm und 2 µm (von links nach rechts) nach Entwicklung

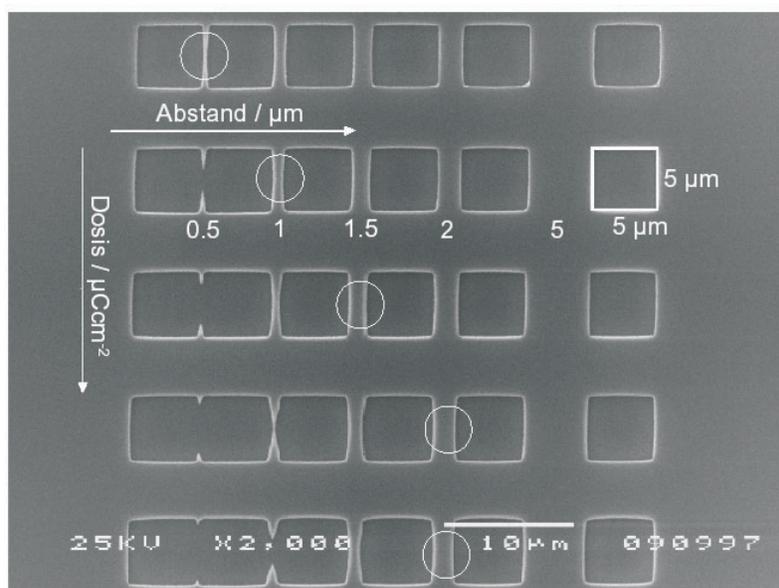


Abbildung 3.6: Testmuster zur Demonstration des Inter-Proximity-Effektes

In Abb. 3.6 ist das Ergebnis der Belichtung eines Testmusters in PMMA (950k, 6% Feststoffgehalt) dargestellt, das aus Quadraten der Kantenlänge $l = 5 \mu\text{m}$ besteht. Die jeweils in einer Reihe angeordneten Quadrate wurden in unterschiedlichen Abständen zueinander mit konstanter Intensität belichtet. Durch Variation der Belichtungsintensität für die Strukturen jeder Reihe entsteht so die in Abb. 3.6 dargestellte Matrix. Der in Abhängigkeit der Dosis und des Mindestabstandes jeweils einsetzende Überbelichtungseffekt ist deutlich erkennbar (siehe Kreise in Abb. 3.6). Die Unterdrückung des Inter-Proximity-Effektes bei wesentlich geringeren Abständen macht eine sogenannte Proximity-Korrektur notwendig. Hierbei wird nach einem bestimmten Algorithmus die Belichtungsintensität in den Randbereichen zurückgenommen, um so eine Überbelichtung zu vermeiden.

3.3 Polymethylmethacrylate

Polymethylmethacrylate (PMMA) sind die Standard-Positiv-Resiste für den Einsatz in der Elektronenstrahlolithographie. Sie werden hauptsächlich in Chlorbenzol und seit neuerem in Ethyllaktat, einem wesentlich weniger gesundheitsschädlichen Produkt, gelöst. PMMA ermöglicht ungeachtet seiner geringen Resistenz zum Reaktiven-Ionen-Ätzen (reactive ion etching, RIE) und einiger anderer Chemikalien die Erzielung von höchst aufgelösten Strukturen. PMMA ist ein Polymer, das, wie bereits eingeführt, aus langen Ketten von Monomeren besteht. Die Monomere setzen sich aus Molekülen zusammen, deren Hauptbestandteil Kohlenstoff ist. Die chemische Strukturformel und der prinzipielle Mechanismus der Haupt-Kettenspaltung (main chain scission) infolge der Elektronenstrahlbelichtung zeigt Abb. 3.7. Die reaktionsfähige Doppelbindung des isolierten PMMA-Monomers wird für die Kettenbildung zur CH₂-Gruppe des benachbarten Monomers benutzt, um so den energetisch günstigsten Zustand aufrecht zu erhalten. Bei Energiezufuhr durch den Elektronenbeschuss werden eine Vielzahl verschiedener chemischer Kettenbruchmechanismen wirksam. Für die grundlegenden Zusammenhänge ist es ausreichend, die Hauptkettenspaltung am reaktionsfähigen Kohlenstoffatom, das als Monomer die o.g. Doppelbindung eingeht, zu betrachten. Die Kettenspaltung erfolgt nach einem radikalischen Mechanismus, bei dem stets instabile Zwischenprodukte entstehen, die erneut das Bestreben zur Re-Polymerisation besitzen.

