



Methoden der Angewandten Physik

Elektronenstrahlolithografie

Inhalt

| | | |
|-----|--|---|
| 1 | Einführung | 2 |
| 2 | Grundlagen | 2 |
| 2.1 | EBL-Apparatur | 2 |
| 2.2 | EBL-Lack..... | 3 |
| 2.3 | Prozesse die die Auflösung und Strukturdefinition limitieren | 4 |
| 3 | Beschreibung der Versuchsapparatur | 5 |
| 4 | EBL-Arbeitsablauf | 6 |
| 5 | Literatur | 7 |
| 6 | Aufgabenbeschreibung | 8 |

Dr. Sven Rodt, Prof. Dr. Stephan Reitzenstein

Institut für Festkörperphysik
Sekt. EW 5-3
Hardenbergstraße 36
10623 Berlin

1 Einführung

Lithografische Verfahren stellen den de facto Standard zur Strukturierung von Halbleiterbauelementen dar [1]. Dabei kommen unterschiedliche Verfahren wie optische Lithografie, Elektronenstrahlolithografie (engl. electron beam lithography, EBL) und Imprint-Lithografie zum Einsatz. Neben der hohen räumlichen Auflösung bietet die EBL noch zwei weitere Vorteile: Die Lithografie-Muster basieren nicht auf starren Projektionsmasken sondern können flexibel definiert werden und die meist integrierte Funktionalität eines Rasterelektronenmikroskops (REMs) bietet eine komfortable Bildgebung und Navigation auf der Probe. Ein direktes Beispiel hierfür ist das Gruppenlogo der AG Reitzenstein, das oben rechts auf der Titelseite abgedruckt ist. Dieses wurde mittels EBL geschrieben und hinterher mittels der REM-Funktionalität bildlich aufgenommen.

2 Grundlagen

2.1 EBL-Apparatur

Das Kernstück einer EBL Apparatur bildet eine möglichst hoch qualitative Elektronensäule zur verzerrungsfreien Abbildung und dem Erreichen möglichst hoher Ortsauflösung bzw. kleinster EBL Strukturen. Die Funktionsweise ist analog zu der eines klassischen REMs weswegen an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen, sondern auf den REM Versuch verwiesen wird.

Neben dem klassischen Säulen-Aufbau wie in Abb. 1 gezeigt kommen auch fortschrittliche Konzepte wie der Gemini-Aufbau von Zeiss [2] zum Einsatz.

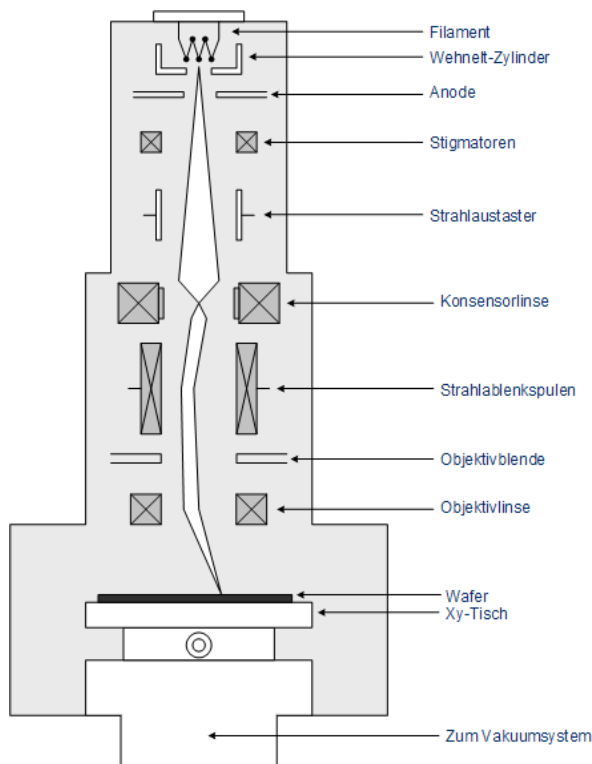


Abbildung 1: Aufbau einer klassischen Elektronensäule mit Probenkammer und -Tisch zum Einsatz in einem EBL System [3]. Durch die Ergänzung um einen Sekundärelektronendetektor (nicht dargestellt) können Sekundärelektronenbilder der Probe aufgenommen werden wodurch eine einfache Navigation möglich ist. Idealerweise verfügt der Probenstisch über eine hoch präzise x/y Verfahrensweise. Die Steuerung des kompletten Systems erfolgt heutzutage vollständige Rechner-gesteuert.

