# 4 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  $\lambda = 365$  nm (i-line) und 435 nm (g-line) eingesetzt. Dagegen bilden Polymere und Copolymere als Einzkomponenten-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, die für die spezielle Anwendung richtige Auswahl zu treffen. Kriterien hierfür sind:

- a) gefordertes Auflösungsvermögen,
- b) Fotoempfindlichkeit,
- c) Schichtdicke,
- d) chemische Beständigkeit.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Polymere und Copolymere mit unterschiedlichen Lösungsmitteln, Molekulargewichten und Feststoffgehalten sowie Polyimide eingesetzt.

# 4.1 Fotochemische Wechselwirkungsprozesse

Wird Fotolack einer Strahlung ausreichender Energie ausgesetzt, erfolgt ein chemischer Umbildungsprozeß des Ausgangsproduktes zu Zwischenprodukten. Diese besitzen veränderte chemische Eigenschaften [63],[64]. 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.

#### 4.1.1 Positiv- und Negativ-Resiste

Der prinzipielle, chemische Aufbau von elektronenstrahlempfindlichen Polymeren [85] besteht in der Kettenbildung durch Monomere, wie in Abb. 4.1 dargestellt.



Abb. 4.1: 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. 4.2 illustriert [64]:



**Abb. 4.2:** Prinzip der De-Polymerisation (a) und Re-Polymersation (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 [86],[87],[88],[89].

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 [90],[91],[92].

Ein Resist, bei dem die Strahlungempfindlichkeit 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.

### 4.1.2 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. 4.3) [69],[93]. Bei Eintritt des Elektronenstrahls in den Resist erfolgt eine erste Strahlaufweitung aufgrund der Vorwärtsstreuung. Vernachlässigt man zunächst die Resistdicke entspricht diese Strahlaufweitung dem Radius  $\alpha$ , der sich umgekehrt proportional zur Elektronenergie  $W_{\rm el}$  [94] (vgl. Gl. 4.1):

$$\alpha \approx W_{el}^{-1.1},\tag{4.1}$$

und damit auch zur Beschleunigungsspannung  $U_{acc}$  verhält. Dringt der Primästrahl 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 (BSE, vgl. Abb. 4.3) [95]. Die BSE tragen damit zu einer rückwärtigen Belichtung des Resistes bei. Der Radius  $\beta$ , innerhalb dessen BSE nachgewiesen werden, kann deutlich größer als der Primärstrahldurchmesser  $\alpha$  sein. Der Radius der BSE nimmt im Gegensatz zu  $\alpha$  mit steigender Elektronenergie  $W_{el}$  [63] zu (vgl. Gl. 4.2):

$$\boldsymbol{\beta} \approx W_{el}^{1.7}.\tag{4.2}$$

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. 4.2), 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) [96] und von RÖNTGENstrahlen (X) [67] (vgl. Abb. 4.3). Die Nutzung der Sekundärelektronen (SE) für die Bilderzeugung wurde bereits im vorigen Kapitel erläutert.



Abb. 4.3: Streuprozesse bei der Elektronenstrahlbelichtung; PE: Primärelektronen, SE: Sekundärelektronen, BSE: Rückstreuelektronen (back-scattered electrons), AE: AUGER-Elektronen [96], X: RÖNTGENstrahlung (X-ray) [67].

#### 4.1.2.1 Proximity-Funktion

Die mathematische Beschreibung der eingeführten Streueffekte gelingt mit Hilfe der Belichtungsintensitätsverteilung (exposure intensity distribution, **EID**, [97]. Hiernach kann die Belichtungsintensität  $I_P$  eines infinitesimal kleinen Punktes einer belichteten Struktur der Fläche *A*, wie folgt, berechnet werden:

$$I_{\rm P} = \int P_{\rm f}(r) dA \,. \tag{4.3}$$

Hierbei bezeichnet  $P_f$  die Funktion der EID in Abhängigkeit vom Radius *r* des Elektronenstrahls. Aufgrund des GAUß'schen Charakters (vgl. Abschn. 3.2.1) für die örtliche Verteilung der Elektronen innerhalb des gesamten Strahls kann  $P_f$  mit Hilfe der eingeführten Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  wie folgt mathematisch formuliert werden (vgl. Gl. 4.4):

$$P_{\rm f}(r) = \frac{1}{\pi(1+\eta)} \left[ \frac{1}{\alpha^2} \exp\left(\frac{-r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{\eta}{\beta^2} \exp\left(\frac{-r^2}{\beta^2}\right) \right]. \tag{4.4}$$

Gl. 4.4 wird Proximity-Funktion genannt und ist in dem vorliegenden Fall auf  $1/m^2$  normiert [98]. 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  $\alpha$  und  $\beta$  charakteristisch sind. In Abb. 4.4, in der die Proximity-Funktion beispielhaft für vorgegebene Werte  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\eta$  dargestellt ist, kommt dieses Verhalten deutlich zum Ausdruck:



**Abb. 4.4:** Proximity-Funktion  $P_f$  in Abhängigkeit vom Radius r des Strahlauftreffpunktes für  $\alpha = 0.2 \ \mu m$ ,  $\beta = 0.8 \ \mu m$  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  $\alpha = 0.2 \ \mu m$ ,  $\beta = 0.8 \ \mu m$  und  $\eta = 0.9$ . Der noch nicht näher diskutierte Parameter  $\eta$  ist eine willkürlich eingeführte Größe [97]. Diese wird in der jüngeren Literatur oft unzureichend als das Verhältnis des Anteils rück-

gestreuter zu vorwärtsgestreuter Elektronen bezeichnet [98],[99],[100]. Die Definition im Rahmen dieser Arbeit basiert auf den grundlegenden Arbeiten von T.H.P. CHANG [97], der sich erstmals quantitativ mit den Proximity-Effekten beschäftigte. In Verbindung mit der experimentellen Bestimmung der drei Proximity-Parameter ist  $\eta$  als ein Gewichtsfaktor 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 (vgl. Gl. 4.5) [98]:

$$P_{\rm f}(r) = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{k_1}{\alpha^2} \exp\left(\frac{-r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{k_2}{\beta^2} \exp\left(\frac{-r^2}{\beta^2}\right) \right]. \tag{4.5}$$

Bei der Extraktion der Parameter  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $k_1$  und  $k_2$  aus einem experimentell ermittelten Meßergebnis wird die Anzahl der unbekannten Größen aus Gl. 4.5 reduziert, indem die Koeffizienten  $k_1$  und  $k_2$  zum Parameter  $\eta$  zusammengefaßt werden [97]:

$$\eta = \frac{k_2}{k_1}.\tag{4.6}$$

### 4.1.2.2 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 Phänomene [63],[69]: 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. 4.5 deutlich zu erkennen.

Während die Linie der Breite von 2  $\mu$ m völlig frei belichtet und entwickelt ist, zeigt das Ergebnis für die Linie der Breite von 1  $\mu$ m bereits unsaubere Kantenabschlüsse. Bei Betrachtung der 0.5  $\mu$ 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. 4.6).



**Abb. 4.5:** 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.



Abb. 4.6: Testmuster zur Demonstration des Inter-Proximity Effektes.

In Abb. 4.6 ist das Ergebnis der Belichtung eines Testmusters in PMMA (950k, 6% Feststoffgehalt) dargestellt (vgl. Abschn. 4.2.1), das aus Quadraten der Kantenlänge  $l = 5 \mu m$  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. 4.6 dargestellte Matrix. Der in Abhängigkeit der Dosis und des Mindestabstandes jeweils einsetzende Überbelichtungseffekt ist deutlich erkennbar (siehe Kreise in Abb. 4.6).

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 [101],[102],[103],[104].