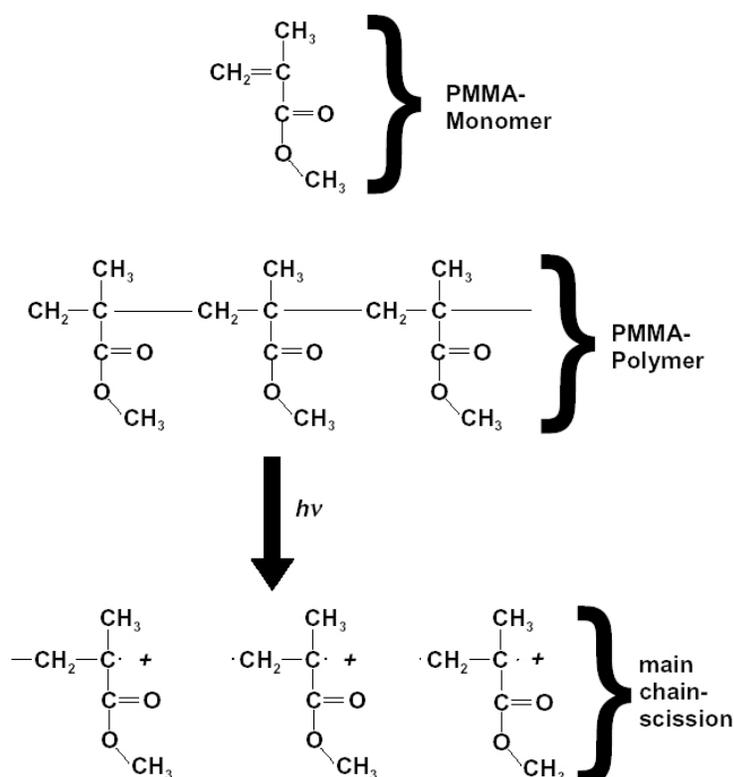


Abbildung 3.7: Chemische Strukturformel für PMMA; Prinzip der Polymerisation und De-Polymerisation infolge von Belichtung

4 Versuchsdurchführung

4.1 Probenherstellung

Vorbereitung der Feldemissionskathode des Elektronenmikroskops

Um einen möglichst stabilen Emissionsstrom während des Lithographieprozesses zu gewährleisten, muß die Kathode des Elektronenmikroskops zirka eine Stunde vor Versuchsbeginn gereinigt werden (*flashen*). Diese Prozedur ist vom Betreuer durchzuführen.

Beim Flashen werden durch Anlegen einer Spannung adsorbierte Gasatome von der Oberfläche der Kathode entfernt. Den Verlauf des Emissionsstroms kann man generell in drei Phasen einteilen: die anfängliche Reduktionsphase, die stabile Phase und eine anschließende instabile Phase.

Direkt nach dem Flashen sind alle Gasadsorbate von der Kathode entfernt. Allerdings werden nun wieder nach und nach Gasmoleküle an der Oberfläche der Kathode adsorbiert. In dieser Phase kommt es nun vermehrt zur Adsorption, Desorption und der Umlagerung von Gasmolekülen, wodurch Fluktuationen des Emissionsstroms beobachtet werden können. Im stabilen Bereich näherungsweise eine Lage Gasmoleküle auf der Oberfläche der Kathode adsorbiert. In diesem Zustand ist normalerweise ein stabiler Emissionsstrom verfügbar. Es kann aber dennoch durch gelegentliche Adsorptions- und Desorptionsprozesse zu geringfügigen Schwankungen im Emissionsstrom kommen. Allerdings stellt sich der stabile Zustand recht schnell wieder ein.

Im instabilen Bereich überwiegen dagegen die Adsorptions- und Desorptionsprozesse dermaßen, dass kein stabiler Strom mehr erreicht werden kann.

