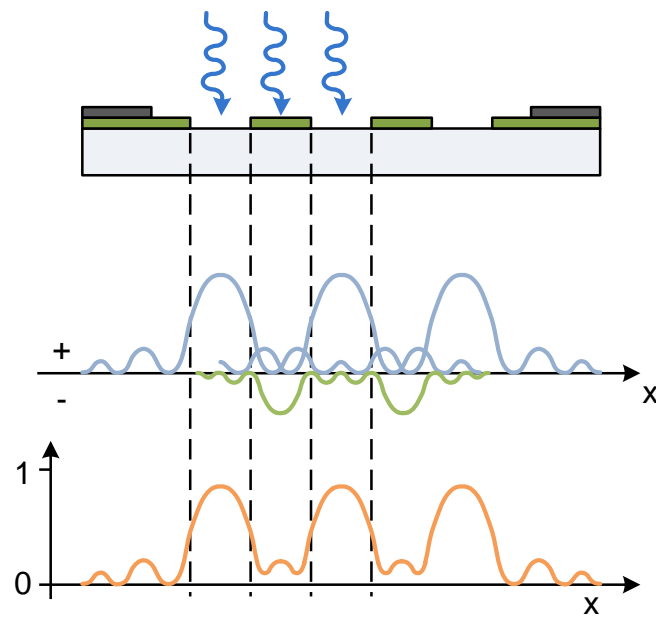


# Halbleitertechnologie

von A bis Z



## Lithografie

[www.halbleiter.org](http://www.halbleiter.org)



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>1 Lithografie</b>	<b>1</b>
1.1 Belichten und Belacken . . . . .	1
1.1.1 Übersicht . . . . .	1
1.1.2 Aufbringen eines Haftvermittlers . . . . .	1
1.1.3 Belacken . . . . .	2
1.1.4 Belichtung . . . . .	3
1.1.5 Eingesetzte Belichtungsverfahren . . . . .	5
1.2 Belichtungsverfahren . . . . .	5
1.2.1 Übersicht . . . . .	5
1.2.2 Kontaktbelichtung . . . . .	6
1.2.3 Abstandsbelichtung . . . . .	7
1.2.4 Reduzierende Projektionsbelichtung . . . . .	7
1.2.5 Elektronenstrahlithografie . . . . .	8
1.2.6 Röntgenstrahlithografie . . . . .	9
1.2.7 Weitere Verfahren . . . . .	10
1.3 Der Fotolack . . . . .	11
1.3.1 Lacktechnik . . . . .	11
1.3.2 Chemische Zusammensetzung . . . . .	12
1.4 Entwickeln und Kontrolle . . . . .	12
1.4.1 Entwickeln . . . . .	12
1.4.2 Lackkontrolle . . . . .	13
1.4.3 Lackentfernen . . . . .	14
1.5 Maskentechnik . . . . .	15
1.5.1 Maskentechnik . . . . .	15
1.5.2 Schritte bei der Maskenherstellung . . . . .	16
1.5.3 Maskentypen . . . . .	17

1.5.4 Belichtungsverfahren der nächsten Generation . . . . . 19

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Oberflächenmodifikation mit HMDS . . . . .	2
1.2	Schleuderbelackung . . . . .	3
1.3	Prinzip der optischen Fotolithografie . . . . .	3
1.4	Fehler bei der Belichtung . . . . .	4
1.5	Kontaktbelichtung . . . . .	6
1.6	Abstandsbelichtung . . . . .	7
1.7	Step-and-Repeat-Belichtung . . . . .	8
1.8	Elektronenstrahlithografie . . . . .	9
1.9	Röntgenstrahlithografie . . . . .	10
1.10	Darstellung der belichteten Lackarten nach dem Entwickeln . . . . .	13
1.11	Darstellung von Justiermarken . . . . .	14
1.12	Prinzipieller Schichtaufbau einer Chrom-on-Glass-Maske . . . . .	16
1.13	Entwickeln der Lackschicht . . . . .	16
1.14	Ätzen der Chromschicht . . . . .	16
1.15	Lackentfernen . . . . .	16
1.16	Anbringen des Pellicles . . . . .	17
1.17	Intensitätsprofil einer Chrom On Glass-Mask . . . . .	17
1.18	Intensitätsprofil einer Attenuated Phase Shift Mask, Prinzip der Phasen- schiebung . . . . .	18
1.19	Intensitätsprofil einer Alternating Phase Shift Mask . . . . .	19
1.20	Zielstruktur auf dem Wafer und entsprechende Maskenstruktur . . . . .	20

# 1 Lithografie

## 1.1 Belichten und Belacken

### 1.1.1 Übersicht

In der Halbleiterfertigung werden Strukturen auf Siliciumscheiben mittels lithografischer Verfahren hergestellt. Dabei wird zuerst ein strahlungsempfindlicher Film, meist eine Fotolackschicht, auf dem Wafer aufgebracht, strukturiert und mit Ätzverfahren in die darunter liegende Schicht übertragen.

Die Fototechnik beinhaltet dabei folgende Prozessschritte:

- Aufbringen eines Haftvermittlers und Entfernen von Wasser auf dem Wafer
- Belacken der Wafer
- Stabilisieren der Lackschicht
- Belichten
- Entwickeln des Lackes
- Aushärten des Lackes
- Kontrolle

Bei einigen Prozessen wie der Ionenimplantation, dient der Fotolack als Schutzschicht um bestimmte Bereiche auf dem Wafer von der Implantation auszuschließen. Eine Übertragung der Lackmaske durch einen Ätzprozess findet hier nicht statt.

### 1.1.2 Aufbringen eines Haftvermittlers

Zu Beginn werden die Wafer gereinigt und ausgeheizt (Pre-Bake) um anhaftende Partikel zu beseitigen und angelagertes Wasser zu entfernen. Die Oberfläche der Wafer ist

Wasser anziehend (hydrophil) und muss vor dem Aufbringen der Lackschicht hydrophob, also Wasser abstoßend und damit Lack anziehend gemacht werden. Dazu wird auf den Wafern ein Haftvermittler, meist Hexamethyldisilazan (HMDS), aufgebracht. Die Wafer werden dabei dem Dampf dieser Flüssigkeit ausgesetzt, so dass sich die Scheibenoberflächen damit benetzen.

Durch die Feuchtigkeit in der Umgebungsluft befinden sich auch nach dem Ausheizen immer Wasserstoff H oder Hydroxidionen  $\text{OH}^-$  an der Waferoberfläche. Das HMDS spaltet sich in Trimethylsiliciumgruppen  $\text{Si}-3\text{CH}_3$  auf und entfernt den Wasserstoff unter Bildung von Ammoniak  $\text{NH}_3$ .