Eine besonders wichtige Komponente, die für einen reinen REM Betrieb nicht notwendig ist, ist der Strahlaustaster (engl. beam blaker). Bei ihm handelt es sich im einfachsten Fall um zwei parallele Platten an die eine Spannung (typischerweise einige hundert Volt) angelegt werden kann, um den Strahl seitlich abzulenken und am Durchtreten der Aperturblende (im Bereich der Strahltaile zwischen den

Polschuhen der Kondensorlinse) zu hindern. EBL-Strahlaustaster haben eine typische Schaltzeit im Bereich einiger 10 ns. So wird erreicht, dass der Strahl nur dort durchgelassen wird wo er die Probe treffen darf bzw. den Lack belichten soll (siehe Abb. 2). Nur mit einer solchen Lösung lässt sich auch die Elektronendosis an einem Belichtungspunkt präzise einstellen, die typischerweise in C/cm^2 angegeben wird.

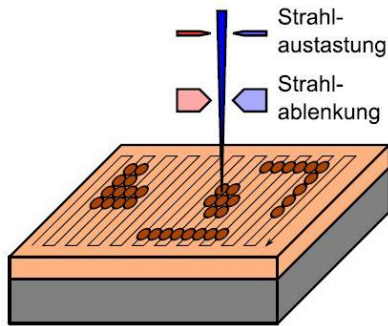


Abbildung 2: Die Strahlaustastung ermöglicht es, dass nur in bestimmten Bereichen eine Elektronendosis eingebracht wird – selbst wenn der Elektronenstrahl wie in diesem Beispiel einen größeren Bereich abstrahlt. Gleichzeitig lässt sich über die Dauer der ‚on‘ Zeit die eingebrachte Dosis exakt steuern. (entnommen aus Gschrey, M. (2015): Doktorarbeit, TU Berlin)

2.2 EBL-Lack

Eine weitere zentrale Komponente ist der Lithografie-Lack. Er muss effektiv mit den Elektronen wechselwirken und eine möglichst große Auflösung, d.h. möglichst kleine Strukturgrößen ermöglichen. Hier gibt es inzwischen eine Vielzahl an Lacken die im Allgemeinen auf eine Polymerbasis aufbauen. Klassifiziert werden die Lacke als Positiv-, Negativ- oder Umkehrlack – je nachdem wie sich ihr Löslichkeitszustand im Entwickler durch den Energieeintrag der Elektronen verändert. Dies ist schematisch in Abb. 3 dargestellt. Nach erfolgter Lithografie können die Strukturen im Lack durch Ätzverfahren in die Probe übertragen werden (rechter Teil in Abb. 3)