Die Aufnahme von Bildern erfolgt deshalb während der stabilen Phase. Die Zeitabschnitte der verschiedenen Phasen hängen von mehreren Faktoren (Qualität des Vakuums, Restgaskomponenten, Qualität der Kathode, eingestellter Emissionsstrom usw.) ab. Für das hier verwendete Gerät lassen sie sich folgendermaßen abschätzen:

1. anfängliche Reduktionsphase 30 min - 3 Stunden
2. stabile Phase: 2 bis 12 Stunden

Dabei gilt als Faustregel, dass, je länger sich die Kathode in der Reduktionsphase befindet, die stabile Phase andauert. Es ist somit unabdingbar, vor jedem Versuch die Stabilität des Emissionsstroms zu überprüfen (siehe weiter unten).

Verwendete Substrate

Bei den verwendeten Substraten handelt es sich um vorgefertigte, Siliziumsubstrate, welche in einem Reinraum der Klasse 100 (nach Federal Standard 2 09E)¹ gelagert werden. Sollten keine Substratplättchen mehr vorhanden sein, so können auch aus einem Si-Wafer herausgeschnittene, 0,5 cm × 0,5 cm große Plättchen als Substrat dienen.

Die Substrate müssen vor der Strukturierung mittels Elektronenstrahlolithographie mit einem elektronenstrahlempfindlichen Resist belackt werden. Hierzu wird 2%-iges PMMA (Polymethylmetacrylat) 950 K verwendet. Dies geschieht aus Gründen eines möglichst schmutz- und staubfreien Arbeitens in dem schon erwähnten Reinraum.

Betreteten des Reinraums

Vor Betreten des Reinraums muß von den Praktikanten in der Schleusenkammer eine Schutzkleidung angelegt werden, um den Reinraum keiner unnötigen Belastung mit Staubteilchen auszusetzen. Zu dieser Schutzkleidung zählt ein Overall, Mundschutz, Handschuhe und Überziehschuhe. Es sollten nach Möglichkeit alle eigenen Kleidungsstücke vollständig bedeckt sein.

Reinigung der Proben

Vor dem Belacken werden die Proben zunächst einem gründlichen Reinigungsprozess unterzogen, bei dem sich die in einem mit Isopropanol bzw. Aceton gefüllten Becherglas befindenden Plättchen für etwa 2 min in ein Ultraschallbad gestellt werden. Dabei sollte folgende Reihenfolge eingehalten werden:

1. 2 min Isopropanol
2. 2 min Aceton zur gründlichen Reinigung
3. 2 min Isopropanol (neues Glas)
4. nochmals 2 min Isopropanol, wiederum in einem neuen Glas

Anschließend werden eventuell auf dem Substrat erkennbare Schlieren mit Hilfe einer Stickstoffpistole entfernt.

¹Ein Reinraum ist ein Raum unter kontrollierter Atmosphäre (Filtration, Überdruck), in welchem die Kontamination so weit wie möglich vermindert wird. Die Reinheitsklasse eines Reinraumes wird über die Messung der Partikelkonzentration der angegebenen Partikelgrößen in der Luft ermittelt. Anhand der Ergebnisse ist erkennbar, ob die Partikelkonzentrationen die Grenzkonzentration der jeweiligen Partikelgrößen nicht überschreiten und dadurch lassen sich die Reinheitsklassen ermitteln. Nach dem Federal Standard 209 E erfolgt die Einteilung in verschiedene Klassen. Die Reinraumklasse 100 läßt max. 100 Partikel größer als 0,5 µm pro ft³ Luft zu.

Aufbringen des elektronenstrahlempfindlichen Lacks

In einer Lackschleuder (5000 U/min) wird das PMMA anschließend auf das Substrat aufgebracht (spin-coating) und dieses zum Aushärten für 2 min auf eine heiße Platte mit 160 °C gelegt, so dass eine etwa 90 nm dicke, homogene PMMA-Schicht auf dem Substrat entsteht.

Verlassen des Reinraums

Nach dem Heizen der Probe muß diese für eine kurze Zeit abkühlen. Währenddessen können die verwendeten Pinzetten, die Lackschleuder sowie die Heizplatte und die Gläser gründlich gereinigt werden. Danach sollte man sich davon überzeugen, ob alle Geräte ausgeschaltet wurden. Es ist desweiteren darauf zu achten, dass sämtliche Abfallprodukte aus dem Reinraum entfernt werden. Beim Verlassen des Reinraums kann die Schutzkleidung erst in der Schleusenkammer wieder abgelegt werden. Die Schutzanzüge werden wiederverwendet, jedwene andere Schutzbekleidung kann weggeworfen werden.