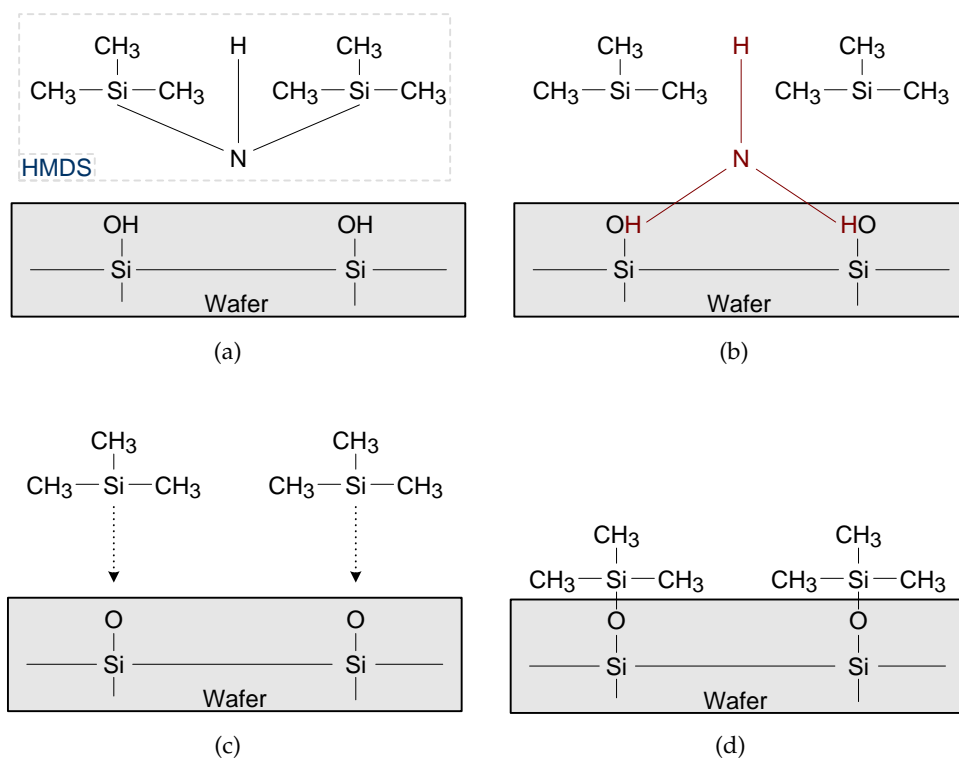


Abb. 1.1: Oberflächenmodifikation mit HMDS

### 1.1.3 Belacken

Die Belackung der Wafer erfolgt durch eine Schleuderbeschichtung auf einem drehbaren Teller mit Vakuumsaugung (Chuck). Bei niedriger Drehzahl wird Lack in der Mitte der Scheibe aufgespritzt und dann bei 2000-6000 Umdrehungen pro Minute

durch die Zentrifugalkraft zu einer homogenen Lackschicht auseinander gezogen. Deren Dicke beträgt je nach anschließendem Prozess bis zu  $2\ \mu\text{m}$ . Die Dicke hängt dabei von der Drehzahl und der Zähigkeit (Viskosität) des Lackes ab.

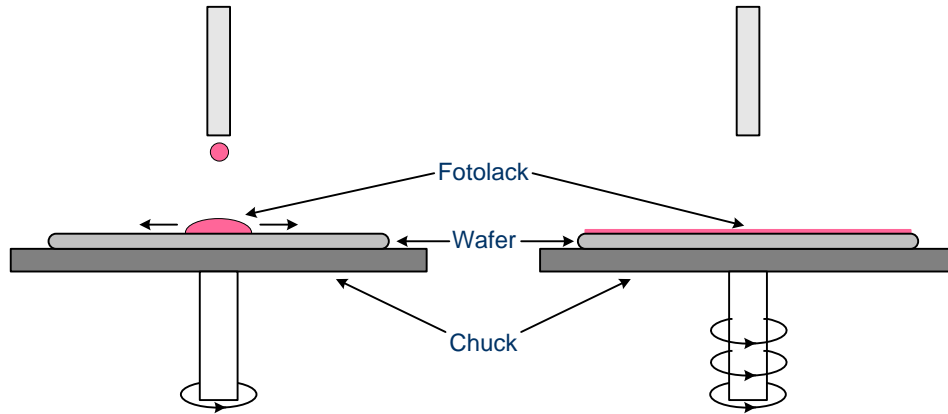


Abb. 1.2: Schleuderbelackung

Damit der Lack auf der Scheibe gleichmäßig verfließen kann enthält er Wasser und Lösungsmittel, die ihn weich machen. Zur Stabilisierung der Lackschicht wird der Wafer danach bei ca.  $100\ ^\circ\text{C}$  ausgeheizt (Post-Bake bzw. Soft-Bake). Wasser und Lösungsmittel werden teilweise verdampft, eine Restfeuchtigkeit muss für die Belichtung erhalten bleiben.

#### 1.1.4 Belichtung

In einer Belichtungsanlage befindet sich eine Glasmaske die teilweise mit Chrom beschichtet ist, dadurch werden partiell Bereiche des belackten Wafers belichtet und andere nicht.

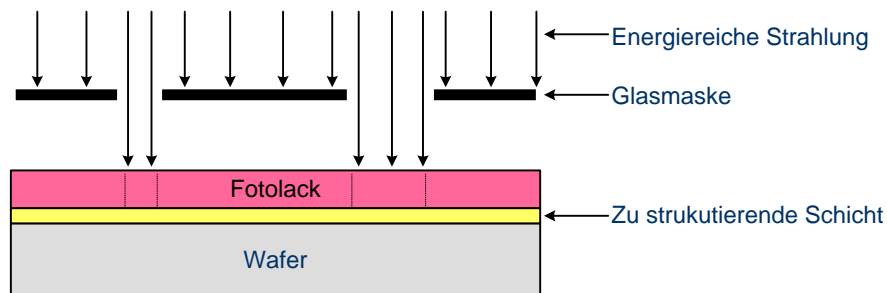


Abb. 1.3: Prinzip der optischen Fotolithografie



Je nach Art des Lackes werden belichtete Teile löslich oder unlöslich. Mit Hilfe einer Entwicklerlösung werden die löslichen Bereiche entfernt, so dass eine strukturierte Lackschicht erhalten bleibt. Bei Positivlack spaltet sich ein Stickstoffmolekül ( $N_2$ ) durch das energiereiche UV-Licht ab. Zurück bleibt ein so genanntes Keto-Karben, das sich aus energetischen Gründen zu Keten (Strukturformel  $CH_2=C=O$ ) umwandelt. Unter Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft bildet sich aus dem Keten eine Carbonsäure.

Die Belichtungszeit ist sehr wichtig damit die Strukturen die exakte Größe erhalten. Je länger die Scheibe den Strahlen der Belichtungsanlage ausgesetzt wird, desto größer werden dabei die belichteten Bereiche. Eine exakte Bestimmung der korrekten Belichtungsdauer zum Erreichen der vorgegebenen Strukturweiten mit einem oder mehreren Testwafern (Vorläufern) ist notwendig, da sich der Lack je nach Umgebungstemperatur auch unterschiedlich verhalten kann.

Bei einer Überbelichtung werden Lackstege und damit die darunter liegenden Strukturen zu klein, Kontaktlöcher werden zu groß. Bei einer zu kurzen Belichtungszeit sind die Kontaktlöcher nicht geöffnet, Leiterbahnen sind zu breit und stehen unter Umständen miteinander in Kontakt. Zudem führt eine schlechte Fokussierung zu unbelichteten Bereichen, so dass Kontaktlöcher bei der Entwicklung später nicht freigelegt werden und zwischen Leiterbahnen Verbindungen bestehen bleiben, die zu Kurzschlüssen führen.