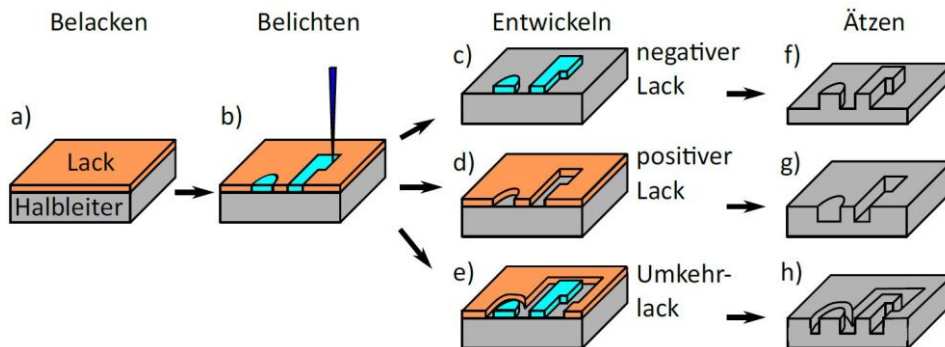


Abbildung 3: Schematische Strukturierung einer Halbleiterprobe mittels EBL im Falle der drei Lackklassen. a) Ausgangspunkt ist eine belackte Probe. b) Durch den Energieeintrag mittels der Elektronen wird das chemische Gefüge des Lackes verändert. Beim Negativlack (c) bleiben die belichteten Bereiche nach dem Entwickeln stehen, beim Positivlack (d) werden sie herausgelöst und beim Umkehrlack (e) findet für kleinen Energieeintrag zuerst ein positiver Prozess statt der sich bei weiterem Energieeintrag in einen negativen wandelt. Die skizzierten positiv-Bereiche gehen hierbei auf den Proximity-Effekt zurück. Die Bilder f-h veranschaulichen den entsprechenden Strukturübertrag infolge eines Ätz-Schrittes. (adaptiert aus Gschrey, M. (2015): Doktorarbeit, TU Berlin)

Mit den zeitgemäßen EBL-Systemen und -Lacken lassen sich kleinste Strukturgrößen von wenigen Nanometern realisieren.

Einer der bekanntesten EBL-Lacke besteht aus Poly-Methyl-Methacrylate (PMMA), einem Material, das auch unter der Bezeichnung ‚Acrylglas‘ bekannt ist. Die Strukturformel lautet $(C_5O_2H_8)_n$ und als Lösungsmittel wird oft Anisol verwendet. Im Versuch wird PMMA 950k verwendet. 950k beschreibt dabei das mittlere Molgewicht der Polymerketten. Daraus lässt sich berechnen, dass ein Polymer ca. 8500 Monomere mit obiger Strukturformel umfasst. Primär wird PMMA als Positivlack verwendet wobei die Polymere durch den Doseintrag aufgespalten und somit für den Entwickler (z.B. Methyl-Isobutyl-Keton + Isopropanol) löslich werden. Er kann aber auch als Umkehrlack eingesetzt werden, wobei dann eine Wiederverkettung und der Aufbau einer kohlenstoffreichen Matrix stattfindet (s. Abb. 4).

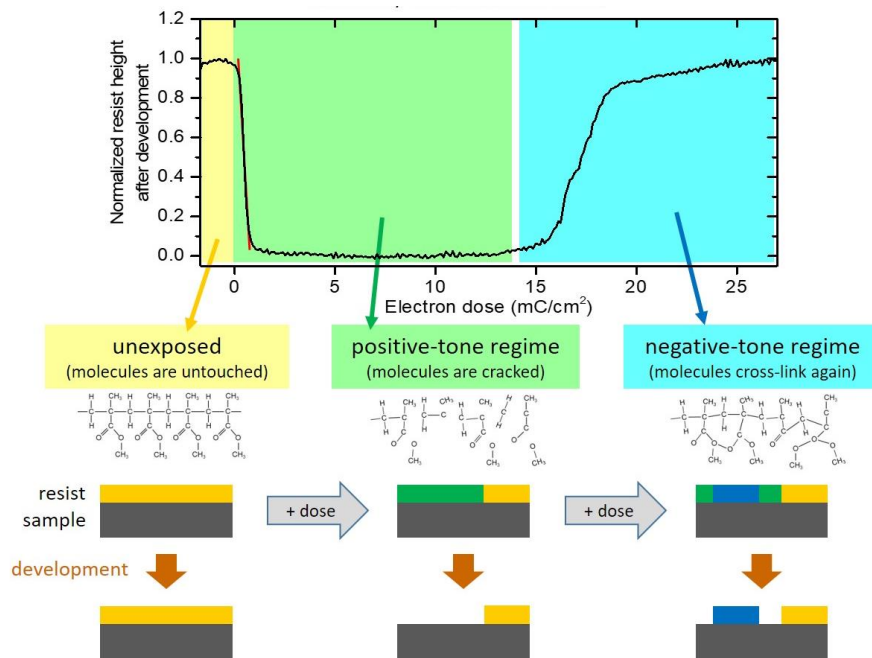


Abbildung 4: Beispielhafte Dosisabhängigkeit der Löslichkeit von PMMA. Der obere Graph stellt eine Kontrastkurve dar, mit der sich die Bereichsgrenzen präzise in Abhängigkeit der Probenstruktur, der Lackdicke und der Proben temperatur bestimmen lassen.