4.2 Strukturierung der Proben mit dem Elektronenmikroskop

Inbetriebnahme des REM

Um das Rasterelektronenmikroskop in Betrieb zu nehmen, muß zunächst der Schalter **Display-Power on** am REM durch leichtes Herausziehen und anschließendes Umlegen nach oben betätigt werden. Dann wird der zur Lithographie benötigte Rechner angeschaltet. Desweiteren muß der **x-y-Schrittmotor** (DEBEN) zur Kontrolle der Position des Probenstischs angeschaltet werden.

Einschleusen der Probe in das REM

Zunächst muß die Probe mit Hilfe der beiden Klemmschrauben in den Probenhalter eingespannt werden. Zum Einschleusen der Probe wird eine separat gepumpte Schleuse verwendet, die es gestattet, Proben einzuschleusen, ohne jedesmal das Vakuum der Hauptkammer des Elektronenmikroskops zu brechen. Hierzu muß die Probe erst in diese Schleuse eingesetzt werden. Man vergewissere sich, dass das Ventil zwischen Schleuse und Hauptkammer geschlossen ist (Stellung C). Ebenso muß das Hauptventil des Mikroskops zwischen Elektronensäule und Hauptkammer geschlossen sein (Schalter *S.C.* auf *close* stellen). Anschließend drücke man den Knopf **Air** am Elektronenmikroskop, um die Schleuse zu belüften. Nun wird die Probe auf dem Transferstab durch Anschrauben montiert (bitte Handschuhe benutzen). Nach der Montage der Probe wird der Transferstab so weit wie möglich zurückgezogen und die Schleuse fest angedrückt. Durch Drücken der Taste **EVAC** wird das Vakuum in der Schleuse wiederhergestellt. Nachdem für ein ausreichendes Vakuum gesorgt wurde, öffnet man die Schleuse und transferiert die Probe zum Probenstisch innerhalb des Mikroskops. Sollte die Probe nicht ohne größere Kraftanwendung in die vorgesehene

Halterung passen, fragen sie bitte ihren Betreuer um Rat. Nach dem Einsetzen in den Probenstisch muß der Probenhalter von der Transferstange wieder losgeschraubt werden. Anschließend wird der Transferstab rausgenommen und die Schleuse wieder geschlossen

Einschalten des Elektronenstrahls

Wenn Druck in der Hauptkammer wieder niedriger als $2.5 \cdot 10^{-6}$ mbar ist, kann das Hauptventil geöffnet werden.

Auf der Konsole des Elektronenmikroskops sollte links oben die grüne Leuchtdiode **off** aufleuchten, die anzeigt, dass das Gerät betriebsbereit ist. Durch Drücken der Taste **On** wird der Elektronenstrahl angeschaltet. Dabei sollte die Beschleunigungsspannung langsam auf 20 kV und der Strom auf 20 μ A ansteigen. V_{ext} sollte kleiner als 6.2 kV sein.

Nach dem Einschalten des Elektronenstrahls sollten beide Bildschirme hell werden. Ein vernünftiges Bild erhält man durch Einstellen des Kontrasts und der Helligkeit.

Messung des Probenstroms

Zur Messung des Probenstroms muss zunächst der Faraday-Becher aufgesucht werden. Der Faraday-Becher ist eine metallische Aussparung, die mit einem Strommeßgerät verbunden ist. Dabei ist es so eingerichtet das ein Stromfluß lediglich von einem einfallenden Ionenstrahl herrühren kann. Die Position des Faraday-Becher ist mehr oder weniger probenunabhängig und befindet sich ungefähr bei $x = -7.0$ und $y = -7.5$. Die Vergrößerung sollte nun solange reguliert werden, bis der gesamte Bildausschnitt innerhalb des Faraday-Bechers liegt.

