# 3 Grundlagen der Elektronenstrahllithographie

Bei der Herstellung von monolithisch integrierten Mikrowellenschaltungen (monolithic microwave integrated circuits, MMIC) und ihrer Einzelkomponenten (passive und aktive Bauelemente) ist der Lithographie eine entscheidende Bedeutung zuzumessen. Für die im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Bauelemente und Schaltungen fand insbesondere die Elektronenstrahllithographie Anwendung. Neben einer detaillierten Beschreibung der Grundlagen dieses Lithographieverfahrens wird in diesem Kapitel auch auf Funktion und Anwendung einzelner Anlagenteile des im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten EBEAM-Systems eingegangen.

## 3.1 Stand der Lithographie in der Strukturierungstechnik

Am Anfang der Entwicklung eines jeden MMIC steht die Schaltungsidee, die mit Hilfe eines **CAD**-Systems (computer **a**ided **d**esign) in einen Datensatz umgesetzt wird. Dieser enthält die erforderlichen elektronischen Schaltungselemente in Form geometrischer Strukturen. Bereits bei diesem Entwicklungsschritt sind bestimmte Entwurfsregeln (design rules) im Hinblick auf die weitere Herstellungsmethode einzuhalten [41]. Bei der Herstellung kommen zwei verschiedene Verfahren zur Anwendung: die *indirekte* und die *direkte* Strukturierungstechnik.

### 3.1.1 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 Elektronenstrahllithographie 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  $\lambda$  des Übertragungsmediums und der zugehörigen Numerischen Apertur *NA* [63]:

$$cd = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$
, mit  $NA = n \sin \theta = D(2f)^{-1}$  (3.1)

*NA* beschreibt dabei den Öffnungswinkel der Quellenlinse mit dem Durchmesser *D* in Abhängigkeit des Brechungsindizes *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.

### 3.1.2 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 [64]. Ein Nachteil dieser Technik besteht damit 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 Verarbeitungweise. 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 [64]. Um das wellenlängenbegrenzte Auflösungsvermögen (vgl. Gl. 3.1) dabei zu erhöhen wird auch nicht sichtbares Licht im Ultraviolettbereich verwendet ( $\lambda < 250$  nm) [65]. In diesem Fall spricht man auch von der **DUV**-Belichtung (**D**eep Ultra Violett). Die zur Zeit kleinste Wellenlänge liegt im tief 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 [66].

Zu deutlich geringeren Wellenlängen ohne Verzicht auf die Maskentechnik gelangt man mit Hilfe der Röntgenstrahllithographie. Die Erzeugung paralleler Röntgenstrahlen, der sogenannten Synchrotronstrahlung, erfolgt in Teilchenlinearbeschleunigern [67]. 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 [68].

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 [69]. 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 [66],[70]. Auch wird die Rasterkraftlithographie [71] 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 Lithograhpieverfahren gibt Tabelle 2.1:

Indirekte Lithographieverfahren	direkte Lithographieverfahren
lichtoptisch ( $\lambda$ =465nm, i-line)	Elektronenstrahllithographie
Ultraviolett (UV,DUV)	Ionenstrahllithographie
Röntgenstrahllithographie	Atomstrahllithographie
hochauflösende Drucktechnik	

Tab. 3.1: Direkte und indirekte Lithographieverfahren.

Eine Sonderstellung im Bereich der indirekten Strukurierungstechnik (vgl. Tab. 3.1) nimmt das Verfahren der hochauflösenden Drucktechnik (imprint lithography) ein [72], 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 Strukturerzeugung 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 unterdrükkende Lackadhesivität 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 [73].

Stellt man die Eigenschaften der verschiedenen direkten Lithographieverfahren einander gegenüber, so empfiehlt sich die Elektronenstrahllithographie als die derzeit weitest entwickelte Technik. Darüber hinaus besitzen Elektronen im Vergleich zu den anderen Quellen mit Abstand die kleinste Wellenlänge [41]. Nach Gl. 3.1 ist daher bei der Elektronenstrahllithographie derzeit das größte Auflösungsvermögen in Abhängigkeit des Fotolackes zu erzielen [74],[75].