2.3 Prozesse die die Auflösung und Strukturdefinition limitieren

Eine zentrale Limitierung stellt die Abbildungsqualität der Elektronensäule dar, da keine Optik ‚perfekt‘ ist. Daher müssen vor jeder EBL einzelne Störfaktoren wie Astigmatismus und der zentrische Durchlauf des Elektronenstrahls durch die Aperturblende korrigiert werden.

Ein weiterer Faktor ist die Auflösung des EBL-Lacks. Er besitzt eine interne ‚Körnigkeit‘ durch die Molekülgröße und es kommt auch immer zu einem gewissen Dunkelabtrag von nicht belichteten Bereichen während des Entwickelns. Für eine hochauflösende EBL sollte daher immer zuerst der Entwicklungsprozess optimiert werden. Neben dem Einsatz unterschiedlicher Entwickler spielen auch die Entwicklungsdauer und -Temperatur eine wichtige Rolle. Weiterhin sollte die Dicke des Lacks im Bereich der anvisierten Strukturgrößen liegen.

Eine besondere Limitierung geht auf den sogenannten Proximity-Effekt zurück. Hierzu muss man wissen, dass nicht nur die Elektronen im einfallenden Primärstrahl für eine effektive Belichtung des Lacks sorgen, sondern auch gestreute Elektronen mit ausreichender Energie. Dies sind vor allem die Rückstreuелеktronen, die aus einem bereits aufgeweitetem Streuvolumen des Primärstrahls aus der Probe mit zusätzlichen Winkelanteilen den Lack quasi von unten belichten (siehe Abb. 5, links). Dem kann begegnet werden indem das zu belichtende Muster um den Proximity-Effekt korrigiert wird. Dies erfolgt mittels numerischer Verfahren die das Muster mit der Proximity-Aufweitung falten und die

Dosisverteilung iterativ korrigieren, bis der effektive Doseintrag zum gewünschten Muster führt (siehe Abb. 5, rechts).

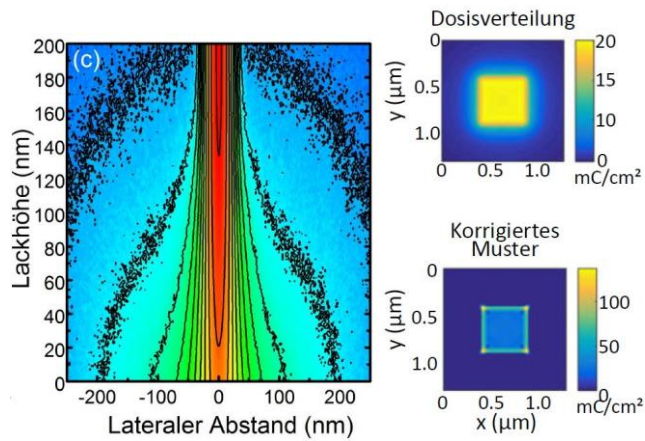


Abbildung 5: Links: Monte-Carlo Simulation zur Auswirkung des Proximity-Effekts. Dargestellt ist die Energieverteilung (Querschnitt) in einem 200 nm dicken PMMA Lack. Von Kontourlinie zu Kontourlinie halbiert sich die eingebrachte Energiedosis. (entnommen aus Gschrey, M. (2015): Doktorarbeit, TU Berlin). Rechts: Effektive Dosisverteilung beim Schreiben eines Quadrats und um den Proximity-Effekt korrigiertes Muster damit das gewünschte Quadrat zustande kommt. (entnommen aus Schnauber, P. (2020): Doktorarbeit, TU Berlin)

3 Beschreibung der Versuchsanlage

Die im Versuch eingesetzte EBL-Anlage basiert auf dem REM/EBL System *eLine Plus*¹ und ist in Abb. 6 gezeigt. Für hochauflösende EBL bedarf es neben einer hochwertigen Anlage auch eines geeigneten Aufstellortes. Besondere Probleme bereiten elektromagnetische Störfelder sowie mechanische Einflüsse wie Gebäudeschwingungen und Schalldruck. Für das in diesem Versuch eingesetzte Gerät wird unter anderem vorausgesetzt:

| | |
|-------------------|------------|
| Magnetfelder | RMS < 1 mG |
| Bodenschwingungen | < 0,8 µm/s |



Abbildung 6: Die im Versuch eingesetzte EBL-Anlage basierend auf einem eLine Plus. Die Käfigkonstruktion, die die Anlage umgibt, enthält Spulen-Paare, die der aktiven Kompensation von elektromagnetischen Feldern dienen. Weiterhin steht das eLine auf einer Plattform zur aktiven Kompensation von Gebäudeschwingungen.