# 4.1.3 Fotosensitivität

In der Literatur wird die Fotoempfindlichkeit bzw. -sensitivität im allgemeinen als eine strahlungstechnische Eigenschaft eines Resistes aufgefaßt. Das Resultat einer Belichtung kann in der Praxis aber nur durch den zugehörigen Entwicklungsprozeß vollständig erfaßt und korrekt beurteilt werden. Für diesen Fall wurde daher im Rahmen dieser Arbeit der Begriff der effektiven Fotosensitivität eingeführt.

# 4.1.3.1 Strahlungstechnische Fotosensitivität

Da elektronenstrahlempfindliche Fotolacke (EBEAM-Resiste) im Gegensatz zu Novolacken keine Mehrkomponentenstoffe darstellen [105], werden sie hauptsächlich nach ihren Molekulargewichten unterschieden [106]. Hergestellt werden sie in folgenden Bereichen:

50000 g/mol < M < 1500000 g/mol.

Für eine entsprechende Bezeichnung hat sich in der Literatur eine Kurzform durchgesetzt [106]. Ist von einem Resist des Typs PMMA-950k die Rede, so wird damit ein Fotolack mit einem Molekulargewicht von M = 950000 g/mol bezeichnet. Ein hohes Molekulargewicht bedeutet einen hohen Vernetzungsgrad des Polymers, anschaulich im einfachsten Fall durch eine erhöhte Polymerkettenlänge erklärt. Im Vergleich dazu bedeutet eine kurze Kettenlänge ein geringes Molekulargewicht. Erfolgt nach der Belichtung bei einem Polymer des Molekulargewichtes  $M_0$  die Kettenspaltung, so ergibt sich das den gespaltenen Molekülen zuzuordnende reduzierte Molekuargewicht  $M_e$  zu [85]:

$$M_{\rm e} = \frac{M_0}{1 + \eta_{\rm M}} \Leftrightarrow \frac{M_0}{M_{\rm e}} = 1 + \eta_{\rm M}. \tag{4.7}$$

Hierbei bezeichnet  $\eta_M$  die mittlere Anzahl der Spaltvorgänge pro Polymerkette. Es gilt:

$$\eta_{\rm M} = \frac{G \varepsilon M_0}{\rho N_{\rm A}},\tag{4.8}$$

mit:

G: Anzahl der Spaltvorgänge pro Elektronenenergie,
 ε: absorbierte Elektronenenergie pro Volumeneinheit,
 ρ: Dichte des Polymers; N<sub>A</sub>: Avogadro-Konstante.

Damit kann aus Gl. 4.7 und Gl. 4.8 das Molekulargewicht der Spaltprodukte  $M_e$  in Abhängigkeit vom Molekulargewicht vor der Belichtung  $M_0$  angegeben werden:

$$M_{\rm e} = \frac{M_0}{1 + \frac{G \varepsilon M_0}{\rho N_{\rm A}}}.$$
(4.9)

Die Gültigkeit von Gl. 4.9 bedeutet für die Elektronenstrahllithographie, daß die Wahrscheinlichkeit, Molekülketten aufgrund von Energiezufuhr aufzuspalten, bei einem hochmolekularen Resist wesentlich höher ist, als bei einem Resist mit niedrigerem Molekulargewicht. Nach der Belichtung ist die Anzahl der gespaltenen Ketten im hochmolekularen Resist größer und damit das Molekulargewicht um ein Vielfaches stärker reduziert als im niedermolekularen Resist. Damit ist der Belichtungsvorgang bei Resisten höheren Molekulargewichts wesentlich effektiver. Sie besitzen damit strahlungstechnisch eine größere Fotoempfindlichkeit als niedermolekulare Resiste [63]. Diese Definition muß aber, wie bereits erwähnt, noch um den Einfluß des Entwicklungsprozesses erweitert werden (vgl. Abschn. 4.1.3.2).

#### 4.1.3.2 Effektive Fotosensitivität

Die Wirksamkeit der absorbierten Elektronenenergie  $\varepsilon$  in bezug auf die Abtragsrate von belichtetem (*R*) zu unbelichtetem (*R*<sub>0</sub>) Resist unterliegt den ablaufenden chemischen Prozessen während des Entwicklungsvorgangs [85]. Bei dem im Rahmen dieser Arbeit auschließlich eingesetzten Naß-Prozeß in Form eines Flüssigkeitsbades ist damit der Fähigkeit *a* des Entwicklers, Resistmaterial herauszulösen, eine entscheidende Bedeutung zuzumessen. Es gilt [63]:

$$\frac{R}{R_0} = \left(\frac{M_0}{M_e}\right)^{-a}.$$
(4.10)

Nach Gl. 4.10 ist die Abtragsrate von belichteten (R) zu unbelichteten ( $R_0$ ) Resistbereichen im Entwicklerbad invers proportional zum Molekulargewicht der depolymerisierten Polymerketten  $M_e$  zum Ursprungsmolekulargewicht  $M_0$ . Danach lassen sich die belichteten Bereiche niedermolekularer Resiste schneller im Entwicklerbad herauslösen als diejenigen hochmolekularer Resiste. Da ein vollständiger Lithographieprozeß in der Praxis stets den dominierenden Entwicklungsprozeß beinhaltet, erscheint die Einführung einer effektiven Fotosensitivität sehr sinnvoll. Diese unterscheidet sich von der rein strahlungstechnischen Fotoempfindlichkeit (vgl. Abschn. 4.1.3), wie folgt:

Unter Einbezug des Entwicklungsprozesses besitzen Resiste niedrigen Molekulargewichtes eine größere effektive Fotoempfindlichkeit als höhermolekulare Resiste bei ansonsten gleicher chemischen Zusammensetzung.

Im Fall von mehrlagigen Fotolacksystemen zur Erzeugung spezieller Resistprofile ist diese Definition für die Anordnung der einzelnen Resiste im Gesamtsystem absolut entscheidend.

Erst bei deutlicher Überbelichtung kann der Einfluß des Entwicklers soweit reduziert werden, daß die strahlungstechnische Fotoempfindlichkeit auch praktische Gültigkeit erlangt [63]. Die Belichtungsintensität nimmt dabei allerdings so hohe Werte an, daß das dabei entstehende Fotolackprofil für viele Anwendungen unbrauchbar wird.

# 4.2 Verwendete Resiste

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Fotolacke lassen sich in positiv arbeitende Polymere und Copolymere (z.B. Fa. *Allresist GmbH*, Berlin, Deutschland) [106], einen chemisch verstärkten Lack ZEP 520 (z.B. Fa. Nippon Zeon Co. Ltd., Tokio, Japan) [82], und in negative arbeitende Polyimide (z.B. Fa. Olin Microelectronics Materials, Zwijndrecht, Belgien) [107] grob unterteilen. Letzterer Resist wird auch als dielektrische Zwischenschicht in MMIC verwendet.

Je nach Einsatzbereich sind unterschiedliche Eigenschaften der Resiste notwendig. Die drei wichtigsten Eigenschaften und ihre Auswirkungen sind in Tab. 4.1 zusammengefaßt:

Eigenschaft	Wirkung
Feststoffgehalt	Schichtdicke
Molekulargewicht	Empfindlichkeit/Kontrast
Lösungsmittel	Mischungsverhalten

Tab. 4.1: Eigenschaften und Auswirkungen von EBEAM-Resisten.

Alle Fotolacke wurden mittels einer Zentrifuge auf die Substrate aufgeschleudert. Für die Erzielung verschiedener Lackdicken innerhalb des durch den Feststoffgehalt voreingestellten Bereiches kann die Winkelgeschwindigkeit und -beschleunigung sowie die Schleuderzeit zusätzlich variabel eingestellt werden. Der Einfluß unterschiedlicher Molekulargewichte wurde bereits in Abschn. 4.1.3.1 erläutert. Um den Mischungsvorgang bei mehrlagigen Resistsystemen zu unterbinden, müssen die Einzelkomponenten in unterschiedlichen Lösungsmitteln gelöst sein.