Anschließend wird das Keithley-Strommeßinstrument an die BNC-Buchse auf Mikroskoperdung angeschlossen. Der Strommesser wird durch Anschalten und Drücken der Taste **Operate** in Betrieb genommen. Am Rechner muß nun das Lithographieprogramm **Elphy Quantum** gestartet werden. Das Programm gestattet einem neben den Lithographiemöglichkeiten auch die manuelle Steuerung des Ein- und Ausschalten des Elektronenstrahls. Der Strahl soll nun mit dem Programm **ausgeschaltet** werden. Am Keithley wird anschließend durch mehrmaliges Drücken der Taste **suppress** der Offset unterdrückt drücken, bis der Strom auf Null gesetzt ist. Nun schaltet man den Strahl an und notiert sich den abgelesenen Stromwert. Desweiteren ist die aktuelle Uhrzeit festzuhalten und nach 10 min die Messung zu wiederholen. Sollte sich bei der Wiederholungsmessung eine Abweichung von mehr als 15 % zeigen, so ist die Strommessung in einer Stunde nochmals zu wiederholen, andernfalls kann man mit dem Versuch fortfahren.

Wenn auch nach einstündiger Wartezeit kein stabiler Strom gemessen werden kann, so muß die Kathode über Nacht ausgeheizt werden (dies ist vom Betreuer durchzuführen).

Definition eines lokalen Koordinatensystems

Da die Form der verwendeten Proben von Versuch zu Versuch unterschiedlich ist, würde es keinen Sinn machen, die beim Schrittmotor verwendeten absoluten Koordinaten zu verwenden. Stattdessen wird ein lokales Koordinatensystem definiert. Dies kann während den beiden Strommessungen durchgeführt werden.

Hierzu müssen zunächst die Koordinaten der 4 Ecken der Probe bestimmt werden. Notieren Sie sich diese Koordinaten und bestimmen Sie anschließend ein geeignetes Feld auf der Probe (Bsp.). Danach muß dieses neue Koordinatensystem im Elphy-Programm festgelegt werden. Überprüfen Sie, ob die lokalen Koordinaten im Programm den absoluten Koordinaten folgen.

Einstellung des Elektronenmikroskops

Um die Einstellung des Rasterelektronenmikroskops zu optimieren, werden die folgenden Schritte durchgeführt. Zunächst sucht man sich eine markante Struktur auf der Oberfläche der Probe aus (Staubkorn o.ä.) und fokussiert auf diese Struktur bei 2000facher Vergrößerung.

Säuleneinstellung (Drücken der Taste **F3** auf der Mikroskop-Konsole): Beam-Align: Mit den x-, y-shift-Tasten an der Mikroskopkonsole muss der sichtbare Kreisausschnitt in die Mitte des Bildschirms gebracht werden. Mit den nächsten drei Menüpunkten können Bewegungen des Bildes in x- und y-Richtung eliminiert werden. Ein sogenanntes Atmen der Struktur ist nicht zu verhindern. Die Astigmatismus-Korrektur wird vom Betreuer durchgeführt.

Lithographieprozess

Wenn der Strom stabil ist, kann mit der eigentlichen Lithographie begonnen werden. Zuerst muß dem Programm mitgeteilt werden, wie groß die ungefähre Schreibfeldgröße ist, so daß die gewünschte Struktur gerade noch hineinpasst. Durch Eingeben dieser Größe wird die benötigte Vergrößerung des Mikroskops festgelegt. Die Eingabe der Schreibfeldgröße geschieht im Fenster **Microscope** des Elphy-Programms. Für die von uns verwendete Struktur beträgt die Schreibfeldgröße 200 μm . Geben Sie die Schreibfeldgröße ein und bestätigen Sie den Wert durch Drücken der Taste **Set**. Im nebenstehenden Feld wird die Vergrößerung automatisch eingestellt. Notieren Sie sich diesen Wert, da sie später die Vergrößerung am Mikroskop auf diesen Wert einstellen müssen.