Derartige Bedingungen sind in vielen Gebäuden nur schwer zu erfüllen und optimaler Weise werden beim Bau eines Gebäudes Räume mit speziellen Böden im Kellerbereich vorgesehen. Steht diese Option

¹ <https://www.raith.com/product/eline-plus/>

nicht zur Verfügung, so kann mit aktiver Kompensation Abhilfe geschaffen werden. Daher befindet sich das eLine in einem aktiven EM-Abschirmkäfig und steht auf einer aktiven Antivibrationsplattform.

Die Bedienung der Apparatur erfolgt vollständig Rechner-gestützt mit Hilfe des Programms NanoSuite® der Raith GmbH. Dieses ermöglicht auch die Proximity-Korrektur der zu schreibenden Muster.

Weiterhin ist der Probenstisch mit einem Laser-Interferometer ausgestattet. Es ermöglicht eine nm-genaue Positionierung des Schreibbereichs und ermöglicht somit auch ein hochgenaues *Stitching*. Dabei bezeichnet *Stitching* den Vorgang, wenn die zu schreibende Struktur größer als das aktuelle Schreibfeld (Field of View, FOV) ist und daher der Probenstisch um die Schreibfeldgröße verfahren werden muss, um die Struktur aus einzelnen Schreibabschnitten zusammensetzen.

4 EBL-Arbeitsablauf

Die wichtigsten EBL Arbeitsschritte sind im Folgenden in ihrer Reihenfolge aufgelistet und beschrieben.

| | Arbeitsschritt | Beschreibung |
|----|-----------------------|---|
| 1. | EBL Muster entwerfen | Das zu schreibende Muster sollte im Vorfeld entworfen und überprüft werden. Es wird das gängige GDSII Format verwendet bei dem es sich um vektororientiertes Format handelt, das mehrere hierarchische Ebenen enthalten kann. |
| 2. | Probe belackern | Die zu strukturierende Probe wird idealerweise in einer Reinraumumgebung mit Elektronenstrahl-sensitivem Lack beschichtet. Dies kann z.B. mit Hilfe einer Lackschleuder geschehen. Entsprechend des geplanten Strukturübertrags muss ein Positiv- oder Negativ-Lack verwendet werden. Hierbei ist zu beachten, ob der Lack lichtempfindlich ist. Manche EBL Lacke können auch durch UV-Anteile im Umgebungslicht belichtet werden. In diesem Fall sollten eine Gelblichtumgebung und lichtdichte Transportboxen verwendet werden. |
| 3. | Probe einschleusen | Je nach EBL-System und Probenhalter kann eine Probenschleuse zur Verfügung stehen, um nicht die komplette Probenkammer belüften zu müssen. Auch hier sind lichtempfindliche Lacke zu schützen. |
| 4. | System abpumpen | Analog zum Prinzip eines Rasterelektronenmikroskops muss ein Kammerdruck von typ. $< 10^{-6}$ mbar erreicht werden. |
| 5. | EO System starten | Das elektro-optische System (die Elektronensäule) wird hochgefahren. Hierzu gehört im Besonderen das Einstellen der Hochspannung der Kathode. |
| 6. | Arbeitsabstand wählen | Als Arbeitsabstand wird der Abstand zwischen dem Ende der Elektronensäule und der Probe bezeichnet. Wenn das SE Bild scharf gestellt ist, entspricht er somit auch der Objektweite der Bildgebung. Generell gilt: Ein kleinerer Arbeitsabstand ermöglicht eine bessere Auflösung. Typische Arbeitsabstände für EBL liegen im Bereich von 5 – 15 mm. |
| 7. | SE Bild optimieren | Vor dem Schreiben des Musters ist es von größter Wichtigkeit, dass die Abbildungseigenschaften der Elektronensäule eingestellt und optimiert werden, damit das Muster verzerrungsfrei und mit bestmöglicher Auflösung geschrieben werden kann. Dies geschieht analog zu einem REM. |