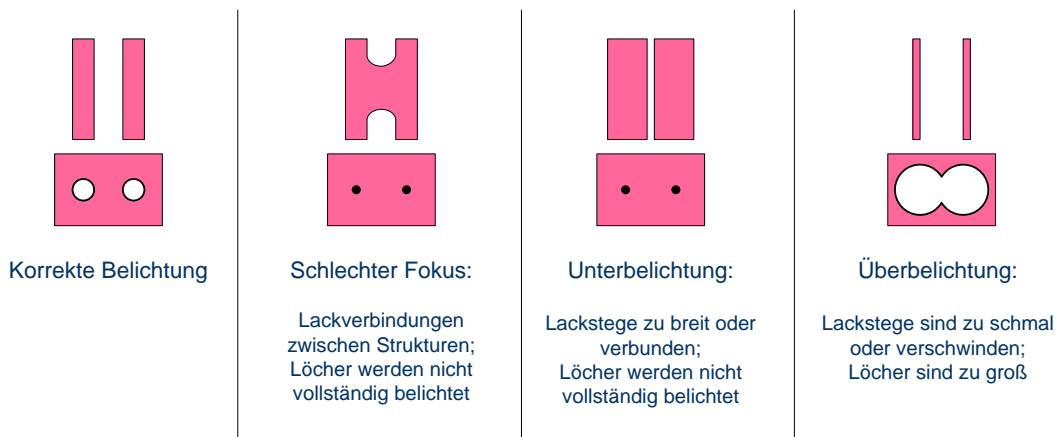


Abb. 1.4: Fehler bei der Belichtung durch falschen Fokus, Über- oder Unterbelichtung

Je nach nachfolgendem Prozess muss das Lackmaß, also die Breite der Lackstege oder der Durchmesser der Löcher angepasst werden. Bei isotropen Ätzungen (die Ätzung

geschieht sowohl in vertikaler als auch horizontaler Richtung) wird die Maskierung nicht 1:1 in die zu strukturierende Schicht übertragen.

### 1.1.5 Eingesetzte Belichtungsverfahren

Zur Belichtung werden je nach Anforderung energiereiche Strahlen wie UV-Licht, Elektronenstrahlen, Röntgenstrahlung und Ionenstrahlen eingesetzt. Dabei gilt, je kürzer die Wellenlänge der Strahlung, desto kleiner sind die erreichbaren Strukturbreiten.

Bei 120 nm Strukturen wird beispielsweise ein Argon-Fluorid-Laser eingesetzt (ArF-Laser), für kleinere Strukturen Stickstoff-Laser (Wellenlänge 155 nm) oder Extreme UV-Strahlung (EUV, Wellenlänge 13 nm). Röntgenstrahlen haben eine Wellenlänge von 0,2-0,4 nm, Elektronenschreiber ca. 0,02 nm und Ionenstrahler, im Falle von Wasserstoffionen 0,0001 nm.

Dass man mit der Wellenlänge von  $x$  nm kleinere Strukturen als  $x$  nm herstellen kann liegt daran, dass man sich spezieller Belichtungsmasken bedient, mit denen sich eine Phasenverschiebung des Lichts ausnutzen lässt. Zudem kann das Auflösungsvermögen mit Flüssigkeitsfilmen (u.a. Reinstwasser) im Linsensystem erhöht werden (Immersion). Durch diese Techniken können auch heutige Strukturen von nur mehr 45 nm nach wie vor mit einer Belichtungswellenlänge von 193 nm hergestellt werden.

Während UV-Strahlung (erzeugt durch Quecksilberdampflampen) und Gaslaser heutzutage bei der Belichtung von Wafern Anwendung finden, werden Röntgen- und Ionenstrahlen meist für Forschungszwecke eingesetzt. Elektronenstrahlschreiber werden zur Herstellung der Fotomasken verwendet.

## 1.2 Belichtungsverfahren

### 1.2.1 Übersicht

Die Fototechnik kann, je nach Art der Bestrahlung in mehrere Verfahren unterteilt werden: optische Lithografie (Fotolithografie), Elektronenstrahlithografie, Röntgenstrahlithografie und zukünftig Ionenstrahlithografie.

Bei der optischen Lithografie werden strukturierte Masken oder Reticle verwendet. Die Belichtung mit UV-Licht oder Gaslasern erfolgt entweder im Maßstab 1:1 oder

reduzierend, beispielsweise 4:1 oder 10:1.

### 1.2.2 Kontaktbelichtung

Das Kontaktbelichtungsverfahren ist das älteste angewandte Verfahren. Dabei wird die Maske direkt auf die Lackschicht gepresst, die Strukturen im Maßstab 1:1 übertragen. Auflösungsbegrenzende Streu- bzw. Beugungseffekte des Lichts treten nur an den Strukturkanten auf. Die erzielten Strukturweiten sind bei diesem Verfahren jedoch gering. Da alle Chips auf einmal belichtet werden ist der Scheibendurchsatz bei dieser Technik sehr hoch, der Aufbau der Belichtungsanlagen ist relativ einfach.

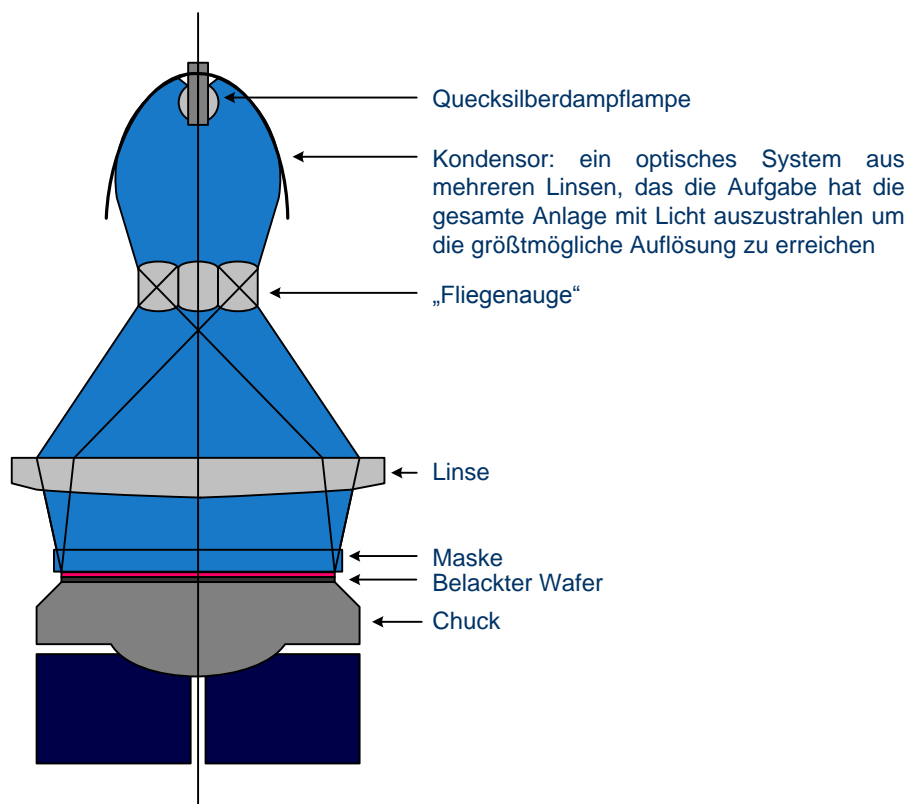


Abb. 1.5: Kontaktbelichtung

Die Nachteile liegen jedoch auf der Hand: durch die angepresste Maske auf den Lack verschmutzt diese schnell, oder kann, wie auch der Lack, dabei verkratzt werden. Befinden sich Partikel zwischen Scheibe und Maske wird die Abbildung durch den Abstand von Maske und Wafer verschlechtert.

### 1.2.3 Abstandsbelichtung

Bei der Abstands- oder Proximitybelichtung wird der Kontakt von Maske und Scheibe durch einen Abstandshalter (ca. 20  $\mu\text{m}$ ) vermieden. Dabei wird jedoch nur ein Schattenbild der Maske auf dem Wafer abgebildet, welches eine deutlich schlechtere Auflösung der Strukturen bietet.



