

# Anleitung zum Praktikumsversuch “Fotolithografie”

verantwortlich: Dr. Torsten Henning, HBR 16, Raum 429, Tel. 33 191

ENTWURF, Build 42 (2009-04-02 11:08)

## 1 Motivation

Planartechnologie, insbesondere die Fotolithografie, ist die Grundlage der modernen Mikroelektronik und Mikrotechnik und damit eines bedeutenden Teils der industriellen Wertschöpfung. Wegen der Empfindlichkeit mikroelektronischer Schaltungen gegen den Einfluß von Staub während des Produktionsprozesses findet dieser in sogenannten Reinräumen (*clean rooms*) statt. In diesem Praktikumsversuch sollen Sie die Grundlagen des Arbeitens in einem Reinraum lernen und mit der Fotolithografie und der Strukturübertragung mittels additiver oder subtraktiver Methoden einige grundlegende Verfahren der Mikrotechnologie kennenlernen.

## 2 Reinraumlabor

Ein Reinraumlabor ist nach Definition in der DIN EN ISO 14644-1 ein

Raum, in dem die Konzentration luftgetragener Partikel geregelt wird, der so konstruiert und verwendet wird, daß die Anzahl der in den Raum eingeschleppten bzw. im Raum entstehenden und abgelagerten Partikel kleinstmöglich ist, und in dem andere reinheitsrelevante Parameter wie Temperatur, Feuchte und Druck nach Bedarf geregelt werden.

Je nach Anforderung und Budget baut man Reinräume in unterschiedlichen Klassen, die in der DIN EN ISO 14644-1 definiert sind. Unser Reinraumlabor besteht aus einem Raum von 23 m<sup>2</sup> der ISO-Klasse 7 und einem Raum von 18 m<sup>2</sup> der ISO-Klasse 6. In letzterem, dem wegen seiner Beleuchtung auch “Gelbraum” genannten Labor, findet die Lithografie statt. In der Praxis verwendet man immer noch die eigentlich veralteten Klassifikationen nach dem inzwischen kassierten Federal Standard 209E. Danach hat der erste Reinraum die Klasse 10 000 (nicht mehr als 10 000 Partikel von mehr als 0.5 µm Durchmesser pro Kubikfuß Luft), der Gelbraum die Klasse 1000. Beide Räume werden mit großen Mengen frischer gefilterter Luft durchspült, so daß entstehende Partikel weggetragen werden und verschmutzte Luft mit sauberer Luft verdünnt wird. Reinräume der Halbleiterindustrie mit typischen Reinheitsklassen 100, 10 oder 1 arbeiten nach einem avancierteren Belüftungskonzept (“laminar flow”), das wesentlich höheren Aufwand bei Installation und Betrieb erfordert.

Zur Vorbereitung haben Sie eine Sammlung von Regeln für das Arbeiten im Reinraum erhalten. Eine grundlegende Kenntnis dieser Regeln ist Bedingung für diesen Versuch. Sollten Ihre Antworten auf ein paar Testfragen zum Inhalt dieses Dokuments zeigen, daß sie dieses nicht verstehend gelesen haben, werden Sie von der Teilnahme am Versuch für den jeweiligen Tag ausgeschlossen.

### 3 Anmeldung

Am Praktikumstag melden Sie sich zur vereinbarten Zeit bei Dr. Torsten Henning, Raum 429, oder bei einem auf geeignete Weise benannten Stellvertreter (im folgenden: "Betreuer"). Der Betreuer überprüft den Stand Ihrer Vorbereitung und geht mit Ihnen die vorbereitenden Maßnahmen außerhalb des Reinraums und die Ankleide- und Einschleusungsprozedur durch. Außer eventuell Ihrem Lieblingskugelschreiber und, sofern vorhanden, eigenen Pinzetten dürfen Sie grundsätzlich kein Material mit in den Reinraum mitnehmen. Das benötigte Material erhalten Sie vom Betreuer.