Desweiteren muss dem Programm nun mitgeteilt werden, welche Struktur an welcher Position der Probe lithographiert werden soll. Dazu müssen Sie zunächst eine neue Positionsliste erstellen. Klicken Sie das Fenster **Position List** an und ziehen Sie bei gedrückter linker Maustaste die gewünschte Struktur aus dem **GDSII-Fenster** in die Positionsliste ziehen². Lassen Sie anschließend die linke Maustaste los. Daraufhin sollte ein neuer Eintrag mit der Nummer Null in der Positionsliste erscheinen. Wiederholen diese Schritte, bis die gewünschte Anzahl an Strukturen erreicht ist. Bearbeiten Sie nun mit **Edit** die lokalen Koordinaten U, V und legen diese so fest, daß alle Strukturen innerhalb des gewünschten Bereichs zu liegen kommen und sich dabei nicht überlappen.

Anschließend müssen nun die zur Belichtung erforderlichen Daten wie Belichtungs dosis, Belichtungszeit, und Schrittweite der belichteten Punkte festgelegt werden. Hierzu drücken Sie im **Exposure-Fenster** auf **Calculate**. Im sich öffnenden neuen Fenster tragen Sie links den zuvor gemessenen Strom ein. Die benötigte Dosis beträgt in unserem Fall

²Die benötigten Strukturen sind in der Datei **All Users/GDSII/fopra.csi** gespeichert

140 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$, die Belichtungszeit 0.005 ms. Die Schrittweite kann nun durch Drücken der Taste rechts neben dem Feld **Area-Stepsize** berechnet werden. Drücken Sie anschließend die Tasten rechts neben **Dwell Time** und **Dosis**. Die zuvor eingetragenen Werte werden sich nun leicht verändern, da das Programm nur über bestimmte diskrete Schritte verfügt. Notieren Sie sich diese Werte und drücken anschließend die Taste **Cancel**³ Sie müssen nun die ermittelten Werte im **Exposure**-Fenster manuell eintragen. Danach muß noch der zu lithographierende Layer festgelegt werden. Die Verwendung von verschiedenen Layern dient nur zur besseren Übersicht bei komplexeren Strukturen und hat keinen physikalischen Hintergrund. Wählen Sie hier Layer 0 aus. Wenn Sie sich anschauen möchten, wieviel Zeit zur Lithographie benötigt wird, können Sie dies durch Drücken der Taste **Times** erfragen. Vor dem eigentlichen Lithographieren muß nun noch eine Focus-Feineinstellung durchgeführt werden. Dazu suchen Sie sich am Rand der Probe oder in einer der Ecken eine markante Struktur (Staubkorn o.ä.), und stellen bis zur maximalen Vergrößerung scharf. Hierbei sollte die Druckmeßröhre abgeschaltet sein. Die Struktur sollte in der Höhe des Films liegen. Schalten Sie nun den Elektronenstrahl aus und stellen Sie die Box zur Elektronenstrahlsteuerung auf extern. Stellen Sie die Mikroskopvergrößerung nun auf den eben ermittelten Wert und schalten das Strommeßgerät ab (bitte wieder erden). Starten Sie nun den Lithographievorgang.

Wenn das Elektronenmikroskop fertig ist, lithographieren Sie die Proximity-Teststruktur doughnut.asc auf dieselbe Weise wie oben. Hier wird allerdings ein größeres Schreibfeld benötigt (400 μm). Die sich ergebende Mikroskopvergrößerung sollte 150x betragen. Beachten sie bitte, dass sich die neuen Strukturen nicht mit den gerade lithographierten Strukturen überschneiden. Abschließend muß noch einmal der Strom gemessen werden. Sollte dieser zu stark von dem eben gemessenen Wert abweichen, so muß die gesamte Prozedur wiederholt werden. Im ungünstigsten Fall muß sogar die Kathode über Nacht ausgeheizt werden (dies wird vom Betreuer durchgeführt).

Anmerkung: Die Doughnut-Struktur steht zur Zeit nicht zur Verfügung. Näheres hierzu kann Ihnen Ihr Betreuer erläutern.

Entwickeln der Proben

Zum Ausschleusen der Probe muß nun der Probentisch zunächst auf die anfängliche Austauschposition zurückgefahren werden. Hierzu drücken Sie bitte die Taste **Exch** auf der Schrittmotorsteuerung und bestätigen dies mit **Enter**. Schalten Sie anschließend den Rechner sowie an der Mikroskopkonsole den Strahl aus. Sie können nun die Druckmeßröhre wieder einschalten. Schließen Sie das Hauptventil und schleusen Sie die Probe aus (analog zum Einschleusen der Probe). Nach dem Ausschleusen evakuieren Sie bitte wieder die Schleusenkammer. Schalten Sie nun das Mikroskop ab (Display Power). Ebenso schalten Sie das Strommeßgerät und die Motorsteuerung ab.