Abb. 1.6: Abstandsbelichtung

### 1.2.4 Reduzierende Projektionsbelichtung

Bei diesem Verfahren ist die Step-and-Repeat-Technik gebräuchlich. Dabei wird ein einzelner Chip - bei geringer Größe auch mehrere - über ein Reticle auf dem Wafer abgebildet. So wird die gesamte Fläche der Scheibe Chip für Chip belichtet.

Der Vorteil bei diesem Verfahren ist, dass die auf dem Reticle abgebildeten Strukturen um den Faktor 4 oder 10 vergrößert vorliegen. Bei der verkleinerten Abbildung auf den Wafer werden neben den Strukturen auch alle Fehler, wie Partikel, verkleinert dargestellt oder fallen sogar unter die Auflösungsgrenze; die Auflösung selbst wird bei diesem Verfahren verbessert. Da für eine Ebene nicht die komplette Maske genutzt wird, können mehrere Ebenen auf einer Glasplatte aufgebracht werden, so dass die Maskenkosten gesenkt werden.

Zusätzlich kann ein Pellicle, eine dünne Folie mit Alurahmen, auf die Maske geklebt werden, wodurch Partikel von der Maske ferngehalten werden. Diese befinden sich nun außerhalb des Schärfbereichs und werden nicht abgebildet.

Daneben gibt es noch die Spiegelprojektionsbelichtung (1:1), bei der der Wafer über ein komplexes System aus Spiegeln belichtet wird. Durch die Verwendung von Spiegeln entstehen keine Farbfehler, wie sie bei Linsensystem auftreten, dazu können Ausdehnungen der Scheibe durch Temperatureinfluss in Prozessen ausgeglichen werden. Jedoch werden über Spiegelsysteme Bilder verzerrt/gekrümmt dargestellt. Durch die 1:1-Abbildung ist die Auflösung außerdem stark begrenzt.

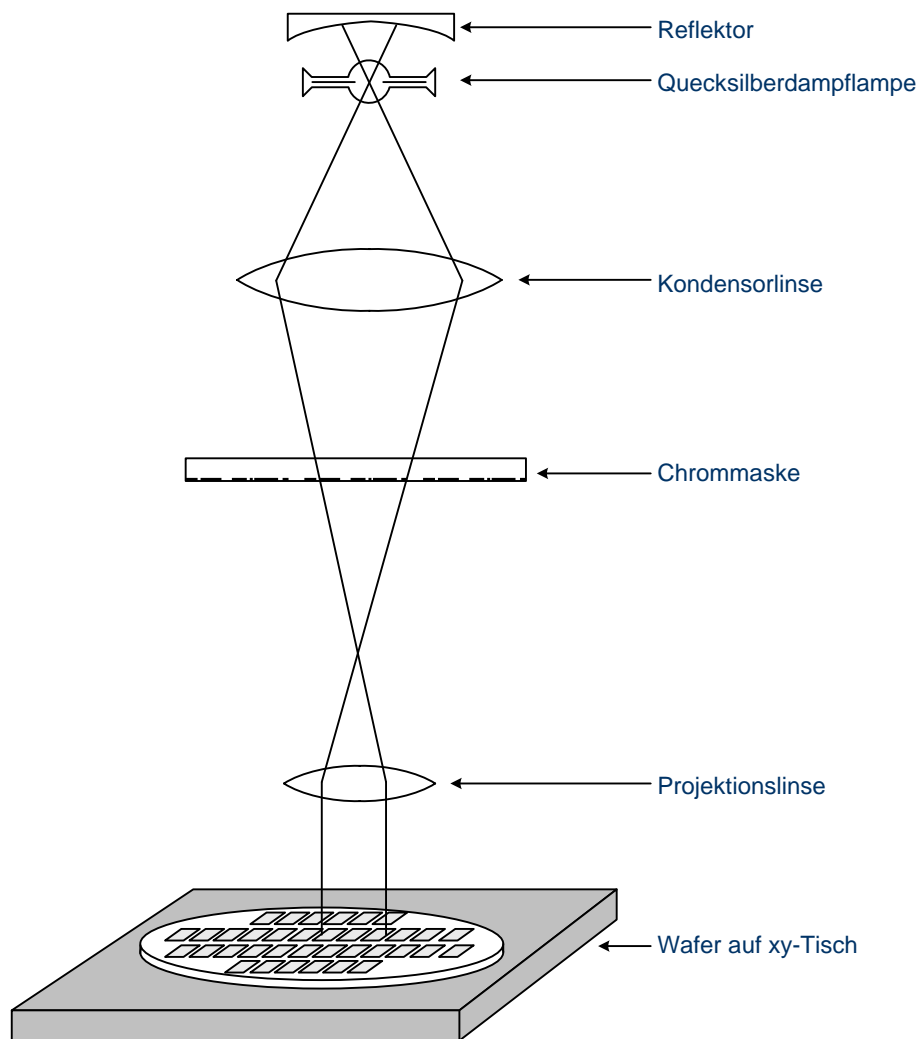


Abb. 1.7: Step-and-Repeat-Belichtung

### 1.2.5 Elektronenstrahlithografie

Wie bei der Maskenherstellung wird ein fokussierter Elektronenstrahl über den belackten Wafer gescannt. Dabei kann das Scannen zeilenweise im Raster-Scan-Verfahren oder im Vektorscanverfahren durchgeführt werden. Jedoch muss auch hier jede Struktur einzeln geschrieben werden, was sehr zeitintensiv ist. Der Vorteil ist, dass keine Masken benötigt werden, was Kosten spart. Die gesamte Apparatur befindet sich dabei im Hochvakuum.