### 4.2.1 Polymethylmethacrylate

Polymethylmethacrylate (PMMA) sind die Standard-Positiv-Resiste für den Einsatz in der Elektronenstrahllithographie [85], [106]. 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 [74] die Erzielung von höchstaufgelösten 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 chainscission) infolge der Elektronenstrahlbelichtung (vgl. Abschn. 4.1.1) [63] zeigt Abb. 4.7. 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 reaktionfähigen 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.



**Abb. 4.7:** Chemische Strukturformel für PMMA; Prinzip der Polymerisation und De-Polymerisation infolge von Belichtung.

#### 4.2.2 Polymethylmethacrylat-Methacrylsäuren

Copolymere in Form von Polymethylmethacrylat-Methacrylsäuren (poly methyl methacrylate-methacrylic acid, PMMA/MAA) können eine deutlich höhere Fotoempfindlichkeit erreichen als PMMA-Resiste [108],[109]. Damit sind sie für die Verwendung in mehrlagigen Resistsystemen unterschiedlicher Fotoempfindlichkeiten besonders geeignet. Das Ausgangsprodukt bei der Herstellung für PMMA/MAA ist PMMA. Diesem wird die Methacrylsäure dazugegeben, die dann in einem rein stochastisch ablaufenden Prozeß (Co-Polymerisation) in die Polymerkette eingebaut wird (vgl. Abb. 4.8).



**Abb. 4.8:** Chemische Strukturformel der Methacrylsäure, Co-Polymerisation und Sensitivierung durch Anhydridbildung.

Die Methacrylsäure (vgl. Strukturformel in Abb. 4.8) zeichnet sich durch eine funktionelle Hydroxyl- (OH-) Gruppe aus, von der durch thermische Energiezufuhr (T > 200 °C) das Wasserstoffatom herausgelöst werden kann. Unter Wasserabscheidung (Verdampfung) setzt die Bildung anhydrider Gruppen ein, wobei sich benachbarte Methacrylsäure-Reste zu größeren Molekülen verbinden. Diese Verbindungen sind für die Steigerung der Fotosensitivität bei Copolymeren verantwortlich. Bei Einsatz der Hauptkettenspaltung infolge von Belichtung verringern sie die Re-Polymerisation drastisch, so daß im Entwickler eine wesentlich erhöhte Anzahl von Kettenspaltprodukten herausgelöst werden kann.

### 4.2.2.1 Chemisch verstärkte Resiste

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein chemisch verstärkter Copolymer (ZEP 520) eingesetzt, der sich durch eine extreme Unempfindlichkeit gegenüber plasmaunterstützter Ätzprozesse bei gleichzeitig verbessertem Auflösungsvermögen auszeichnet. Abb. 4.9 zeigt prinzipiell den chemischen Aufbau dieses Resistes nach der Co-Polymerisation [82]:



Abb. 4.9: Chemischer Aufbau von ZEP-520 nach der Co-Polymerisation.

Das erhöhte Auflösungsvermögen wird hier durch die Zugabe des Chlors ( $\alpha$ -Chlormethacrylat [63],[82]) erzielt, welches die Herauslösung unbelichteten Resistes im Entwickler reduziert. Damit wird der Resist des Typs ZEP-520 für die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Entwicklerzusammensetzungen deutlich unempfindlicher (vgl. Abschn. 4.2.4.3). Der geschlossene Benzolring ist für die chemische Resistenz von ZEP-520 gegenüber Ätzprozessen verantwortlich. Der Prozeß der Co-Polymerisation im Fall von ZEP-520 entspricht prinzipiell demjenigen aus Abschn. 4.2.2.

#### 4.2.3 Polyimide

Polyimide (1·10<sup>13</sup><  $\rho / \Omega mm^2 m^{-1} < 1·10^{16}$ ) sind elektrisch isolierende Materialien und im allgemeinen unempfindlich gegenüber Strahlung eines breiten Spektrums. Zur Strukturierung ist daher standardmäßig eine zusätzliche Maskierung notwendig. Direkt strukturierbare Polyimide sind dagegen nur durch spezielle, chemische Zusätze, die die Eigenschaft der Fotoempfindlichkeit tragen, zu realisieren [110],[111]. Darüber hinaus existieren nur wenige Lösungsmittel [107]. Im Gegensatz zu den PMMA- und PMMA/MAA-Resisten handelt es sich bei Polyimiden um negativ arbeitende Fotolacke (vgl. Abschn. 4.1.1). Sie zählen ebenfalls zu der Gruppe der Polymere, doch ist ihr chemischer Aufbau wesentlich komplizierter [107]. Im Gegensatz zu PMMA und PMMA/MAA existiert überdies eine Vielzahl unterschiedlicher Zusammensetzungen, so daß an dieser Stelle für detailliertere Informationen auf die Herstellerangaben verwiesen wird [107].

Das verwendete Polyimid (vgl. Abschn. 4.2) ist für die Strukturierung mit Hilfe von UV-Licht konzipiert und besitzt das Fotoempfindlichkeitsmaximum bei einer Wellenlänge von  $\lambda$  = 365 nm (i-line) [112]. Die vom Hersteller angegebene Fotoempfindlichkeit liegt bei ca. 300 mJ/cm<sup>2</sup>. Durch den Polymercharakter des Polyimids ist daher bei einer Beschleunigungsspannung von  $U_{acc}$  = 30kV, und einer Belichtungsdosis von  $I_{exp} \ge 10 \ \mu\text{C/cm}^2$  auch der Einsatz der Elektronenstrahllithographie möglich. Polyimide werden aufgrund ihrer sehr niedrigen Permittivität sowohl zur Passivierung als auch bevorzugt für dielektrische Zwischenschichten bei Kondensatoren oder bei Leiterbahnüberkreuzungen in MMIC's eingesetzt. Sie besitzen durch die direkte Strukturierungsmöglichkeit den Vorteil, gleichzeitig Masken- und Isolationsfunktion bereitzustellen.

Negativ arbeitende Resiste sind für den Einsatz im Bereich der Elektronenstrahllithographie hervorragend zur Erzeugung von Kanten-Profilen [64] geeignet, wie sie für Leiterbahnüberführungen notwendig sind. Gemäß der Proximity-Funktion (vgl. Gl. 4.5 und Abb. 4.4) ist dieses Profil unter Ausnutzung der Rückstreueffekte d.h. durch die Einstellung der Beschleunigungsspannung sehr einfach einstellbar.

Für die Festlegung der Strukturgrößen bei den verwendeten Polyimiden ist in Übereinstimung mit der Literatur festzustellen, daß diese keine Abhängigkeit von der Entwicklungszeit aufweist [63]. Im Gegensatz dazu ist aber die Beeinflussung der resultierenden Schichtdicke während der Entwicklung in Grenzen möglich. Abb. 4.10 zeigt dieses Verhalten im Fall des Polyimids vom Typ Probimide 408. Dem Experiment lagen Belichtungen von quadratischen Flächen der Kantenlänge  $l = 50 \ \mu m zugrunde.$ 



**Abb. 4.10:** Strukturgröße und Schichtdicke in Abhängigkeit von der Entwicklungszeit im Fall des Polyimids vom Typ Probimide 408.

Als Entwickler wurde die vom Hersteller empfohlene und auf alkoholischer Basis arbeitende Lösung benutzt [107].