# 3.2 Lithographiesystem

Für die im Rahmen dieser Arbeit geleisteten Lithographieschritte steht im Fachgebiet Halbleitertechnik/Halbleitertechnologie der Gerhard-Mercator-Universität in Duisburg ein Rasterelektronenmikroskop (REM) des Typs Jeol 6600 mit externer Steuerung (Elphy System, Fa. Raith, Dortmund) zur Verfügung. Das Prinzip des Rasterelektronenmikroskopes basiert auf dem durch einen Ablenkgenerator gesteuerten Beschuß einer Probenoberfläche mit Elektronen nach dem Rasterungsprinzip [76]. Die Wechselwirkung zwischen Elektronen und Probenmaterial resultiert unter anderem in der Generation von Sekundärelektronen, die zur Bilderzeugung genutzt werden. Ein Rasterelektronenmikroskop basiert prinzipiell auf den folgenden drei Unterfunktionseinheiten:

- a) Elektronenkanone,
- b) elektronenoptisches System,
- c) Detektor- und Bildverarbeitungssystem.

Für den Einsatz als Lithographiegerät bedarf es folgender Erweiterungen:

- d) Steuerung der Ablenkspulen für die Belichtung,
- e) Ausblendeeinrichtung für den Elektronenstrahl,
- f) Rechnergestütztes CAD-System,
- g) Steuerung für das Verfahren des Probentisches.

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

## 3.2.1 Elektronenkanone

Die Elektronenkanone besteht aus der Kathode, dem Wehnelt-Zylinder und der Anode, wie in Abb. 3.1 dargestellt. Bei einem typischen Druck von circa 1 - 5·10<sup>-6</sup> mbar erfolgt der Elektronenaustritt aus der Kathode in das Vakuum nach dem Prinzip der Kathodenemmission [76]. Man unterscheidet zwischen thermischer, Schottky- (feldunterstützte, thermische Emission) und der reinen

Feldemission. Das hier zur Verfügung stehende REM besitzt eine Glühemmissionskathode (Wolfram-Haarnadelkathode) in Form eines 0,1 µm dünnen Wolframdrahtes [77]. Die mittels eines Heiztransformators (galvanisch getrennt, vgl. Abb. 3.1) zugeführte, thermische Energie ermöglicht es den Elektronen des Kathodenmaterials, die Austrittsarbeit  $\phi$  zu überwinden und den Festkörper zu verlassen. Die dabei entstehende Stromdichte *J* läßt sich mit Hilfe der RICHARDSON-DUSHMAN Gleichung (vgl. Gl. 3.2) beschreiben [69]:

$$J = A_0 T^2 \exp\left(\frac{\phi}{kT}\right) \tag{3.2}$$



Abb. 3.1: Prinzipieller Aufbau einer Elektronenkanone.

Dabei beschreibt  $A_0$  die vom Kathodenmaterial abhängige RICHARDSON-Konstante. Die Stromdichte *J* einer Wolfram-Haarnadelkathode erreicht bei eine Arbeitstemperatur von T = 2800 K (Schmelztemperatur  $T_{M,Wolfram} = 3650$ K) und einer Austrittsarbeit von  $\phi_{Wolfram} = 4,5$  eV einen Wert von circa 3 A/cm<sup>2</sup>. Für die Erzielung höherer Stromdichten, die eine wesentliche Beschleunigung des Lithographieprozesses zulassen, werden LaB<sub>6</sub>-Kathoden aus Lanthanhexaborid ( $T_{M,LaB6} = 1800 - 1900$  K,  $\phi_{LaB6} = 2,7$  eV) oder Feldemmisionskathoden verwendet.

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 daß unmittelbar hinter dem Wehnelt-Zylinder der erste Kreuzungspunkt (cross over) der Elektronen mit einem typischen Durchmesser von 20 - 50 µm (1 - 10 µm bei Feldemmissionskathoden) auftritt. Die Stromdichte *J* im Bereich des *cross over* ist örtlich nicht konstant, sondern zeigt ein GAUß'sches Profil gemäß Gl. 3.3 [69]:

$$J(r) = J_0 \exp\left[-\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right].$$
(3.3)

Hierbei bezeichnet r den Radius,  $J_0$  die maximale Stromdichte und  $r_0$  die Standardabweichung. Das GAUß'sche Profil resultiert aus dem Temperaturgradienten des Wolfram-Drahtes. Durch die Variation im Temperaturprofil werden in Abhängigkeit der Heizleistung P<sub>H</sub> 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. 3.1). Die Beschleunigungsspannung  $U_{acc}$  (accelerating voltage) dient der weiteren Fokussierung des Elektronenstrahls. Bei dem hier verwendeten REM kann  $U_{\rm acc}$  im Bereich von 0,2 kV bis 40 kV eingestellt werden [77].