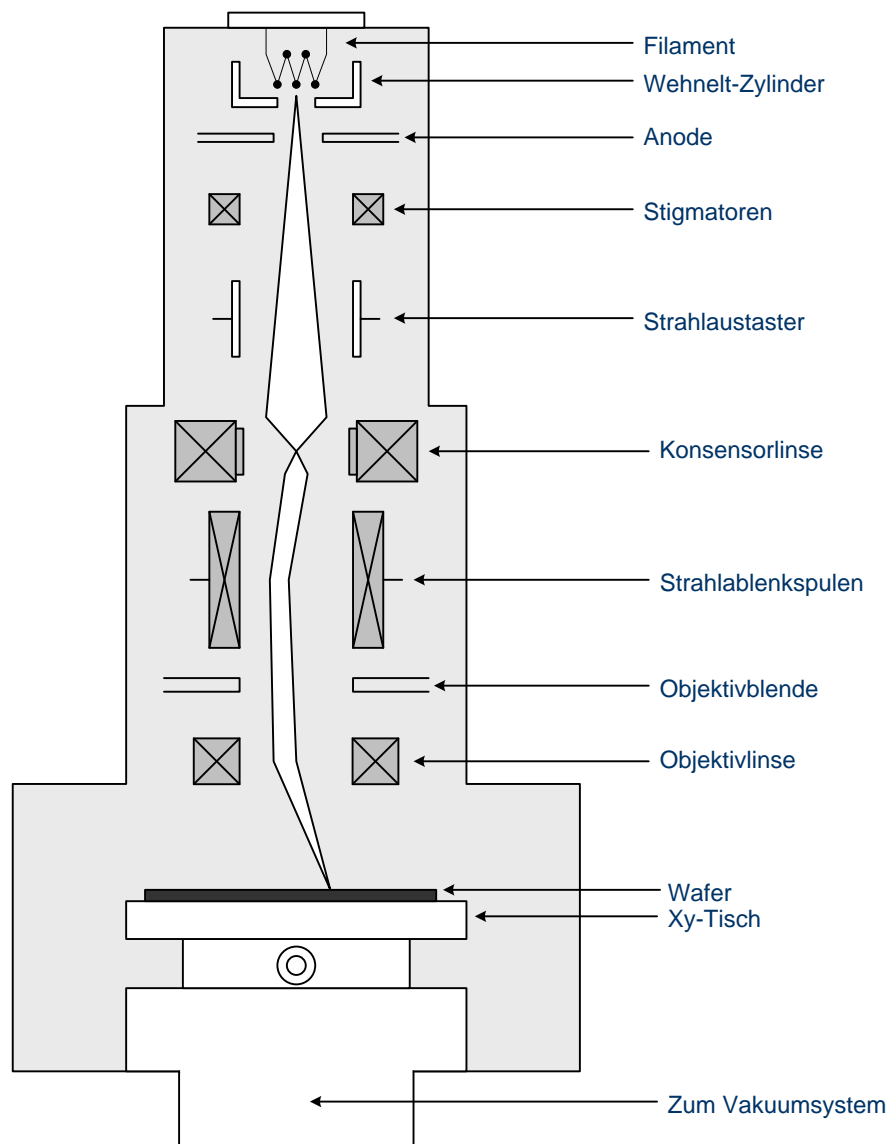


Abb. 1.8: Elektronenstrahl-Lithografie

### 1.2.6 Röntgenstrahl-Lithografie

Die Auflösungsgrenze der Röntgenstrahl-Lithografie liegt bei etwa 40 nm. Die Abbildung erfolgt im 1:1 Step-and-Repeat-Verfahren durch Schattenwurf, und wird unter Atmosphärendruck in Luft oder bei leichtem Unterdruck in Heliumatmosphäre (ca. 10.000 Pa) durchgeführt. Die Röntgenquelle kann dabei eine Plasmaquelle oder Synchrotronstrahlung sein.

Anstelle der chrombeschichteten Glasmasken werden dünne, mechanisch stabile Folien aus Beryllium, teils auch aus Silicium verwendet. Um die Röntgenstrahlung zu absorbieren werden die Folien mit schweren Elementen wie Gold beschichtet. Die Anlagen sowie die Masken sind sehr teuer.

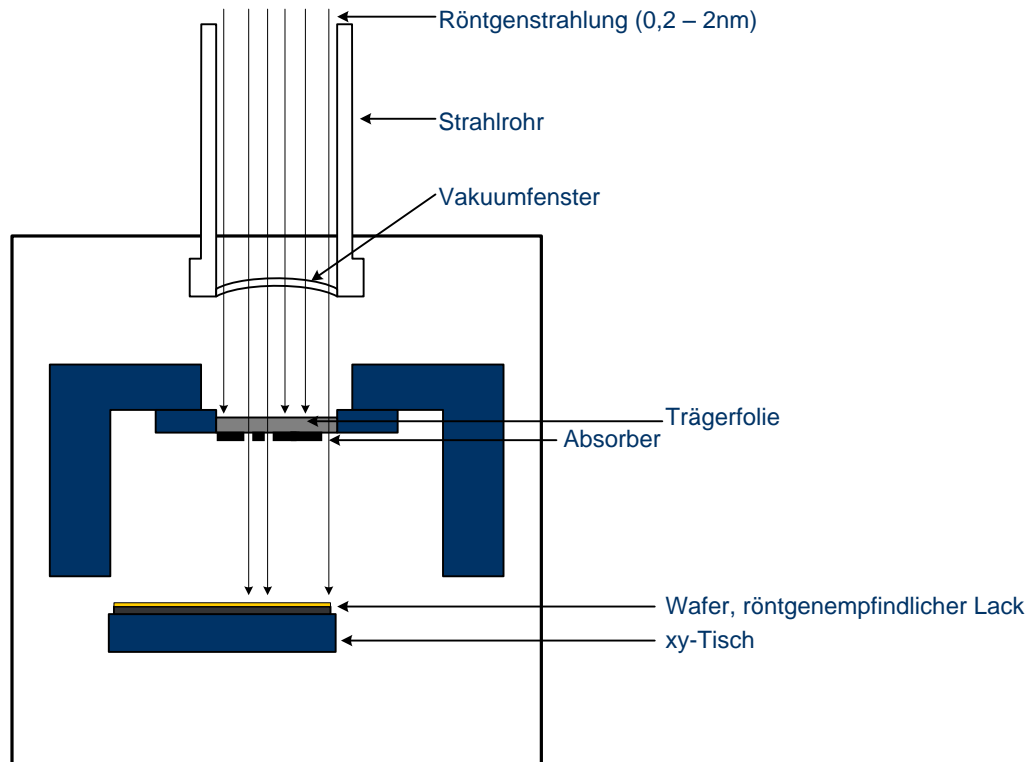


Abb. 1.9: Röntgenstrahl-Lithografie

### 1.2.7 Weitere Verfahren

Eine weitere Möglichkeit der Lithografie ist die Bestrahlung der Wafer mit Ionen. Mit den Ionen kann der Wafer sowohl über eine Maske strukturiert, als auch direkt wie bei der Elektronenstrahlmethode beschrieben werden. Im Falle von Wasserstoffionen beträgt die Wellenlänge 0,0001 nm. Mit anderen Elementen ist auch eine direkte Dotierung ohne Maskierung denkbar.

## 1.3 Der Fotolack

### 1.3.1 Lacktechnik

Es gibt Positiv- und Negativlacke, die bei unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt werden. Während beim Positivlack die belichteten Stellen löslich werden, werden bestrahlte Bereiche beim Negativlack für die Entwicklerlösung unlöslich.

Charakteristik der Positivlacke:

- + sehr gute Auflösung
- + stabil in der Entwicklerlösung
- + in Laugenlösungen entwickelbar
- nur bedingt resistent gegen Ätzung und Implantationsprozesse
- schlechte Haftung auf dem Wafer

Charakteristik der Negativlacke:

- + sehr empfindlich (exaktere Strukturierung bei der Belichtung möglich als Positivlack)
- + gute Haftung
- + resistent gegen Ätzverfahren und Implantation
- + billiger als Positivlack
- geringe Auflösung
- Xylol-Entwickler (giftig)

Zur Strukturierung der Wafer in der Fertigung werden fast ausschließlich Positivlacke verwendet. Negativlacke finden meist als Passivierungsschicht (Fotoimidschicht) Anwendung, die mittels UV-Licht ausgehärtet werden können. Sofern im Text keine Angaben zum Lack gemacht werden, handelt es sich um Positivlack; bei Negativlack wird dies ausdrücklich erwähnt.



### 1.3.2 Chemische Zusammensetzung

Fotolacke (auch als Fotoresist bezeichnet; resist = widerstehen) setzen sich aus einem Bindemittel, einem Sensibilisator und einem Lösemittel (Verdünner) zusammen.

- **Bindemittel (Anteil 20 %):** Als Bindemittel wird häufig Novolac eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein Phenolharz (Kunstharz, Kunststoff) und bestimmt in erster Linie die thermischen Eigenschaften des Lackes.
- **Sensibilisator (Anteil 10 %):** Der Sensibilisator bestimmt die Lichtempfindlichkeit des Lackes. Sensibilisatoren setzen sich aus Molekülen zusammen, die bei einer Belichtung mit energiereicher Strahlung die Löslichkeit des Lackes verändern (im Positivlack entsteht aus dem Sensibilisator durch die Belichtung Carbonsäure. Mehr dazu im Kapitel Entwickeln). Damit der Lack nicht durch das Licht in den Fertigungshallen belichtet wird, finden die Fototechnikprozesse unter Gelblicht statt, gegen das der Lack unempfindlich ist.
- **Lösemittel (Anteil 70 %):** Die Lösemittel bestimmen die Viskosität des Lackes. Durch das Verdampfen der Lösemittel auf einer Heizplatte wird der Lack stabilisiert und resistent für nachfolgende Prozesse.