#### 4.2.4 Kontrastkurven

Der Kontrast  $\gamma$  eines Resistes ist ein Maß für die Schärfe des Übergangs von belichteten zu unbelichteten Bereichen nach dem Entwicklungsvorgang. Je höher der Kontrast, desto abrupter bildet sich dieser Übergang aus und desto größer wird das Auflösungsvermögen. Die experimentelle Bestimmung des Kontrastes  $\gamma$ erfolgt gleichzeitig mit Bestimmung der effektiven Fotosensitivität  $D_0$  (vgl. Abschn. 4.1.3.2).

#### 4.2.4.1 Experimentelle Bestimmung der effektiven Fotosensitivität

Die effektive Fotosensitivität  $D_0$  eines Resistes stellt eine charakteristische Belichtungsdosis dar. Sie wird in direkter Abhängigkeit des Schreibstromes  $I_{B}$ , des nominellen Elektronenstrahlquerschnitts  $A_{Spot}$  und der Zeitdauer  $t_{Spot}$  für eine Punktbelichtung zu

$$D_0 = \frac{I_{\rm B} \cdot t_{\rm spot}}{A_{\rm spot}} \tag{4.11}$$

angenähert [80]. Hierbei wird vereinfacht eine über die Fläche  $A_{\text{Spot}}$  örtlich konstante Elektronendichte angenommen. Damit wird stets ein zu hoher Wert für  $D_0$  angegeben. Für verschiedene Schreibströme  $I_B$  ist Gl. 4.11 darüber hinaus nur für den Fall gültig, daß die Änderung der Schreibstromdichte  $S_B$  bzw. des Elektronenstrahldurchmessers berücksichtigt wird. Im Rahmen der Steuerungssoftware wird zusätzlich nur ein Näherungswert für  $A_{\text{Spot}}$  in Abhängigkeit des Schreibstromes vorgegeben [78]. Die Empfindlichkeit eines Resistes hängt darüber hinaus von der Beschleunigungsspannung  $U_{\text{acc}}$  (vgl. Abschn. 4.3.1) und vom Punktbelichtungsmuster (Abstand der eizelnen Spots untereinander, vgl. Abschn. 4.3.3) ab. Damit wird deutlich, daß  $D_0$  nur als relative Größe verstanden werden darf. Bis zum Zeitpunkt dieser Arbeit existierte kein offizieller Standard für die konkrete Angabe dieser fototechnischen Größe.

Praktisch beschreibt die effektive Fotosensitivität den Wert der Belichtungsdosis  $D_0$  (clearing dose), der mindestens notwendig ist, um eine hinreichend große Fläche vollständig zu belichten. Entscheidendes Kriterium dabei ist, daß nach dem Entwicklungsvorgang keine mikroskopischen Resistresiduen -mit Ausnahme der Flächenrandgebiete- zu beobachten sind. Der Begriff "hinreichend groß" ist dabei so zu verstehen, daß die Belichtung nicht durch Proximity-Effekte (vgl. Abschn. 4.1.2.2) beinflußt wird, d.h. es darf weder Über- noch Unterbelichtung vorliegen. Um dies auszuschließen darf der Rand der belichteten Struktur bei der Beurteilung des Belichtungsergebnisses nicht berücksichtigt werden, da dort stets eine Unterbelichtung auftritt. Für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Resiste wurden daher Flächen der Größe  $A = 2500 \ \mu m^2$  herangezogen, die zur Bestimmung der effektiven Fotoempfindlichkeit mit abgestuften Intensitäten belichtet wurden. Abb. 4.11 zeigt beispielhaft das hinsichtlich der Residuen zu beurteilende Ergebnis eines Belichtungexperiments für die Bestimmung von  $D_0$ . Im Fall der Unterbelichtung (D < $D_0$ ) sind deutlich Residuen zu erkennen, die über die gesamte belichtete Fläche verteilt sind. Im Fall der optimalen Belichtung  $(D = D_0)$  sind nur noch in den Randgebieten unterbelichtete Bereiche zu finden, da dort der Intra-Proximity-Effekt deutlich verringert ist (vgl. Abschn. 4.1.2.2).



**Abb. 4.11:** REM-Aufnahmen von Strukturen ( $A = 2500 \ \mu m^2$ ) nach Belichtung und Entwicklung; a) Unterbelichtung  $D > D_0$ ; b) optimale Belichtung  $D = D_0$ .

## 4.2.4.2 Experimentelle Bestimmung des Kontrastes

Die experimentelle Bestimmung des Kontrastes basiert auf der Grundlage des im vorigen Abschnitts vorgestellten Experiments. Wird die im Entwickler abgetragene Fotolackdicke *z* in Abhängigkeit von der jeweiligen Belichtungsdosis *D* graphisch dargestellt, entsteht die für den Resist charakteristische Kontrastkurve. Abb. 4.12 zeigt die Verläufe der aufgenommenen Kontrastkurven im Fall eines Positiv- (PMMA/MAA AR-P 610.08) und eines Negativ-Resistes (Polyimid 408).



**Abb. 4.12a,b:** Kontrastkurven a) für Polyimid 408 ( $U_{acc} = 30 \text{ kV}$ ,  $I_B = 100 \text{ pA}$ ,  $t_{Spot} = 6.519 \text{ ns}$ ,  $d_{step} = 30.51 \text{ nm}$ ); b) für PMMA/MAA AR-P 610.08 ( $U_{acc} = 30 \text{ kV}$ ,  $I_B = 25 \text{ pA}$ ,  $t_{Spot} = 1.863 \text{ µs}$ ,  $d_{step} = 15.26 \text{ nm}$ ,  $T_{pre} = 210 \text{ °C}$ ).

Um die Abhängigkeit des Kontrastes  $\gamma$  von der Resistdicke *z* zu elimieren, ist *z* hierbei auf die Dicke des unbelichteten Resistes normiert (*z*<sub>n</sub>) worden. Der Kontrast  $\gamma$  ist als die maximale Steigung der Tangenten an die Kontrastkurve definiert [80]:

$$\gamma = \log \left(\frac{D_{\rm m}}{D_0}\right). \tag{4.12}$$

Dabei bezeichnen  $D_m$  und  $D_0$  die extrapolierten Werte der Belichtungsintensitäten gemäß

$$D_{\rm m} = D(z_{\rm n} = 1),$$
  
 $D_0 = D(z_{\rm n} = 0),$ 
(4.13)

für den Fall des positiv arbeitenden Resistes und

$$D_{\rm m} = D(z_{\rm n} = 0),$$
  
 $D_0 = D(z_{\rm n} = 1),$ 
(4.14)

im Fall eines Negativ-Resistes.

Entsprechend Abschn. 4.2.4.1 ergibt sich  $D_0$  aus den Kontrastkurven als denjenigen Intensitätswert D, bei dem zum ersten Mal der Wert  $z_n = 0$  für den Positiv-Resist und  $z_n = 1$  für den Negativ-Resist erreicht wird. Bei den hier exemplarisch aufgeführten Resisten sind die folgenden Fotoempfindlichkeiten bestimmt worden (vgl. Tab. 4.2), die auch den Herstellerangaben entsprechen:

 Tab. 4.2:
 Effektive Fotoempfindlichkeiten verschiedener Resisttypen

Resisttyp	$D_0 / \mu C(cm)^{-2}$	$U_{ m acc}$ / $ m kV$	<i>I</i> <sub>B</sub> / pA	d <sub>step</sub> / nm
Probimide 408	70	30	500	30.51
PMMA/MAA AR-P 610.08	115	30	500	15.26

#### 4.2.4.3 Einfluß verschiedener Entwicklerzusammensetzungen

Nach Abschn. 4.1.3.2 können die Eigenschaften des Entwicklers das Belichtungsergebnis deutlich beeinflussen. In Gl. 4.10 bedeutet ein großer Wert für *a* einen hohen Kontrast  $\gamma$  [63]. Vor dem Einsatz eines Resistes muß daher grundsätzlich die Zusammensetzung des Entwicklers im Hinblick auf die Kontrastfähigkeit geprüft werden.