#### 3.2.2 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 [69]. 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. 3.2 ist eine Prinzipskizze des Querschnitts durch die gesamte Elektronensäule des verwendeten REM dargestellt. Zusätzlich ist in Abb. 3.3 die prinzipielle Anordnung der Module zur Erweiterung zum Lithographiesystem angegeben.



Abb. 3.2: Querschnitt durch die Elektronensäule des REM JSM 6400.

Das erste Spulenpaar hinter der Anode dient zur Zentrierung des Elektronenstrahles innerhalb der Säule. Die weitere Verkleinerung des Elektronenstrahldurchmessers erfolgt nach Durchlauf durch die Kondensorlinse, mit deren Hilfe auch die Vergößerung des REM eingestellt wird. Die nachfolgende mechanische Objektivblende (50  $\mu$ m <  $NA_{mech}$  < 170  $\mu$ 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 [69]. Der Hersteller des hier verwendeten REM gibt einen minimal erreichbaren Sondendurchmesser von 3,5 nm < NA<sub>magn</sub> < 10 nm an (8 mm <  $d_{work}$  < 39 mm,  $U_{acc}$  = 35 kV) [77].



Abb. 3.3: Erweiterung des JSM-6400 um *Elphy<sup>PLUS</sup>* zum Lithographiegerät.

### 3.2.3 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 [69]. 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 (vgl. Abb. 3.2), lassen sich die SE einfach abgreifen. Dieses SE-Signal wird einem Videoverstärker zugeführt und anschließend mit Hilfe des o.g. Ablenkgenerators zur synchronen Darstellung der Probe auf einer Bildröhre genutzt. Das hier verwendete REM besitzt zusätzlich zur analogen Bilderzeugung die Möglichkeit, die Bildinformation zu digitalisieren und auf einem zweiten Monitor mit einem wesentlich verbesserten Signal-Rauschleistungsverhältnis darzustellen.

## 3.2.4 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. 3.3). Die maximale Taktfrequenz für die D/A-Wandlung beträgt 2,66 MHz, woraus sich eine minimale Belichtungszeit von 375 ns für eine Punktbelichtung ergibt [78].

## 3.2.5 Ausblendeeinrichtung 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. 3.3). Aufgrund der nur geringen notwendigen Auslenkungen wird hierzu eine Gleichspannung von 100 - 200 V benötigt [78]. 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. 3.4 auf. 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. 3.4a). Im Gegensatz dazu werden die Ein- und Austastsituationen bei der vektoriellen Belichtungsart durch eine Logik geeigneter Start- und Endpunkte der zu belichtenden Strukturen vorgegeben (Abb. 3.4b). 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. Jenachdem, 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.



Abb. 3.4: Prinzip der rasterförmigen (a) und vektoriellen (b) Strahlsteuerung.

Bei der Belichtung einer geschlossenen Struktur kann zwischen dem sogenannten Meander-Modus (MM-Modus) und dem Zeilen-Modus (LM-Modus) ausgewählt werden. Das Prinzip dieser Schreibmodi ist in Abb. 3.5 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 im Rahmen dieser Arbeit 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, daß 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. 3.3) zu einem bestimmten Teil überlagern, um eine gleichmäßige und homogene Belichtung zu gewährleisten. Hierauf wird später noch detaillierter eingegangen.



Abb. 3.5: Elektronenstrahlablenkung im Meander- (a) und Zeilenmodus (b).

## 3.2.6 Rechnergestütztes CAD-System

Mit Hilfe des rechnergestützten CAD-Systems können Entwürfe (Layouts) im GDSII-Standard [79] 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 Probentisches 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<sup>16</sup>) Pixel quantisiert erfaßt. Mit der Festlegung der Schreibfeldgröße ist somit die minimal mögliche Schrittweite für die Elektronenstrahlablenkung gemäß Gl. 3.4 festgelegt:

Schrittweite = 
$$\frac{\text{Schreibfeldkantenlänge}}{2^{16}}$$
. (3.4)