Ein vom Hersteller gelieferter Lack hat eine definierte Oberflächenspannung und Dichte, einen bestimmten Feststoffgehalt und eine bestimmte Viskosität. Somit ist bei der Belackung in der Chipfertigung die erzielte Fotolackdicke ausschließlich von der Drehzahl der Belackungsanlage abhängig.

## 1.4 Entwickeln und Kontrolle

### 1.4.1 Entwickeln

Die belichteten Scheiben werden in Tauch- oder Sprühentwicklungen prozessiert. Beim Tauchätzschritt wird eine komplette Horde in einer Laugenlösung entwickelt und anschließend gespült, bei der Sprühentwicklung wird jeder Wafer einzeln bearbeitet. Wie beim Belacken befindet sich der Wafer auf einem Chuck und wird bei langsamer Umdrehung stetig mit Entwicklerlösung besprüht. Nach dem vollständigen Entwickeln des Lackes wird der Wafer mit aufgespritztem Wasser gespült um den Entwicklungsprozess zu stoppen. Einige Vorteile der Sprühentwicklung gegenüber dem Tauchver-

fahren sind folgende:

- kleinste Strukturen können freigelegt werden
- Die Entwicklerlösung wird stetig erneuert: Verunreinigungen werden verhindert
- Die Menge der eingesetzten Entwicklerlösung ist wesentlich geringer

Durch das Entwickeln lösen sich, entsprechend der Lackart, bestimmte Bereiche des Lackes, so dass am Ende eine strukturierte Scheibe bestehen bleibt. Durch die Belichtung wird im Lack eine Reaktion ausgelöst, bei der der Sensibilisator in Säure umgewandelt wird. Diese Carbonsäure wird beim Entwickeln nach folgender Gleichung mit Natronlauge (NaOH) zu wasserlöslichem Salz umgewandelt:

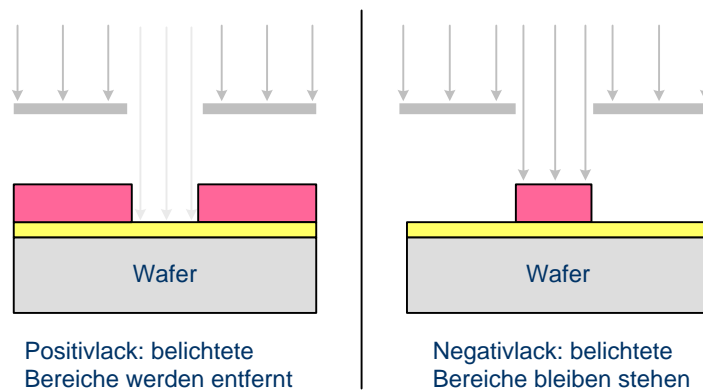
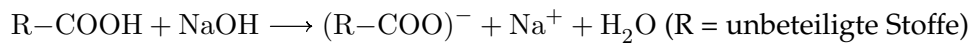


Abb. 1.10: Darstellung der belichteten Lackarten nach dem Entwickeln

Da bei Kali- oder Natronlösungen Rückstände des Entwicklers auf dem Wafer zurückbleiben, werden auch Metallionen freie Entwickler wie TMAH (Tetramethylammoniumhydroxid) eingesetzt. Durch einen erneuten Aushärteschritt (Hard-Bake) wird der Lack für nachfolgende Prozesse, wie Ätzen oder für eine Ionenimplantation, beständig gemacht.

### 1.4.2 Lackkontrolle

Nun wird die Lackstruktur kontrolliert. Unter schrägem Lichteinfall lassen sich im Mikroskop die Gleichmäßigkeit der Lackschicht, sowie schlechte Fokussierungen und

Lackanhäufungen erkennen. Sind die Lackstege zu dick oder dünn muss der Lack entfernt und der Prozess wiederholt werden. Ebenso muss die Lackstruktur zu der sich darunter befindlichen Ebene exakt justiert sein, andernfalls ist ebenso eine Wiederholung der Belackungs- und Belichtungsprozesse notwendig. Dazu gibt es unterschiedliche Justiermarken für die Justiergenauigkeit und die Linienweitenkontrolle:

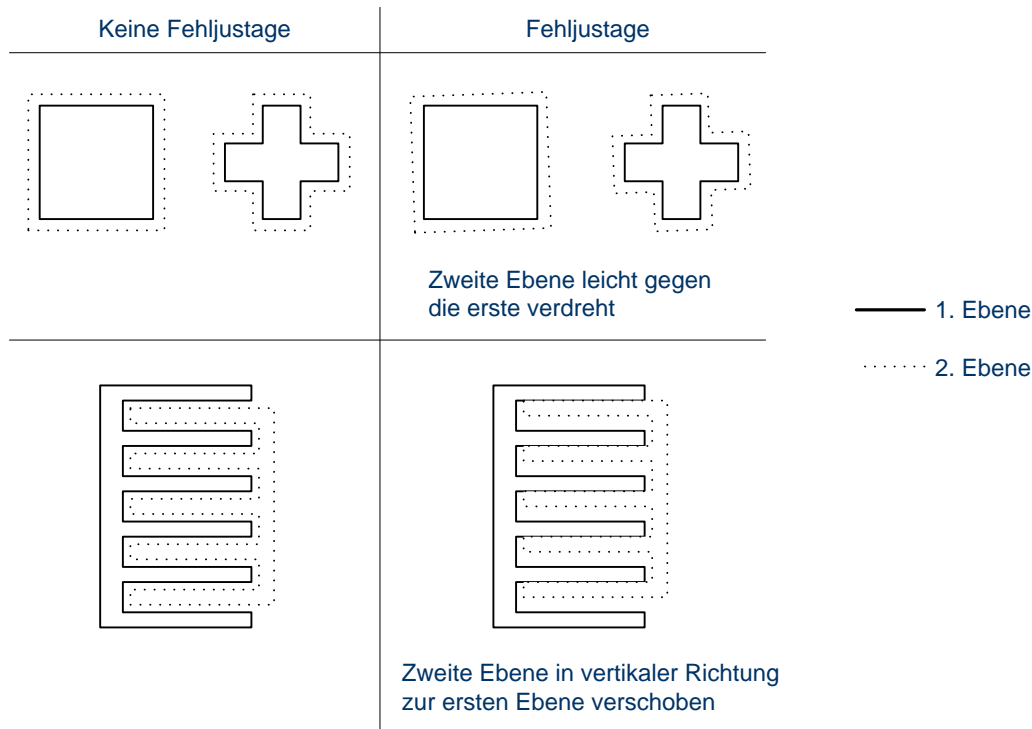


Abb. 1.11: Darstellung von Justiermarken

Die Breite der Lackstege wird mit einem Mikroskop kontrolliert: Lichtstrahlen treffen senkrecht auf den Wafer, und werden an Kanten nicht zum Objektiv zurückgestreut. So sind schwarze Linien als Strukturbegrenzungen sichtbar, mit deren Abständen zueinander man unter Zuhilfenahme der Mikroskopvergrößerung die Breite der Stege berechnen kann.