Elektronenstrahlempfindliche Resiste werden in alkoholischen Lösungen entwickelt. Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Entwickler basiert auf verschiedenen Zusammensetzungen von Methylisobutylketon (MIBK) und Isopropanol (IP) [85]. Je nach Mischungsverhältnis resultieren unterschiedliche Lösungsverhalten in bezug auf belichtete und unbelichtete Resistbereiche. In Abb. 4.13 sind exemplarisch die Kontrastkurven eines PMMA-Lackes (PMMA-950k) für zwei verschiedene Entwicklerzusammensetzungen (MIBK : IP) dargestellt. Um das unterschiedliche Entwicklerverhalten deutlicher herauszustellen, wurden die Intensitätswerte auf die *clearing dose*  $D_0$  normiert und die lineare Darstellung der Intensitätsachse gewählt.



**Abb. 4.13:** Gemittelte Kontrastkurven für PMMA-950k bei verschiedenen Entwicklerzusammensetzungen  $M_1$  und  $M_2$ ;  $M_1$ : 1 MIBK : 3 IPR ;  $M_2$ : 1 MIBK : 1 IPR  $\nabla$ .

Anhand der unterschiedlichen Steigungen der Kontrastkurven in Abb. 4.13 wird deutlich, daß das Mischungsverhältnis  $M_1$  wesentlich steilere Resistflanken erwarten läßt als  $M_2$ . Durch die Zugabe von IP wird die Reaktionsgeschwindigkeit des MIBK verringert. Dabei dominiert die Verringerung des Ätzangriffs unbelichteter Resistbereiche denjenigen belichteter Bereiche. Daher stellt sich bei der Verwendung des Mischungsverhältnisses  $M_1$  im Vergleich zu  $M_2$  ein verbessertes Kontrastverhalten ein. Entsprechend ergeben sich aus der logarithmischen Darstellung der Kontrastkurven die folgenden Zahlenwerte:

$$\gamma_1 = 8.78 \ (M_1),$$
  
 $\gamma_2 = 6.02 \ (M_2).$ 

Dieses Entwicklerverhalten wird auch in der Literatur bestätigt [63],[113]. Eine weitere Erhöhung des Anteils an Isopropanol im Entwickler liefert keine deutlichere Steigerung des Kontrastes mehr [107]. Da sich dabei gleichzeitig die Entwicklungszeit nachteilig erhöht (einige Minuten), wurden diesbezüglich keine weiteren Experimente zur Optimierung der Entwickerzusammensetzung durchgeführt. Im Fall von PMMA und PMMA/MAA ist daher jeweils das Mischungsverhältnis  $M_1$  für die Entwicklerzusammensetzung eingesetzt worden. Im Fall des chemisch verstärkten Resistes ZEP-520 wurde dagegen aufgrund der reduzierten effektiven Fotoempfindlichkeit die Entwicklerzusammensetzung  $M_2$  gewählt. Für die Entwicklung von strukturierten Polymiden wurde der vom Hersteller empfohlene Entwickler auf alkoholischer Basis benutzt [107].

# 4.3 Einstellung der Belichtungsparameter

Die Wahl der Belichtungsparameter, wie Beschleunigungsspannung  $U_{acc}$ , Schreibstrom IB, Punktbelichtungsabstand dstep und Arbeitsabstand dwork hängt stets von der jeweiligen Anwendung ab. In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen dieser voreingestellten Belichtungsparameter auf ein Belichtungsergebnis anhand grundlegender Experimente erörtert. Grundsätzlich beeinflussen alle Parameter maßgeblich das erzielbare Auflösungsvermögen. Im Fall des Schreibstromes kann die Zeitdauer eines Belichtungsvorgangs in Grenzen über die einzelne Punktbelichtungzeit t<sub>Spot</sub> eingestellt werden (vgl. Kap. 2) [78]. Bei der installierten Software ist es vor allem notwendig, vor jeder Belichtung die vom eingesetzten Resist abhängige Fotosensitivität S in der Einheit 1  $\mu$ C(cm)<sup>-2</sup> anzugeben. Mit Hilfe dieses Wertes berechnet die Software bei Vorgabe einer Näherung für den Elektronenstrahldurchmesser die Punktbelichtungszeit t<sub>Spot</sub>. Um die Sensitivität S eines Resistes zu bestimmen, wird stets die Grundeinstellung zu  $D_0 = 100 \ \mu \text{Ccm}^{-2}$  bei einem vorgegebenen Schreibstrom I<sub>B</sub> als Basisgröße gewählt. Der Belichtungsversuch liefert dann in Abhängigkeit der variierten Punktbelichtungszeit tspot die auf die Basisgröße bezogene notwendige Dosis  $D_0$  (clearing dose) für die vollständige Belichtung (vgl. Abschn. 4.2.4.1).

### 4.3.1 Einfluß der Beschleunigungsspannung

Die Höhe der Beschleunigungsspannung ist ein Maß für die kinetische Energie der Elektronen (vgl. Kap. 2, Gl. 2.4). Damit ist sie auch ein Maß für die Größe der induzierten Wechselwirkung zwischen beschleunigten Elektronen und den Molekülen des Resistes. Diese wiederum bestimmt die Fotoempfindlichkeit des Resistes. Es gilt:

$$W_{\rm kin,e} = \frac{1}{2} m_{\rm e} v_{\rm e}^{\ 2} = e U_{\rm acc}$$
 (4.15)

Mit steigender Beschleunigungspannung  $U_{acc}$  nimmt die Geschwindigkeit der Elektronen  $v_e$  zu. Bei gleichzeitig konstantem Elektronenenstrom  $I_B$  bzw. konstanter Schreibstromdichte  $S_B$  bedeutet dies eine Verringerung der Elektronendichte im Resist gemäß Gl. 4.16

$$n_{\rm e} = \frac{I_{\rm B}}{A} \frac{1}{qv} = S_{\rm B} \frac{1}{qv},$$
 (4.16)

und damit eine Herabsetzung der Wahrscheinlichkeit für den Einsatz der fotochemischen Wechselwirkungsprozesse. Dies bedeutet, daß die Fotoempfindlichkeit eines EBEAM-Resistes mit steigender Beschleunigungsspannung sinkt. Gleichzeitig steigt aber der Zahlenwert für die effektive Fotoempfindlichkeit, da er die erforderliche Mindestbelichtungsdosis  $D_0$  angibt.

Zur Verifikation dieser Ausführungen zeigt Abb. 4.14 das Ergebnis einer Belichtung gemäß Abschn. 4.2.4.1, bei der die effektive Fotoempfindlichkeit  $D_0$  in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung  $U_{acc}$  untersucht wurde. Hierzu wurde ein 2-Lagen-PMMA-System (PMMA-1300k; PMMA-500k) ausgewählt, das in Kap. 5 noch ausführlich beschrieben wird. Der Schreibstrom betrug  $I_B$  = 100 pA. Es ist eine nahezu lineare Abhängigkeit zwischen  $D_0$  und  $U_{acc}$  zu beobachten (vgl. Abb. 4.14).



**Abb. 4.14:** Effektive Fotoempfindlichkeit  $D_0$  in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung  $U_{acc}$ .