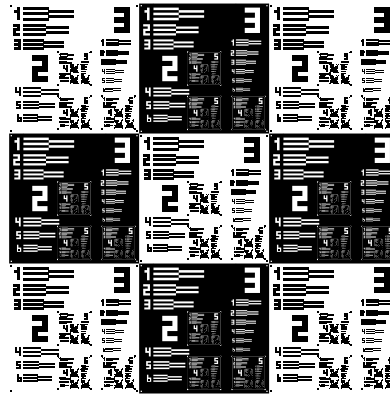
### 4 Übersicht über den Prozeß

Auf einem Siliziumwafer (Durchmesser 2 Zoll) soll mit Fotolithografie und Strukturübertragung eine Teststruktur aus Metall erstellt werden. Eine mögliche Prozeßabfolge (Variante "additive Technik") ist die folgende:

1. Belackung des Wafers mit Fotoresist
2. Prebake
3. Belichtung am Maskaligner MA 56
4. Entwicklung
5. Inspektion am optischen Mikroskop
6. Bedampfung mit Metall in einer der Aufdampfanlagen
7. lift-off in Lösungsmittel (Aceton)
8. Inspektion am optischen Mikroskop
9. ggf. Inspektion am Rasterelektronenmikroskop (führt der Betreuer durch)

### 5 Die Teststruktur

Für Auflösungstests in der Fotolithografie bieten sich sogenannte Fingerstrukturen an. Sie bieten eine reichhaltige Fülle an konvexen und konkaven Ecken und "lines and spaces", allesamt Features, an denen man einiges über seinen fotolithografischen Prozeß lernen kann. Einen Auflösungstest fährt man, indem man ein Muster mit unterschiedlichen Größenskalierungen abzubilden versucht. Die kleinste Struktur, die noch gut ausgebildet ist, definiert dann die in der jeweiligen Prozeßabfolge erreichte Auflösung. In der Fotolithografie als paralleler Technik werden alle Strukturen gleichzeitig erzeugt. Die Strukturen liegen in Form eines lichtundurchlässigen Chrommusters auf einer ansonsten durchsichtigen



TH\_20070723\_002  
 Auflösungsteststrukturen (Finger)  
 Stufung nach USAF 1951 Resolution Test Chart

Abbildung 1: Auflösungsteststrukturen auf der verwendeten Fotomaske. Schwarze Flächen sind Chrom auf der Maske. Blickrichtung ist durch die Glasscheibe auf die Chromschicht (“processed wafer view”).

Glasscheibe vor, der sogenannten Fotomaske. Abbildung 1 zeigt einen Ausdruck, bei dem schwarze Flächen auf dem Papier Chromflächen auf der Maske entsprechen.

Die Fotomaske wurde mit sogenannter Elektronenstrahlithografie aus einem computer-generierten Datensatz erzeugt. Näheres über diese Technik können Sie im Modul “Elektronenstrahlithografie und Nanostrukturierung” erfahren, das im dritten Semester des Master-Studiengangs angeboten werden wird.

Die Strukturen auf der Maske sind in nummerierte Gruppen eingeteilt und innerhalb der Gruppen von 1 bis 6 durchnummeriert (die Nummer befindet sich links von den drei Fingern). Die Linienbreiten der jeweiligen Struktur 1 in der Gruppe  $i$  beträgt  $2^{-(i+1)}$  mm. Die Maske enthält die Gruppen 2 (größte Strukturen) bis 9 (kleinste Strukturen, teilweise nicht mehr auf der Maske aufgelöst). Innerhalb jeder Gruppe ist die Struktur Nummer  $j$  gegenüber der Struktur Nummer  $(j - 1)$  um den Faktor  $\sqrt[3]{2}$  linear verkleinert. Diese Abstufung und Nomenklatur geht zurück auf das Standardtestmuster für die Auflösung von optischen Linsen nach MIL-STD-150A, das erstmals 1951 von der US Air Force entwickelt wurde (MIL-STD-150A ist inzwischen kassiert, das Testmuster erfreut sich aber noch großer Beliebtheit, und entsprechende Teststrukturen können noch im Handel bezogen werden).