In den meisten Fällen der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Lithographieprozesse erwies sich die Festlegung eines Schreibfeldes der Kantenlänge 500 µm als ausreichend. In diesem Fall ergibt sich eine minimale Schrittweite von  $d_{\rm S} = 7,629$  nm. Um diese Schrittweite voll ausnutzen zu können, müßte im CAD-System ein Raster von  $d_{\rm R} = 1 \cdot 10^{-12}$  m einstellbar sein. Da aber in dem implementierten System ein minimales Raster von  $d_{\rm R} = 1 \cdot 10^{-9}$  m möglich ist, kann es sein, daß geometrisch identische Strukturen aber unterschiedlicher Lage im Schreibfeld in eine unterschiedliche Anzahl von Linien unterteilt werden, und daher mit unterschiedlicher Intensität belichtet werden. Dieses Problem kann nur vermieden werden, wenn gilt:

$$d_{\rm S} = n \cdot d_{\rm R}$$
  $n = \{1, 2, 3, 4, ...\}.$  (3.5)

Gl. 3.5 kann demnach erfüllt werden, wenn die Kantenlänge des Schreibfeldes einen ganzzahligen Teiler der Pixelanzahl von  $2^{16}$  annimmt. Bei einer Schreibfeldkantenlänge von 655,36 µm ergibt sich beispielsweise eine Schrittweite von  $d_{\rm S} = 10$  nm, die auch im CAD-System exakt eingestellt werden kann. Die Software bietet auch die Möglichkeit, die tatsächliche Belichtungsschrittweite als ein Vielfaches der minimalen Schrittweite zu wählen. Dies kann einerseits bei sehr empfindichen Fotoresists oder schnellen Entwicklern von Vorteil sein. Andererseits kann so die Belichtungszeit großer Flächen reduziert werden.

#### 3.2.7 Steuerung des Probentisches

Um Belichtungen von Strukturen zu ermöglichen, deren geometrische Maße entweder größer als ein eingestelltes Schreibfeld sind [80], oder die in Abständen zueinander belichtet werden sollen, die größer als eine Schreibfeldkantenlänge sind, ist es notwendig, einen rechnergestützt verfahrbaren Probentisch zu installieren. Dazu wurde das REM um einen mittels Laserinterferometrie [81] gesteuerten Tisch erweitert, dessen adressierte Endposition durch analoge, piezoelektrische Sensoren geregelt wird (vgl. Abb. 3.3). Das kleinste Inkrement, mit der die Adressierung einer definierten Position erfolgen kann, beträgt 5 nm. Der Fehler bei der tatsächlich angefahrenen Position wird über eine Fläche der Größe von 5 cm<sup>2</sup> mit ca. 100 nm beziffert. Im Experiment konnte bezüglich der Positionierung innerhalb eines Schreibfeldes von 500  $\mu$ m x 500  $\mu$ m ein Fehler von ca. 50 nm nachgewiesen werden. Hierbei wurde eine Struktur relativ zu einer bereits existierenden Marke auf der Probe belichtet, entwickelt, und anschließend der Abstand kontrolliert. Unter Berücksichtung des gesamten Lithographieprozesses ist der so extrahierte Wert damit als zu groß anzusehen.

## 3.3 Bestimmung der Auflösung des REM

Die Angabe der minimal möglichen Auflösung *cd* (vgl. Abschn. 3.1, Gl. 3.1) eines REM muß stets in Verbindung mit den folgenden Parametern erfolgen:

- a) Elektronenschreibstrom *I*<sub>B</sub>,
- b) Beschleunigungsspannung  $U_{acc}$ ,
- c) Arbeitsabstand der letzten Objektivlinse zur Probe  $d_{\text{work}}$ .

Eine genaue Analyse dieser Zusammenhänge wird noch im weiteren Verlauf dieser Arbeit durchgeführt. Für die experimentelle Bestimmung von *cd* wurden die folgenden REM-Einstellungen benutzt:

a)  $I_{\rm B} = 100$  pA (keine Angabe), b)  $U_{\rm acc} = 30$  kV (35 kV), c)  $d_{\rm work} = 16$  mm (8 - 39 mm).