Beim Übergang zu deutlich kleineren Strukturen im unteren Submikrometerbereich ist in Abhängigkeit von  $U_{acc}$  ebenfalls ein unterschiedliches Belichtungergebnis zu erwarten. Nach Gl. 4.1 wird die Vorwärtsstreuung  $\alpha$  mit steigender Beschleunigungsspannung reduziert, wohingegen die Rückwärtsstreuung in Form von  $\beta$  gemäß Gl. 4.2 zunimmt. Für das zu erwartende Resistprofil nach Belichtung und Entwicklung bedeutet dies eine deutlich ausgeprägtere Kantensteilheit bzw. ein verbessertes Auflösungsvermögen im Fall hoher Werte für  $U_{acc}$ . Dagegen ist bei niedrigen Beschleunigungsspannungen ein Verlust der Auflösung sowie ein unterschnittenes Fotolackprofil aufgrund der verstärkten rückwärtigen Belichtung zu erwarten. Das in Abb. 4.15 gezeigte Belichtungsergebnis zweier Linienstrukturen der nominellen Breite von 0.1 µm bestätigt das theoretisch vorhergesagte Verhalten.



**Abb. 4.15a,b:** REM-Aufnahmen zweier Linien-Strukturen nach Belichtung und Entwicklung;  $I_{\rm B} = 500$  pA; a)  $U_{\rm acc} = 10$  kV, D = 245 µC(cm)<sup>-2</sup>; b)  $U_{\rm acc} = 30$  kV, D = 420 µCcm<sup>-2</sup>.

Im Fall der niedrigen Beschleunigungsspannung von  $U_{acc} = 10$ kV wird der Einfluß der rückwärtigen Belichtung durch eine deutlich unterschnittene Fotolackkante sichtbar, wohingegen im Fall der 30 kV-Belichtung nahezu senkrechte Kanten erkennbar sind. Die erzielte minimale Strukturweite ist mit  $L_G \approx$ 0,2 µm in beiden Fällen vergleichbar, doch die dazu notwendige Belichtungsdosis erhöht sich für  $U_{acc} = 30$  kV um fast das Doppelte derjenigen für  $U_{acc} = 10$  kV (vgl. Abb. 4.15). Auch dies bestätigt noch einmal die Zusammenhänge aus Abb. 4.14.

Experimente mit noch höheren Beschleunigungsspannungen ( $U_{acc} = 40$  kV) machten eine nochmalige Erhöhung der Belichtungsintensitäten notwendig. Um eine einseitige Begrenzung des Prozeßfensters für die Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnden Lithographietechniken zu vermeiden, wurde daher für die meisten Prozesse  $U_{acc} = 30$  kV gewählt.

# 4.3.2 Einfluß des Schreibstromes

Um die Zeitdauer für die seriell ablaufenden Belichtungsvorgänge möglichst gering zu halten, besteht nach Gl. 4.11 die Möglichkeit, den Schreibstrom bei konstanter Intensität zu erhöhen. Damit wird die Zeit für eine Punktbelichtung herabgesetzt. Der Zusammenhang zwischen dem Schreibstrom  $I_{\rm B}$  und der Punktbelichtungszeit  $t_{\rm Spot}$  ist aber nicht linear, da sich mit Änderung von  $I_{\rm B}$  auch der Elektronenstrahldurchmesser und damit die Stromdichte  $I_{\rm B} \cdot A_{\rm spot}^{-1}$ ändert.

Führt man den Belichtungsversuch nach Abschn. 4.3.1 mit unterschiedlichen Schreibströmen  $I_{\rm B}$  für eine konstante Beschleunigungsspannung  $U_{\rm acc}$  = 30 kV durch, so kann mit Hilfe des *knife-edge-Verfahrens* [82] (vgl. Kap.2) der zugehörige Sonden- (Elektronenstrahl-) durchmesser 2 $\sigma$  ermittelt werden. Entsprechend der Literatur [63] gilt ein proportionaler Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen gemäß Gl. 4.17:

$$2\sigma \sim I_{\rm B}.$$
 (4.17)

Aufgrund der abstoßenden Wirkung der Elektronen untereinander ist mit der Erhöhung des Schreibstromes eine Zunahme des Elektronenstrahldurchmessers verbunden. Dies begrenzt das Auflösungsvermögen des REM. In Abb. 4.16 ist der Elektronenstrahldurchmesser in Abhängigkeit vom Schreibstrom dargestellt. Es zeigt sich eine deutliche Zunahme von 2 $\sigma$  bei Werten oberhalb von *I*<sub>B</sub> > 500 pA. Unterhalb dieses Schwellwertes, der für das hier eingesetzte REM charakteristisch ist, kann in guter Näherung der Sondendurchmesser mit 10 nm < 2 $\sigma$  < 20 nm angegeben werden.

Im Fall einer Änderung des Schreibstromes  $I_{\rm B}$  bei Konstanz der Belichtungsdosis D wird von der Steuerungssoftware eine lineare Änderung der Punktbelichtungszeit  $t_{\rm Spot}$  nach Gl. 4.11 durchgeführt.



**Abb. 4.16:** Sonden- bzw. (Elektronenstrahl-) durchmesser  $2\sigma$  in Abhängigkeit vom Schreibstrom  $I_{\text{B}}$ .

Diese Berechnung ist nicht korrekt, da hierbei die folgenden beiden Voraussetzungen unberücksichtigt bleiben:

- a) Der Elektronenstrahldurchmesser ist von der Stromdichte abhängig,
- b) die Stromdichte ist über den Elektronenstrahldurchmesser nicht konstant.

Nach a) muß bei der Angabe der Dosis *D* für eine Punktbelichtung zunächst zum jeweiligen Schreibstrom der zugehörige Durchmesser des Elektronenstrahls berücksichtigt werden:

$$D = \frac{I_{\rm B}}{A_{\rm Spot}} t_{\rm Spot} = \frac{I_{\rm B}}{\pi \sigma^2} t_{\rm Spot}$$
(4.18)

Zur Überprüfung von Gl. 4.18 wurde ein Belichtungsversuch durchgeführt, bei dem hinreichend große, quadratische Strukturen der Kantenlänge  $l = 50 \ \mu m$ mit unterschiedlichen Schreibströmen  $I_{\rm B}$  belichtet wurden (vgl. Abschn. 4.2.4.1). Dazu wurde ein Resist des Typs PMMA-950k eingesetzt. Für die folgenden Erläuterungen werden exemplarisch zwei verschiedene Schreibströme zugrundegelegt:  $I_{\rm B1} = 100 \ pA$ ,  $I_{\rm B2} = 500 \ pA$ .

Bei Einstellung der Schreibströme wurden die Punktbelichtungszeiten  $t_{\text{Spot1,2}}$ automatisch von der Steuerungssoftware linear nachgeführt, um das Produkt (die Intensität)  $I_{\text{B1,2}}$ · $t_{\text{Spot1,2}}$  konstant zu halten. Dabei ist zu beachten, daß hierbei der Durchmesser des Elektronenstrahls und damit die Fläche  $A_{\text{Spot}}$  als konstant vorausgesetzt wird. Demnach ergeben sich die folgenden Zahlenwerte (vgl. Tab. 4.3)

**Tab. 4.3:** Automatische, lineare Nachführung der Punktbelichtungszeiten  $t_{\text{Spot1,2}}$  für unterschiedliche Schreibströme  $I_{\text{B1,2}}$  (*Elphy*<sup>*Plus*</sup> Software [78]).

<i>I</i> <sub>B</sub> / pA	t <sub>Spot</sub> / ns
100	2330
500	466

Das Ergebnis dieses Belichtungsversuches zeigt Abb. 4.17. Hierbei wurde die zur vollständigen Belichtung der Strukturen notwendige Dosis  $D_0$  gegen den Schreibstrom  $I_B$  im Graph aufgetragen.



**Abb. 4.17:**  $D_0$  in Abhängigkeit vom Schreibstrom  $I_B$  bei linearer Anpassung der Punktbelichtungszeit  $t_{Spot}$ .