## 6 Der Fotolack (Fotoresist)

Die wichtigste Eigenschaft eines Fotolacks oder (Foto-)Resists ist es, “positiv” oder “negativ” zu sein. Ein Positivresist wird an den Stellen, an denen er belichtet wird, beim Entwickeln entfernt. Dort, wo auf der Fotomaske Chrom ist, bleibt der Resist also nach

dem Entwickeln auf der Oberfläche des Substrats stehen. Negativlacke hingegen werden an den Stellen, an denen sie nicht belichtet wurden, entfernt. Die Chromflächen auf der Fotomaske werden also zu Öffnungen im entwickelten Negativresistfilm.

Die Auflösungstestmaske enthält alle Strukturen sowohl als Chromflächen als auch tonumgekehrt (invertiert) als Fenster im Chromfilm. Die Maske kann also gleichermaßen mit Positiv- und Negativresist benutzt werden. Der Betreuer gibt die Wahl des Fotoresists vor.

Der Resist wird mit Hilfe einer sogenannten Lackschleuder (*spin coater*) aufgebracht. Zentrifugalkräfte ziehen die Flüssigkeit zu einem dünnen Film auseinander, der umso dünner wird, je dünnflüssiger der Fotoresist ist und je höher die Umdrehungsgeschwindigkeit ist. Den Zusammenhang dieser Parameter entnimmt man dem Datenblatt des Fotoresistherstellers, das auch Anweisungen für die übrigen Prozessierungsparameter enthält. Eine PDF-Datei des Herstellerdatenblattes erhalten Sie am Ende des Versuchs.

Nach dem Aufschleudern des Resists wird dieser für eine kurze Zeit auf einer Wärmeplatte (*hot plate*) "gebacken". Dieser Prebake dient zum Austreiben von Lösungsmittelresten und härtet die Resistoberfläche soweit, daß sie bei der Belichtung im Maskaligner keinen Schaden nimmt und die Fotomaske nicht verschmutzt.

Vergessen Sie nicht, alle relevanten Parameter (Temperaturen, Zeiten, ...) zu protokollieren, auch wenn es sich um die Standardwerte aus dem Herstellerdatenblatt handelt.

## 7 Belichtung

Die Lichtquelle in unserem Maskaligner MA 56 ist eine Quecksilber-Hochdrucklampe. Vermeiden Sie es, in das direkte oder reflektierte Licht dieser Lampe zu sehen, da Ultraviolettlicht schädlich für die Augen ist. Das Zünden der Lampe übernimmt der Betreuer. Lassen Sie also die Finger vom Lampenvorschaltgerät. Sollte die Lampe (wider Erwarten) explodieren, verlassen Sie sofort den Reinraum, um keine Quecksilberdämpfe einzusatmen.

Der Betreuer legt die Fotomaske (ein kostbares Unikat) ein und zeigt Ihnen die Handhabung der MA 56. Eine Kurzanleitung als Gedächtnisstütze ist im reinraumlaboreigenen Wiki hinterlegt. Der Betreuer wird Ihnen die entsprechende Seite öffnen oder die einzelnen Schritte soufflieren.

Mit einem Intensitätsmeßgerät kann die Intensität der Lampenstrahlung am Ort der Probe bei zwei Wellenlängen (365 nm und 405 nm) gemessen werden. Der Betreuer wird mit Ihnen diese Messung durchführen oder Ihnen das letzte Meßergebnis mitteilen. Vergessen Sie nicht, diesen Wert neben der Belichtungszeit Ihrer Proben zu protokollieren, um die Ergebnisse langfristig vergleichbar zu machen.

## 8 Entwicklung

Nach der Belichtung werden die Proben nach Angaben auf dem Datenblatt oder nach Vorgaben des Betreuers in einer Entwicklungslösung geschwenkt, in Wasser gespült und dann mit Stickstoff trockengeblasen. Der entscheidende Parameter hier ist die Einwirkdauer des Entwicklers (und natürlich die Bezeichnung des Entwicklers).