### 1.4.3 Lackentfernen

Nachdem die Struktur unter dem Lack in Ätzverfahren abgetragen wurde, oder der Lack beim Implantationsprozess als Maskierungsschicht gedient hat, muss der Lack entfernt werden. Dies geschieht mit starken Ätzlösungen (Remover), in einem Tro-

ckenätzschritt oder mit Lösungsmitteln. Als Lösungsmittel zum Entfernen der Lackschicht eignet sich Aceton, da es den Wafer und andere Schichten nicht angreift. Durch eine Ionenimplantation oder einen Trockenätzprozess kann die Lackschicht jedoch so stark ausgehärtet sein, so dass Lösungsmittel den Lack nicht mehr angreifen und entfernen können.

In diesem Fall kann der Lack mit einem Remover bei ca. 80 °C in einem Tauchverfahren entfernt werden. Hat sich der Lack während der Bearbeitung auf über 200 °C erwärmt kann er auch vom Remover nicht mehr abgetragen werden. Dann muss der Lack mittels Lackveraschung oder Lackverbrennung entfernt werden.

Unter Anwesenheit von Sauerstoff wird dabei durch Hochfrequenzanregung eine Gasentladung gezündet, so dass angeregte Sauerstoffatome entstehen. Diese verbrennen den Lack rückstandsfrei. Die geladenen Teilchen werden jedoch durch das elektrische Feld stark beschleunigt und können so einen leichten Abtrag der Scheibenoberfläche oder eine geringe Schädigung der Scheibe verursachen.

## **1.5 Maskentechnik**

### **1.5.1 Maskentechnik**

Die in der Fototechnik eingesetzten Masken enthalten ein Muster mit dem die jeweilige Schicht auf dem Wafer strukturiert wird. Ausgangsmaterial für die Masken sind Glasplatten, die ganzflächig mit Chrom und Lack beschichtet sind. Über den für Elektronenstrahlen empfindlichen Lack wird die Chromschicht strukturiert, welche dann die lichtundurchlässigen Bereiche auf der Glasmaske darstellt.

Mit einem Elektronenstrahl werden die Masken direkt beschrieben. Die gesamte Apparatur – die Elektronenstrahlquelle, Fokussier- und Ablenkeinheit und die Glasplatte – befindet sich im Hochvakuum (0,01-100 Pa; normaler Luftdruck ca. 100.000 Pa). Der Elektronenstrahl wird computergesteuert über die Maske gelenkt und belichtet den Lack. Bei dieser Methode lassen sich Strukturen bis weit unter 100 nm auflösen.

## 1.5.2 Schritte bei der Maskenherstellung

Grundsätzlich werden die Strukturen auf den Masken auf die gleiche Weise hergestellt, wie auf den Wafern. Im Gegensatz zum Belichtungsprozess in der Waferfertigung, bei dem die Strukturen der Maske durch Schattenwurf auf dem Lack abgebildet werden, werden die Masken aber mit einem Elektronenstrahl direkt beschrieben.

1. Belichten eines fotoempfindlichen Lacks zur Strukturierung einer Chromschicht auf dem Glassubstrat mittels Laser oder Elektronenstrahl

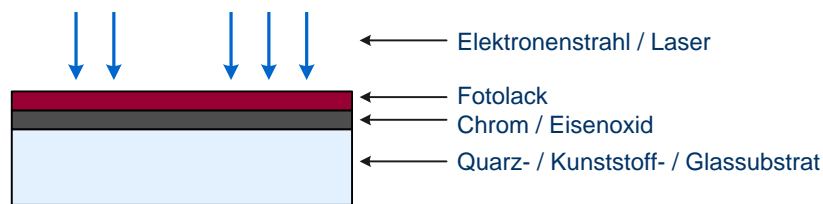


Abb. 1.12: Prinzipieller Schichtaufbau einer Chrom-on-Glass-Maske

2. Entwickeln der Lackschicht

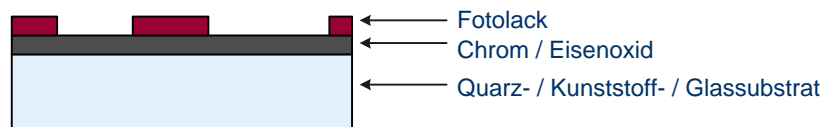


Abb. 1.13: Entwickeln der Lackschicht

3. Ätzen der Chromschicht

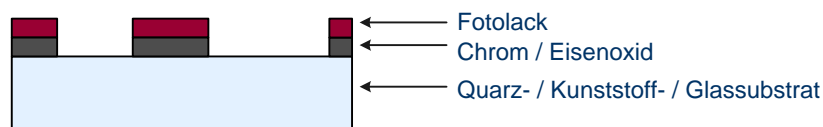


Abb. 1.14: Ätzen der Chromschicht

4. Lackentfernen

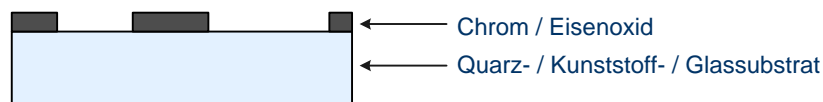


Abb. 1.15: Lackentfernen

5. Anbringen des Pellicles

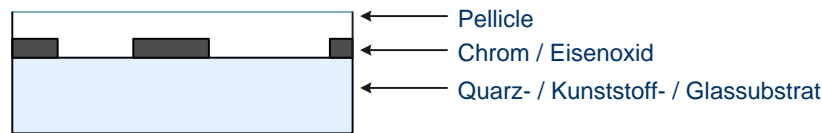


Abb. 1.16: Anbringen des Pellicles

### 1.5.3 Maskentypen

Neben der klassischen Chrommaske (COG, Chrome On Glass) gibt es noch weitere Maskentypen, die eine verbesserte Strukturauflösung ermöglichen. Hauptproblem der COG-Maske ist die Beugung, die das Licht an den Strukturkanten erfährt. Dadurch fällt das Licht nicht nur senkrecht auf den Wafer, sondern wird auch in den Schattenbereich abgelenkt, wo der Fotolack nicht belichtet werden soll.

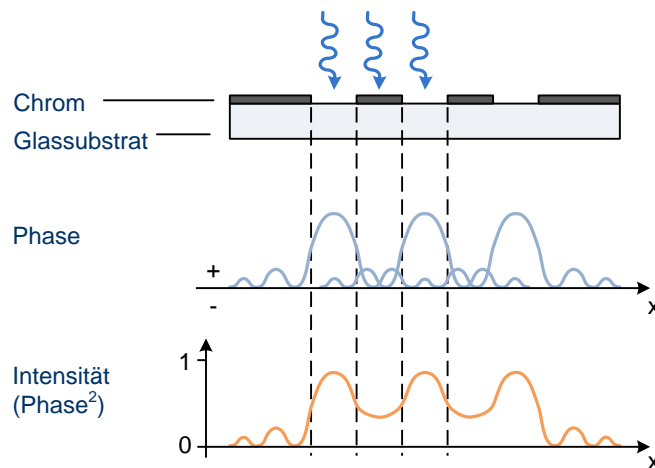


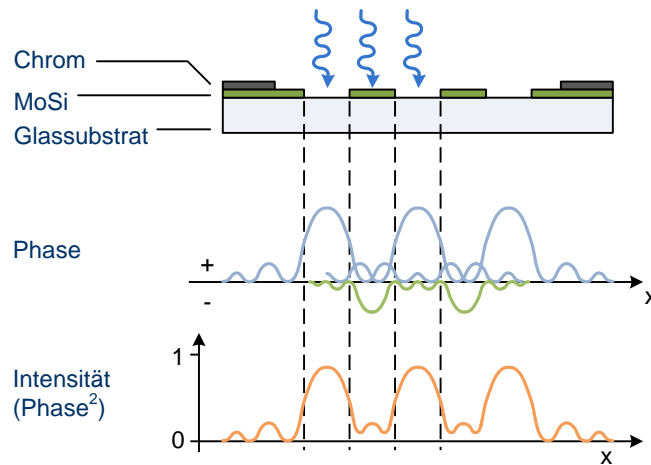
Abb. 1.17: Intensitätsprofil einer Chrom On Glass-Maske

Mit verschiedenen Maßnahmen versucht man nun, die Intensität des gebeugten Lichts zu vermindern. Diese werden im Folgenden anhand der unterschiedlichen Maskentypen näher beschrieben.