Obwohl die Fotoempfindlichkeit  $D_0$  keine Funktion des Schreibstromes ist [63], ergeben sich für verschiedene Schreibströme  $I_{\rm B}$  unterschiedliche Belichtungsdosen  $D_0$ , um identische Strukturen vollständig zu belichten. Der Grund für dieses Verhalten ist der sich mit der Erhöhung des Schreibstromes ändernde Elektronenstrahldurchmesser, was, wie bereits erwähnt, in der Software nicht berücksichtigt wird. Im Fall der Belichtung bei  $I_{\rm B2} = 500$  pA führt die gemessene Erhöhung des Elektronenstrahldurchmessers  $2\sigma$  (vgl. Abb. 4.16) zu

einer nicht linearen Erhöhung der Schreibstromdichte  $I_{B1,2}$ · $A_{spot1,2}$ -1, gemäß Gl. 4.19, Gl. 4.20 :

$$\frac{I_{\rm B1}}{\pi(\sigma_1)^2} = \frac{100 \,\mathrm{pA}}{\pi(7 \,\mathrm{nm})^2} = 64.96 \,\mathrm{Acm}^{-2},\tag{4.19}$$

$$\frac{I_{\rm B2}}{\pi(\sigma_2)^2} = \frac{500 \text{pA}}{\pi(10 \text{nm})^2} = 159.15 \text{Acm}^{-2}.$$
 (4.20)

Die von der Steuerungssoftware lineare Korrektur der Punktbelichtungszeit  $t_{\text{Spot}}$  führt damit bei Konstanz des Produktes ( $I_{\text{B}} \cdot t_{\text{Spot}}$ ) zu einem falschen Wert für die Punktbelichtungsdosen  $D_{\text{Spot}1,2}$  (vgl. Gl. 4.21, Gl. 4.22).

$$D_{\text{Spot1}} = \frac{I_{\text{B1}}}{\pi(\sigma_1)^2} t_{\text{Spot1}} = \frac{k}{\pi(\sigma_1)^2} = 151.36 \,\mu \text{Ccm}^{-2}$$
(4.21)

$$D_{\text{Spot2}} = \frac{I_{\text{B2}}}{\pi(\sigma_2)^2} t_{\text{Spot2}} = \frac{k}{\pi(\sigma_2)^2} = 74.16 \,\mu\text{Ccm}^{-2}$$
(4.22)

Im Fall der Belichtung bei  $I_{B2} = 500$  pA liegt dieser Wert deutlich unterhalb desjenigen bei  $I_{B1} = 100$  pA, so daß scheinbar eine erhöhte Belichtungsdosis  $D_0$  beim Übergang zu höheren Schreibströmen notwendig wird, wie es auch Abb. 4.17 vortäuscht.

Setzt man dagegen die Dosiswerte  $D(I_{\rm B} = 100 \text{ pA})$  und  $D(I_{\rm B} = 500 \text{ pA})$  aus Abb. 4.17 in Beziehung zu den berechneten Basiswerten  $D_{\rm Spot1,2}$  (vgl. Gl. 4.21, Gl. 4.22), so ergeben sich die absoluten Dosiswerte  $D_{0,1,2}$  gemäß Gl. 4.23, Gl. 4.24:

$$D_{0,1} = 1.15 D_{\text{Spot},1} = 174.06 \mu C \text{cm}^{-2}$$
 (4.23)

$$D_{0.2} = 1.35 D_{\text{Spot.2}} = 100.12 \mu C \text{cm}^{-2}$$
 (4.24)

Mit Hilfe dieser experimentell erhaltenen Daten und der aus Gl. 4.21 und Gl. 4.22 herleitbaren Beziehung:

$$\sigma_1 = \sigma_2 \sqrt{\frac{D_{0,2}}{D_{0,1}}}$$
(4.25)

ist es möglich, den mit Hilfe des *knife-edge* Verfahrens ermittelten Radius  $\sigma_{1,2}$  des Elektronenstrahls (vgl. Abb. 4.16) zu überprüfen. In dem diskutierten Fall ergeben sich aus Gl. 4.25 die in Tab. 4.4 eingetragenen Werte im direkten Vergleich:

	<i>Knife-edge</i> Verfahren	Fotoempfindlichkeitstest (Gl. 4.25)
$\sigma_1$ [nm]	7	7.58
σ <sub>2</sub> [nm]	10	12.16

**Tab. 4.4:**Gegenüberstellung der Zahlenwerte für den Radius des Elektronenstrahls<br/> $\sigma_{1,2}$  auf der Basis unterschiedlicher Bestimmungsverfahren (Gl. 4.25).

Wie zu erkennen ist, führen beide Verfahren zu übereinstimmenden Ergebnissen. Damit ist einerseits die Gültigkeit der Bestimmungsverfahren gezeigt. Andererseits wird offensichtlich, daß eine Korrektur der durch die Variation des Elektronenstrahldurchmessers verfälschten Dosiswerte aus Abb. 4.17 durch manuelle Nachführung der Punktbelichtungszeit gemäß Gl. 4.21 bzw. Gl. 4.22 nicht ohne weiteres möglich ist.

#### 4.3.3 Einfluß des Punktbelichtungsabstands

Um eine möglichst homogene Verteilung der Intensität über alle Elektronenspots einer Belichtung zu gewährleisten, muß der Abstand der Spots  $d_{\text{step}}$ zum jeweiligen Sondendurchmesser  $2\sigma$  angepaßt werden. Für eine genauere Betrachtung bedarf es der Berechnung des Mittelwertes der Stromdichte aus der Überlagerung der GAUß'schen Verteilungsfunktionen der Elektronenspots im Abstand  $d_{\text{step}} = \Delta x$  zueinander.



**Abb. 4.18:** Überlagerung von fünf Elektronenspots in Form der GAUß-Funktionen  $f_1(x), f_2(x)... f_5(x)$  zur Summenfunktion  $f_{\text{Summe}}(x); \Delta x = 20 \text{ nm}; 2\sigma = 10 \text{ nm}.$ 

In Abb. 4.18 ist die Überlagerung von z.B. fünf solcher Gaußfunktionen gezeigt, deren Amplituden hier der Einfachheit halber auf den Wert 1 normiert worden sind. Dabei gilt  $\Delta x = 20$  nm, bzw.  $2\sigma = 10$  nm. Die resultierende Funktion  $f_{\text{Summe}}(x)$  stellt als Einhüllende die Summe der vom Ort x abhängigen Stromdichten der Einzelfunktionen dar. Der Mittelwert  $j_{\text{m,eff}}$  bezüglich der Amplitude der Funktion  $f_{\text{Summe}}(x)$  kann dabei als arithmetischer Mittelwert für die wirksame Stromdichte einer Belichtung angesehen werden:

$$j_{\rm m,eff} = \frac{1}{x} \int_{-\Delta x/2}^{\Delta x/2} f_{\rm Summe}(x) dx. \qquad (4.26)$$

Der Mittelwert  $j_{m,eff}$  ist vom Radius des Elektronenstrahls  $\sigma$  und vom Abstand  $\Delta x$  der einzelnen Punktbelichtungen untereinander abhängig. In Abb. 4.19 ist  $j_{m,eff}$  für verschiedene Verhältnisse von  $\Delta x$  zu  $\sigma$  graphisch dargestellt:



**Abb. 4.19:** Mittelwert  $j_{m,eff}$  der Intensität in Abhängigkeit vom Verhältnis von Punktbelichtungsabstand zum Radius des Elektronenstrahls  $\Delta x \sigma^{-1}$ .