³Nicht nach Logik fragen, ist ein Programmfehler.

Entwickeln

Entnehmen Sie die Probe aus dem Probenhalter und halten Sie diese mit einer Pinzette in eine Entwicklerlösung für insgesamt 30 s, anschließend für 20 s in Isopropanol. Anschließend trocknen sie die Probe mit der Ar-Pistole. Sie können sich nun die Proben unter dem Lichtmikroskop betrachten.

4.3 Bestimmung der Proximity-Parameter

Zur Auswertung des Lithographie-Ergebnisses betrachtet man sich die fertige Probe unter einem Lichtmikroskop der Firma SIS. Die eingebaute CCD-Camera gestattet die Aufnahme von Bildern zur weiteren Datenanalyse. Anhand der aufgenommenen Bilder der hergestellten Probe sollen nun die interessierenden Proximity-Parameter gewonnen werden. Alternativ zum Lichtmikroskop können die hergestellten Proben auch unter dem REM betrachtet werden. Allerdings müssen sie dazu zunächst mit einer leitenden Schicht (z.B. Gold) besputtert werden. Dies ist etwas zeitaufwendiger ($\sim 3-4$ Stunden), da erst noch für Hochvakuum in der Sputteranlage gesorgt werden muss. Die Auswertung unterscheidet sich dabei geringfügig bezüglich der beiden lithographierten Proben (s. obigen Abschnitt).

Auswertung der lithographierten Proben

Im obigen Versuch wurden zwei verschiedene Teststrukturen lithographiert. Sie werden wie folgt ausgewertet:

1. Lithographie eines Feldes von Punkten mit verschiedener Dosis. Aus der wirklichen Ausdehnung der einzelnen Punkte nach der Entwicklung und dem entsprechenden $r(D)$ -Graphen können dann die Proximity-Parameter bestimmt werden.
2. Doughnut-Verfahren. Hierbei wird zunächst eine Matrix von Kreisringen (Doughnut) entworfen, bei denen der innere Radius sowie die jeweilige Dosis variiert werden. Der äußere Radius wird konstant gehalten. Nach Belichtung und Entwicklung der Struktur wird für jeden Innenradius r die Dosis D bestimmt, für die der innere Teil der Kreisringe vollständig belichtet ist. Ein Fit des entstehenden $D(r)$ -Graphen mit der Proximity-Funktion liefert die Proximity-Parameter.

Anmerkung: Die Doughnut-Struktur steht zur Zeit nicht zur Verfügung. Näheres hierzu kann Ihnen Ihr Betreuer erläutern.

5 Fragen

1. Erklären Sie den prinzipiellen Aufbau und die Funktionsweise eines Elektronenmikroskops! Wodurch wird die Auflösung beim Elektronenmikroskop eingeschränkt?
2. Wie erzeugt man Röntgenstrahlung? In welchem Wellenlängenbereich liegen Röntgenstrahlen?
3. Welche unterschiedlichen Betriebsmodi eines Elektronenmikroskops kennen Sie? Erklären Sie deren Funktionsweise und erläutern Sie die Unterschiede!
4. Erläutern Sie die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Lithographiearten! Wie unterscheiden sich rasterförmige und vektorielle Strahlsteuerung? Was versteht man unter Meander- bzw. Zeilen-Modus?
5. Was versteht man unter einem Positiv- bzw. Negativ-Lack? Um welche Art handelt es sich beim hier verwendeten PMMA?
6. Erklären Sie die Hauptreaktion beim Belichten der PMMA-Schichten?
7. Welche Sekundärprozesse werden durch das Auftreffen des Elektronenstrahls auf die Probenoberfläche ausgelöst?
8. Was versteht man unter dem Proximity-Effekt? Erläutern Sie die Auswirkungen während der Belichtung der Probe!
9. Erläutern Sie den Unterschied zwischen Intra- und Inter-Proximity-Effekten?
10. Nennen Sie verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Proximity-Parameter und erläutern Sie diese!