Die in Klammern angegebenen Daten beziehen sich auf die Herstellerinformationen [77]. Grundlage des Experiments bildet das sogenannte *knife-edge*-Verfahren [82]. Hierbei wird der Elektronenstrahl eindimensional (Linienraster) mit einer nicht zu hohen Geschwindigkeit über eine möglichst steile Kante einer Struktur hoher Kontrastfähigkeit geführt und gleichzeitig das SE-Signal (vgl. Abschn. 3.2.3) aufgenommen. Zur eindeutigen Zuordnung der SE-Signale ist ein hoher Kontrast zwischen Kanten- und Substratmaterial notwendig. Im vorliegenden Fall wurde eine etwa 300 nm hohe Metallkante ausgewählt, die auf einer Schichtenfolge von Titan und Gold auf semiisolierendem InP-Substrat basiert. Die mathematische Formulierung dieses Experiments, die letztendlich die Bestimmung von *cd* zuläßt, erfolgt mit Hilfe des Faltungsatzes [83]. Das erhaltene SE-Signal  $f_{SE}(x)$  wird durch die Faltung (Gl. 3.8, 3.9) der Gauß'schen Energiedichteverteilungsfunktion für die Elektronen g(x) (Gl. 3.6) mit dem durch die Sprungfunktion  $\phi(x)$  (Gl. 3.7) angenäherten Verlauf für die Metallkante exakt beschrieben:

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2\right]$$
(3.6)

$$\phi(x) = \begin{cases} 1 & x \ge 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$
(3.7)

$$f_{\rm SE}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2\right] * \phi(x)$$
(3.8)

$$\Rightarrow f_{\rm SE}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x'}{\sigma}\right)^2\right) \phi(x) dx'$$
(3.9)

$$\Rightarrow f_{\rm SE}(x) = \int_{-\infty}^{x} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x'}{\sigma}\right)^2\right) dx' \qquad (3.10)$$

Abb. 3.6 gibt die graphische Deutung des Faltungsproduktes wieder [84]. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß sowohl  $\phi(x)$  als auch g(x) normiert sind. Für die numerische Bestimmung des normierten Faltungsintegrals mußte daher an dieser Stelle der Vorfaktor nach Gl. 3.6 wieder eingeführt werden. Als Standardabweichung der GAUß'schen Energiedichteverteilungsfunktion beschreibt  $\sigma$  den Wert des halben Elektronenstrahldurchmessers [69],[84], d.h. den halben Wert für die minimale Auflösung *cd* des REM. Der Zahlenwert für  $\sigma$  muß aus dem experimentell ermittelten SE-Signal  $f_{SE}(x)$  durch Rückfaltung bestimmt werden. Hierzu wird der Kurvenverlauf für  $f_{SE}(x)$  mit  $\sigma$  als Parameter solange angepaßt, bis der modellierte und gemessene Signalverlauf hinreichend übereinstimmt. Abb. 3.7 zeigt das Ergebnis für die Aufnahme des SE-Signals für zwei verschiedene Rastergeschwindigkeiten. Im Fall a) (Belichtungszeit pro Punkt  $t_{Spot} = 0.01$  ms) wird ein Wert für die Standardabweichung von  $\sigma = 14.5$  nm ermittelt. Im Fall b) dagegen konnte  $\sigma = 9$  nm bestimmt werden (Belichtungszeit pro Punkt  $t_{Spot} = 0.1$  ms).

Der Grund für die verschiedenen Ergebnisse liegt in der Dynamik des Videoverstärkers (vgl. Abschn. 3.2.3). Seine Sprungantwort [84] ist die limitierende Größe. Ein weiteres Herabsetzen der Rastergeschwindigkeit unterhalb derjenigen aus Fall b) erbrachte keine Verbesserungen mehr für  $\sigma$ . Ein Vergleich mit den Herstellerangaben (3 nm <  $\sigma$  < 10 nm) [77] zeigt eine sehr gute Übereinstimmung, obwohl die Experimente sogar mit einer niedrigeren Beschleunigungsspannung ( $U_{acc} = 30$  kV) durchgeführt wurden. Damit demonstriert dieser Versuch, daß das installierte Lithographiesystem für die Erzeugung kleinster Strukturen im Mikro- und Nanometerbereich -vorbehaltlich aller parasitärer Effekte im Fotoresist- sehr gut geeignet ist.



**Abb. 3.6:** Graphische Darstellung der Faltung zwischen der Sprungfunktion  $\phi(x)$  und der Gaußfunktion g(x) mit resultierender Funktion  $f_{SE}(x)$ .



**Abb. 3.7:** Bestimmung der Standardabweichung  $\sigma$  aus dem SE-Signal für zwei verschiedene Rastergeschwindigkeiten (a, b).