| | | |
|-----|--|---|
| 8. | Belichtungszeiten kalibrieren | Die eingebrachte Dosis an einem Punkt entspricht $I_S \cdot t$ für eine Punktdosis bzw. $I_S \cdot t / A_R$ für eine Flächendosis (I_S : Strahlstrom, t : Belichtungszeit, A_R : Fläche eines Rastervoxels). Daher muss jetzt der Strahlstrom mittels eines auf dem Probenhalter integrierten Faraday-Bechers präzise gemessen werden, damit die Belichtungszeit (basierend auf den vom Anwender vorgegebenen Dosen) vom Programm berechnet werden kann. |
| 9. | Koordinatensystem auf Probe einrichten | Für ein präzises Platzieren der Muster sollte mit Hilfe der EBL Software ein Koordinatensystem auf der Probe eingerichtet werden. Im einfachsten Fall kann es darauf basieren, dass eine Ecke der Probe als Koordinatenursprung definiert wird von dem aus eine (sub) Mikrometer-genaue Platzierung der Muster erfolgt. |
| 10. | EBL Muster positionieren | Das zu schreibende Muster wird im (lokalen) Koordinatensystem platziert und in eine Ablaufliste aufgenommen. Hierbei ist zu beachten, wie sich die Größen von Muster und Schreibfeld bzw. FOV verhalten. Ist das Muster größer als das FOV muss es mittels mehrerer FOVs zusammengesetzt werden (Stitching). |
| 11. | Muster in Lack schreiben | Jetzt erfolgt der eigentliche Schreibprozess bei dem die Ablaufliste abgearbeitet wird. Im Vorfeld sollte man sich die benötigte Zeit berechnen lassen, um die weiteren Schritte zeitlich planen zu können. |
| 12. | EO System deaktivieren | Die Hochspannung wird runtergefahren und das EO System in einen Standby-Modus überführt oder ganz deaktiviert (abhängig vom jeweiligen System). |
| 13. | System belüften | Entfällt im Falle einer Probenschleuse. |
| 14. | Probe ausschleusen | Die belichtete Probe wird aus dem System entnommen. Hierbei ist wieder zu beachten, ob der Lack lichtempfindlich ist oder nicht. |
| 15. | Lack entwickeln | Der empfohlene Entwickler ist den Angaben des Lackherstellers zu entnehmen. Nach der eigentlichen Entwicklung folgt ein Stopp-Bad und die Trocknung der Probe. |
| 16. | Inspektion | Je nach Strukturgröße kann optische Mikroskopie eingesetzt werden, um den Erfolg der Lithografie zu bewerten. |
| 17. | Weitere Prozessierung der Probe | Hierzu können weitere Strukturierungstechniken wie Ätzen, Metallisieren und Lift-off-Prozesse gehören (siehe z.B. [1] und). Viele Bauteil-Designs erfordern auch wiederholte EBL und Strukturierung. |

5 Literatur

- [1] Ingolf Ruge und Hermann Mader, Halbleiter-Technologie, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1991, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-58235-6>
- [2] <https://www.zeiss.com/microscopy/int/products/scanning-electron-microscopes/geminisem.html>
- [3] <https://www.halbleiter.org/>

6 Aufgabenbeschreibung

Unter Anleitung des Betreuers werden die EBL-Schritte 3-16 durchgeführt. Hierfür kommt ein Si- oder GaAs-Wafer zum Einsatz, der mit PMMA oder CSAR 62² (ebenfalls ein Umkehrlack) beschichtet ist.

Eine genauere Beschreibung macht an dieser Stelle wenig Sinn, da sich alle Schritte nur an der Gerätschaft sinnvoll erläutern lassen.

² <https://www.allresist.com/portfolio-item/e-beam-resist-ar-p-6200-series-csar-62/>