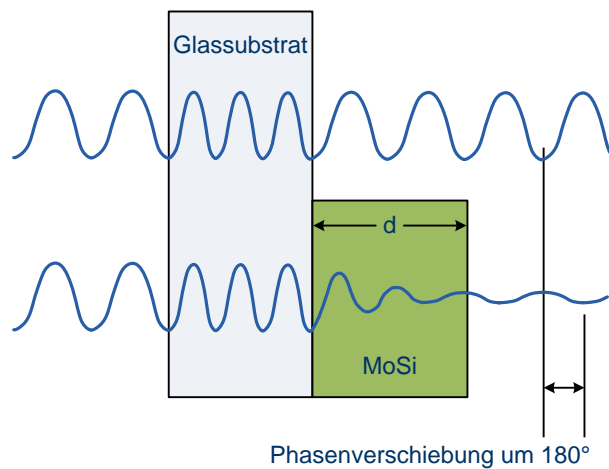
#### Attenuated Phase Shift Mask (AttPSM):

Bei der so genannten Halbtonmaske oder weichen Phasenmaske bildet eine Schicht aus Molybdänsilicid (MoSi) den strukturgebenden Teil, eine Chromschicht gibt es hier nicht. Die Dicke der MoSi-Schicht ist so gewählt, dass das Licht beim Durchgang eine Phasenverschiebung um  $180^\circ$  erfährt gegenüber dem Licht, das lediglich Glas durchläuft. Gleichzeitig ist die Schicht je nach Molybdänanteil im Silicium zu 6 % oder 18 %

lichtdurchlässig (bei einer Belichtungswellenlänge von 193 nm), das Licht wird also abgeschwächt (attenuate, engl.: vermindern). Die gegenläufigen Lichtwellen löschen sich so unterhalb der MoSi-Strukturen nahezu aus. Zusätzlich kann in Bereichen, die nicht zur Belichtung benötigt werden, Chrom aufgebracht werden, um Licht vollständig auszublenden. Diese Masken werden als Tritonemaske bezeichnet.



(a)



(b)

Abb. 1.18: (a) Intensitätsprofil einer Attenuated Phase Shift Mask, (b) Prinzip der Phasenschiebung mittels Molybdän-silicid

### Chromfreie Phasenschiebermaske:

Die chromfreien Masken besitzen keine strukturgebende Beschichtung. Die Phasen-

verschiebung wird durch Gräben erzeugt, die direkt in die Glasplatte geätzt sind. Die Herstellung dieser Masken gestaltet sich daher schwierig, da der Ätzvorgang mitten im Glas gestoppt werden muss. Im Gegensatz zu Ätzprozessen, bei denen eine Schicht vollständig durchgeätzt wird und Änderungen im Plasma Auskunft darüber geben, wann die darunterliegende Schicht freigelegt ist, erhält man hier keine Information, wann die benötigte Tiefe erreicht ist.

#### Alternating Phase Shift Mask:

Bei der alternierenden Phasenmaske werden wie bei der chromfreien Maske Gräben direkt in das Glassubstrat geätzt, jedoch abwechselnd (alternierend) mit ungeätzten Bereichen. Zusätzlich werden Stellen mit Chrom beschichtet um die Lichtintensität an entsprechenden Stellen herabzusetzen.

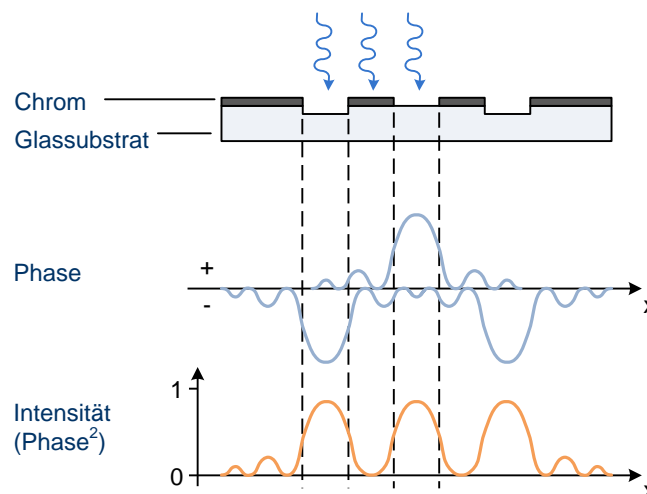


Abb. 1.19: Intensitätsprofil einer Alternating Phase Shift Mask

Dadurch ergeben sich jedoch Bereiche mit undefinierter Phasenverschiebung (Abb. 1.20), so dass bei diesem Maskentyp, der eine sehr hohe Auflösung ermöglicht, grundsätzlich zweimal belichtet werden muss. Die erste Maske enthält dabei die Strukturen die in x-Richtung verlaufen, die zweite Maske die Struktur in y-Richtung.

#### 1.5.4 Belichtungsverfahren der nächsten Generation

Zukünftig muss eine Umstellung der heute eingesetzten Anlagen und der transparenten Fotomasken erfolgen. Extreme UV-Strahlung (EUV, Wellenlänge 13,5 nm), wie sie voraussichtlich bei der nächsten Generation von Belichtungsverfahren eingesetzt wird,



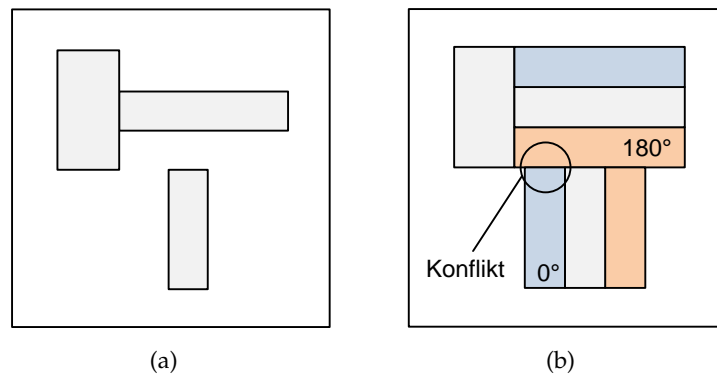


Abb. 1.20: Zielstruktur auf dem Wafer und entsprechende Maskenstruktur

wird in normaler Atmosphäre sowie vom Glassubstrat nahezu vollständig absorbiert. Aus diesem Grund müssen die Prozesse unter Vakuum stattfinden, zur Fokussierung müssen Spiegel eingesetzt werden. Die Masken werden dann anstelle von transparenten Bereichen spiegelnde Oberflächen besitzen.

Nicht zuletzt wegen des enormen technischen wie auch finanziellen Aufwands versucht man die Lithografie mit refraktiven Optiken (z.B. Linsen) und den herkömmlichen Quarzmasken so lange wie möglich am Leben zu erhalten. Belichtungsverfahren mit phasenschiebenden Fotomasken und Immersionstechniken haben die konventionelle Lithografie schon sehr weit vorangetrieben, so können Strukturen von 32 nm noch immer mit 193 nm Wellenlänge belichtet werden.