Je kleiner der Elektronenstrahldurchmesser  $2\sigma$  bei konstantem Punktbelichtungsabstand  $\Delta x$  wird, umso geringer fällt die mittlere Stromdichte  $j_{m,eff}$  aus. Mit Kenntnis dieses Sachverhaltes wird deutlich, daß der Abstand  $\Delta x$  bei Belichtungen von gleichen Strukturen nachzuführen ist, sobald bei konstanter Punktbelichtungszeit unterschiedliche Schreibströme gewählt werden. Damit wird schließlich gewährleistet, daß das Verhältnis  $\Delta x \sigma^{-1}$  und damit die mittlere Stromdichte konstant bleibt. In Tab. 4.5 sind beispielhaft die mit Hilfe von Abb. 4.16 und 4.19 ermittelten Zahlenwerte für  $\sigma$ ,  $\Delta x$  und  $j_{m,eff}$  aufgeführt, die dem Belichtungsversuch aus Abb. 4.17 zugrunde lagen (vgl. Abschn. 4.3.2).

<i>I</i> <sub>B</sub> / pA	$\sigma / nm$	$\Delta x / nm$	$\Delta x \cdot \sigma^{-1}$	<b>j</b> <sub>m,eff</sub> / <b>pA(nm)</b> <sup>-1</sup>
100	7	15.26	2.18	11.18
500	10	15.26	1.56	8.85

**Tab. 4.5:** Zahlenwerte für  $\sigma$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta x/\sigma$ ,  $j_{m,eff}$  für unterschiedliche Schreibströme  $I_{B}$ .

Für die exakte Berechnung von  $j_{m,eff}$  wurden dabei die GAUß-Funktionen der jeweiligen Stromdichten nicht mehr normiert. Die Amplituden enthalten nun die tatsächlichen Werte der zugehörigen Schreibströme  $I_{B1,2}$  bzw. die Radien des Elektronenstrahls  $\sigma_{1,2}$  gemäß Gl. 4.27:

$$f_{1,2}(x) = \frac{I_{\text{B}1,2}}{\sqrt{2\pi\sigma_{1,2}^{2}}} \exp\left(\frac{x^{2}}{\sigma_{1,2}^{2}}\right).$$
(4.27)

Im Fall des höheren Schreibstromes  $I_{B2}$  resultiert damit aufgrund des reduzierten Elektronenstrahldurchmessers auch ein geringerer, effektiver Mittelwert  $j_{m,eff}$  für die Stromdichte, was die Berechnungen aus Abschn. 4.3.2 noch einmal bestätigt.

Ein Maß für die Homogenität der Belichtung ist auch die Welligkeit des Amplitudenverlaufes der einhüllenden Summenfunktion  $f_{\text{Summe}}(x)$  (vgl. Abb. 4.18). Den Einfluß der Variation von  $\Delta x \cdot \sigma^{-1}$  diesbezüglich zeigt Abb. 4.20, wobei der Wert für  $\sigma$  konstant gehalten wurde.



**Abb. 4.20:**  $f_{\text{Summe}}(x)$  aus der Superposition fünf einzelner Elektronenspots  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$ ...  $f_5(x)$  für verschiedene Verhältnisse  $\Delta x \cdot \sigma^{-1}$ ;  $\sigma = 10$  nm = konst..

Hiernach ist der Pixelabstand  $\Delta x$  für eine homogene Belichtung besonders bei kleinen Strukturen kleiner oder gleich dem Wert für den Radius  $\sigma$  des Sondendurchmessers zu wählen,

$$\frac{\Delta x}{\sigma} \approx 1, \tag{4.28}$$

was ungefähr einer 50-prozentigen Überlappung der Elektronenspots bedeutet [63]. Bei größeren Strukturen können aufgrund der Proximity-Effekte auch Verhältnisse  $\Delta x \cdot \sigma^{-1} >> 1$ gewählt werden.

### 4.3.4 Einfluß des Arbeitsabstands

Der Arbeitsabstand  $d_{\text{work}}$  als Distanz zwischen der letzten Elektronenlinse und dem zu belichtetenden Objekt (vgl. Kap. 2) richtet sich nach der Wahl des Schreibfeldes. Je kleiner das Schreibfeld, desto geringer kann auch der Arbeitsabstand eingestellt werden, um die Ablenkwinkel für den Elektronenstrahl nicht zu groß werden zu lassen. Für die Realisierung eines großen Verstellbereiches bezüglich des Arbeitsabstandes  $d_{\text{work}}$  muß die letzte Kondensorlinse eine große Brennweite  $f_{\text{work}}$  besitzen, um das Auflösungsvermögen (*cd*) beizubehalten (vgl. Gl. 4.29).

$$cd = \frac{f_1}{d_1} \frac{f_2}{d_2} \cdots \frac{f_n}{d_n} \frac{f_{\text{work}}}{d_{\text{work}}} d_0$$
(4.29)

Hierbei bezeichnen  $f_1$ ,  $f_2$  ...  $f_n$  die Brennweiten aller Linsen im elektronenoptischen System vor der letzten Kondensorlinse mit der Brennweite  $f_{work}$  [76]. Die Größen  $d_1$ ,  $d_2$  ...  $d_n$  stellen dementsprechend die Abstände der Linsen untereinander [69] dar. Da sich beim REM die Ablenkeinheit für die Rasterung (vgl. Kap. 2) oberhalb der letzten Kondensorlinse befindet, erfolgt bei unterschiedlichen Arbeitsabständen eine bei dem hier installierten REM nicht automatisch zu kompensierende Bilddrehung (vgl. Kap. 2) [76]. Die Steuerungssoftware besitzt aber die Möglichkeit, diese Bilddrehung bei der Lithographie durch Festlegung eines zweiten relativen Koordinatensystems (vgl. Kap. 2) zu berücksichtigen.

Zur Bestimmung des optimalen Arbeitsabstandes wurde im Rahmen dieser Arbeit der Einfluß der Arbeitsabstandsänderung in bezug auf das Auflösungsvermögen untersucht [114]. Im allgemeinen gilt dabei, daß der Öffnungsfehler einer Linse in Form unterschiedlicher Brennweiten für einzelne Elektronenstrahlen bei hohen Arbeitsabständen zunimmt, und damit zu einer Verschlechterung des Auflösungsvermögens beiträgt [69],[76]. Im Gegensatz dazu zeigen die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Belichtungsversuche teilweise einen gegenläufigen Effekt. In Abb. 4.21 ist das Ergebnis einer Belichtung gezeigt, bei der Linienstrukturen der Breite 0.2  $\mu$ m mit unterschiedlichen Dosen bei drei verschiedenen Arbeitsabständen  $d_{work}$  belichtet wurden.



**Abb. 4.21:** Linienbreite in Abhängigkeit von der Belichtungsdosis für verschiedene Arbeitsabstände  $d_{work}$ .

Während bei sehr großen Abständen  $d_{work} = 28$  mm in Übereinstimmung mit Literaturdaten ein Auflösungsverlust zu beobachten ist, ist beim Übergang von  $d_{work} = 10$  mm nach  $d_{work} = 13$  mm zunächst ein verbessertes Auflösungsvermögen zu beobachten. Eine Erklärung hierfür liefert die Betrachtung des Konvergenzwinkels des Elektronenstrahls für verschiedene Arbeitsabstände.



Abb. 4.22: Konvergenzwinkel  $\phi_{work}$  in Abhängigkeit vom Arbeitsabstand  $d_{work}$ .

Bei gleicher Aperturblende müssen die Randstrahlen im Fall eines geringeren Arbeitsabstandes stärker gebeugt werden als bei größeren Abständen (vgl. Abb. 4.22). Daher stellt sich für  $d_{work} = 13$  mm ein kleinerer Konvergenzwinkel  $\phi$  ein als für  $d_{work} = 10$  mm. Da beide Zahlenwerte für  $d_{work}$  unterhalb des Öffnungsfehlers der letzten Linse liegen [76], stellt sich daher für  $d_{work} = 13$  mm ein verbessertes Auflösungsvermögen ein. Bei der Bewertung dieses Ergebnisses ist allerdings stets die manuell einzustellende Fokussierung als mögliche Fehlerquelle zu berücksichtigen.