## 9 Inspektion am Mikroskop

Unter dem Mikroskop sollten Sie nun beurteilen können, inwieweit die Lithografie gelungen ist. Das im Reinraum vorhandenen Mikroskop unterscheidet sich in der Handhabung nicht

Tabelle 1: Maßstabsbalken am optischen Mikroskop

Objektiv	Balkenlänge in Pixeln	Balkenlänge real
5×	569	500 µm
10×	455	200 µm
20×	910	200 µm
50×	569	50 µm
100×	455	20 µm

wesentlich von Schulmikroskopen (sollten Sie in der Schule wider Erwarten keinen Kontakt mit einem Mikroskop gehabt haben, lassen Sie es den Betreuer unaufgefordert wissen). Verlassen Sie das Mikroskop immer mit dem kleinsten Objektiv (5×) im Strahlengang und mit maximal heruntergestelltem Objektisch.

Mittels einer selbstgestrickten Software können und sollen Sie über die auf das Mikroskop aufgesetzte Kamera Bilder aufnehmen, die als hochauflösende JPEG-Dateien im Verzeichnis `\export\image_transfer` des angeschlossenen Rechners abgelegt werden. Der Betreuer wird mit Ihnen einen Weg finden, Ihnen diese Dateien für die Auswertung zukommen zu lassen. Beispielsweise könnten Sie einen USB-Stick mitbringen (bitte nicht zu klein bemessen, es können leicht ueber 100 MB Bilddaten anfallen), oder Sie erhalten am Ende eine CD-ROM mit den Daten.

Auf jedem Bild wird automatisch ein Maßstabsbalken angebracht. Um Ihnen das Reverse Engineering für eigene Messungen an Bildern zu ersparen, sind in Tabelle 1 für die verschiedenen Objektive die Länge des Balkens real und in Pixeln angegeben.

## 10 Bedampfung

In der Bedampfungsanlage wird ein hoher Strom (bis zu 30 A) durch ein Wolfram-Schiffchen geleitet, in dem sich Metall (z. B. Kupfer) befindet. Das Metall wird verdampft und schlägt sich auf dem zu bedampfenden Objekt nieder. Der Prozeß findet im Vakuum statt, damit keine unerwünschten Reaktionen, insbesondere keine Oxidation des Schiffchens und des Aufdampfmaterials, erfolgt. Zur Vakuumerzeugung ist der Rezipient (die Glasglocke, in der sich Schiffchen und Probe befinden) mit einer Turbopumpe verbunden. Turbopumpen können nicht von Umgebungsdruck aus mit ihrer Arbeit beginnen, deshalb wird der Rezipient zunächst mit einer mechanischen Pumpe (Vorpumpe) grobevakuuiert (*roughing*). Während des Betriebs der Turbopumpe muß der Druck an ihrem Ausgang niedrig gehalten werden, die Vorpumpe wird dazu in Reihe mit der Turbopumpe geschaltet (*backing*).

Die Dicke des aufgedampften Metalls kann in situ mit Hilfe eines Schwingquarzsysteams gemessen werden. Die Eigenfrequenz eines Schwingquarzes ändert sich näherungsweise linear mit der Schichtdicke des darauf abgeschiedenen Metalls. Bei bekannter Dichte kann die Anzeigeeinheit direkt die Schichtdicke anzeigen.

Die detaillierte Bedienung der Bedampfungsanlage ist als Kurzanleitung im reinraumlaboreigenen Wiki hinterlegt, ein aktueller Ausdruck befindet sich reinraumgerecht einlaminiert an der Anlage. Die Bedampfung führt der Betreuer durch. Die entscheidenden, zu protokollierenden Parameter sind die Reihenfolge, Art, Schichtdicke und Aufdampftrate der aufgedampften Materialien. Wenn Sie den dabei in der Kammer herrschenden Druck mitprotokollieren, kann das sicherlich nicht schaden.

## 11 Liftoff

In eine Glasschale wird etwa 8 mm hoch Aceton eingefüllt und der Wafer mit der bedampften Seite nach oben hineingelegt. Das Aceton löst den Fotor resist und führt dazu, daß das auf dem Fotor resist deponierte Metall (“überschüssiges” Metall) sich abschält. Hier gilt es, einen Kompromiß zu finden zwischen Geduld einerseits — es kann durchaus eine Viertelstunde dauern, bis das Aceton große Flächen unterwandert hat — und Prozeßsicherheit andererseits, denn zu langes Verbleiben im liftoff-Bad erhöht die Gefahr, daß abgelöste Flocken sich auf dem Substrat wieder niederschlagen und festsetzen. Eventuell sollte die Probe nach dem Ablösen der ersten größeren Metallstücke in ein sauberes Acetonbad umgebettet werden. Die Verwendung von Ultraschall kann den liftoff dramatisch beschleunigen. Zum Ende des liftoff spült man die Probe mit Aceton aus der Spritzflasche und dann mit Isopropanol aus der Spritzflasche. Dabei ist darauf zu achten, daß “naß-in-naß” gearbeitet wird, die Probe also ständig benetzt ist, da angetrocknete Metallreste kaum zu entfernen sind. Die Isopropanolspülung wird beendet, indem die Probe mit Stickstoff aus der Pistole trockengeblasen wird.

## 12 Dokumentation (“Auswertung”)

Sie haben nach Durchführung des Versuchs neben Ihren Notizen auf dem Reinraumpapier vor allem eine mehr oder weniger große Menge an Bildern vorliegen, nämlich zum einen von der mikroskopischen Inspektion des entwickelten Resists, zum anderen von der in eine dünnen Metallfilm übertragenen Struktur. In der Dokumentation sollen Sie die mit diesen Bildern gemachten Beobachtungen so kompakt wie möglich wiedergeben. Dazu gehören beispielsweise folgende Fragen:

- Welche Strukturen sind aufgrund von Haftungsproblemen oder anderer Probleme nicht vorhanden?
- Welche Strukturen sehen gut aus?
- Unterhalb welcher Strukturgröße beginnen die Strukturen nicht mehr gut auszusehen? Mit anderen Worten: welche Auflösung (als Linienbreite der kleinsten noch gut aussehenden Struktur) haben Sie erreicht?
- Welche Wirkung hatte die Variation des Parameters, der in Ihrem speziellen Versuch variiert wurde?

Vergessen Sie nicht, diese Fragen jeweils separat zu beantworten für die Bereiche, in denen die Fingerstrukturen auf der Maske aus Chrom waren (Mitte und Ecken des Neun-Felder-Quadrats), und umgekehrt (die vier Quadrate in den Mitten der Seitenkanten).

Illustrieren Sie die Beobachtungen mit möglichst aussagekräftigen **ausgewählten** Abbildungen. Die Abbildungen sollen, wie es sich in einem wissenschaftlichen Dokument gehört, durchnummeriert sein und im Text über diese Nummer referenziert werden.

Die Dokumentation ist auf geeignete digitale oder analoge Weise zu erstellen und auf Papier im Format ISO A4 abzuliefern. Nach Vereinbarung mit dem Betreuer kann dieser eventuell den Ausdruck übernehmen, in diesem Fall ist die Dokumentation als PDF-Dokument abzuliefern, hilfsweise im Open Document-Text-Format (.odt). Sofern seitens der zentralen Praktikumsleitung nichts anderes verordnet ist, werden die Protokolle auch

in leserlicher Handschrift angenommen. Bitte denken Sie an Selbstverständlichkeiten wie Datierung, Paginierung und Seitenränder (Heftrand und Rand für Korrekturen und Notizen).

### **13 Schlußbemerkung**

Die in diesem Praktikum vorgestellten Methoden sind Gegenstand des Moduls “Mikro- und Nanostrukturierung”, das im fünften Semester des Bachelor-Studiengangs angeboten wird. Versuchen Sie in Ihrer Dokumentation nicht, große Mengen Fakten aus dem Material zu dieser Vorlesung zu reproduzieren. Die Vorlesung erstreckt sich über zwei Semesterwochenstunden und behandelt trotzdem nur eine kleine Auswahl des denkbaren Stoffs.

Beschränken Sie sich auf Ihre spezielle Durchführung des Versuchs (der Betreuer wird für eine gewisse Variation von Parametern von Gruppe zu Gruppe sorgen) und dokumentieren Sie diese sorgfältig. Halten Sie die allgemeine Einleitung so kurz wie irgend möglich (maximal 15 % des Gesamtumfangs der Dokumentation).