

Kapitel 1

Einleitung

Im Verlauf der letzten Jahrhunderte ist das wissenschaftliche Interesse an bestimmten Bereichen des elektromagnetischen Spektrums stark mit der praktischen Anwendung der jeweiligen Strahlung gestiegen. So gewann Licht im sichtbaren Spektralbereich im 17. bis 19. Jahrhundert große Bedeutung für die Mikroskopie und Astronomie. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse dienten zum besseren Verständnis grundlegender optischer Eigenschaften wie der Entdeckung des Brechungsgesetzes durch W. Snellius 1621. Die Nutzung des ultravioletten Lichtes im 20. Jh. führte zu Kenntnissen des Atom- und Molekülaufbaus, während sich mit der Entdeckung der Röntgenstrahlen 1895 [Rön96] ein großes Potential an medizinischen Anwendungen erschloss.

Im elektromagnetischen Spektrum befindet sich zwischen dem VUV-Bereich¹ und den weichen Röntgenstrahlen eine bisher wenig genutzte Region: der EUV-Spektralbereich (extremes Ultraviolett), der in den meisten Publikationen durch den Wellenlängenbereich von 5 – 40nm beziehungsweise den Quantenenergiebereich von 30 – 250eV charakterisiert ist [Att99]. Erst seit der Entdeckung der Synchrotronstrahlung im Jahr 1947 ist es möglich, künstlich intensive EUV-Strahlung zu erzeugen. Natürliche Strahlungsquellen finden sich hingegen in der Natur: In der Astronomie werden Sterne wie unsere Sonne beobachtet, die auch im EUV-Bereich emittieren. Die Vermessung dieser Strahlquellen erfolgt außerhalb der Erdatmosphäre durch satellitengestützte Teleskope (z.B. ROSAT).

Die Einsatzmöglichkeiten für EUV-Strahlung sind vielfältig: Beispiele sind die Mikroskopie, die Absorptions-Spektroskopie oder die Photoelektronen-Spektroskopie. Insbesondere die Entwicklung mikrolithographische Verfahren zur Herstellung integrierter Schaltkreise sind ein Motor für die ständige Weiterentwicklung von Strahlungsquellen für kürzere Wellenlängenbereiche. Bei der Lithographie ist das Zusammenwirken einer leistungs-optimierten Strahlquelle mit effektiven Strahlführungsoptiken unabdingbar, da nur so während der Produktion ein hoher Durchsatz an Mikrochips gewährleistet werden kann. Für lithographische Anwendungen standen bisher keine kompakten, intensiven Strahl-

¹VUV=Vakuum-Ultraviolett

quellen zur Verfügung. Unterschiedliche Konzepte wie Röntgen-Lithographie, Ionenstrahl-Lithographie, Elektronen-Lithographie oder die Lithographie im extrem ultravioletten Spektralbereich (EUVL) wurden diskutiert, von denen möglicherweise nur Synchrotronstrahlquellen, Gasentladungs- oder Laser-Plasma-Quellen im EUV-Spektralbereich den gestellten Anforderungen der Zukunft genügen werden. Parallel zu der Konstruktion von EUV-Quellen steht die Entwicklung von Messtechniken zur Charakterisierung der EUV-Strahlung. Viele Quellparameter konnten bisher auf Grund fehlender Charakterisierungswerkzeuge nicht vermessen werden, beziehungsweise sind weiterhin zum Großteil unverstanden wie zum Beispiel die Plasmaform und -größe oder die Winkelabhängigkeit der Emission.

Diese Arbeit soll einen Beitrag zum besseren Verständnis der laser-erzeugten Plasmen für den extrem-ultravioletten Spektralbereich liefern. Derartige Laser-Plasma-Quellen für den EUV-Bereich sind bisher kommerziell noch nicht erhältlich. Daher wurde eine EUV-Quelle, basierend auf einem Gastarget, konzipiert und experimentell realisiert, um den Einfluss einer Vielzahl möglicher Parameter zu untersuchen. Gasdüsen werden benötigt um das Targetgas mit einer möglichst hohen Dichte in den Rezipienten einzubringen. Dabei spielt die Wahl der Düse eine entscheidende Rolle; so ermöglicht eine konische Düsenform die Bildung von Clustern, wodurch weitaus höhere Dichten als bei einem konventionellen Gasstrom erzeugt werden können.

Zur Analyse der Quellparameter und des Abstrahlverhaltens von EUV-Plasmen werden unterschiedliche Geräte wie spezielle Lochkameras oder ein Spektrograph eingesetzt. Diese sind zum Teil aus langwelligeren Spektralbereichen bekannt, mussten zum Großteil aber neu konstruiert und für den EUV-Wellenlängenbereich optimiert werden. Andere Verfahren wie der Hartmann-Wellenfrontsensor wurden für extrem-ultraviolette Strahlung bisher überhaupt noch nicht eingesetzt, bieten aber hervorragende Möglichkeiten für die Planung und Charakterisierung von EUV-Optiken.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel wird zunächst ausführlich die Motivation für diese Arbeit gegeben. Anschließend wird die Plasmaerzeugung und Aufheizung des Plasmas durch die anregende Laserstrahlung theoretisch beschrieben. Zum Ende des Kapitels werden diverse Optikkonzepte und eine Auswahl an Analysewerkzeugen für die Quell- und Optikcharakterisierung aus der Literatur kurz vorgestellt.

2.1 Motivation / Zielsetzung

Weltweit besteht eine starke Nachfrage nach immer leistungsfähigerer Mikroelektronik. Um dem gestiegenen Interesse an schnelleren Übertragungsraten und höheren Informationsdichten nachzukommen, müssen Bauelemente elektronischer Geräte immer weiter miniaturisiert werden. Dieses findet sich in dem von G.E. Moore [Moo65] Mitte der 60'er aufgestellten empirischen Gesetz wieder, in dem er alle 18 Monate eine Verdoppelung der Transistorendichte auf einem Mikrochip vorhersagt.

Integrierte Schaltkreise werden heute auf Basis lithographischer Verfahren hergestellt. Bei der Lithographie werden die zu erzeugenden Strukturen (Leiterbahnen, Transistoren etc.) durch eine Maske in einen strahlungsempfindlichen Lack (den so genannten Resist) abgebildet, wobei die Maske prinzipiell beliebig oft verwendet werden kann. Die Abbildung erfolgt mit UV-Lasern, die das Bild der Maske über Strahlführungsoptiken um den Faktor 4 verkleinert abbilden [Kas00].

Die minimale Linienbreite (R) und die Fokustiefe (F) für die lithographische Herstellung kleiner Strukturen hängen von der numerischen Apertur der eingesetzten Optiken und der Wellenlänge ab. Nach dem Rayleigh-Kriterium können zwei Bildpunkte noch genau dann getrennt wahrgenommen werden, wenn das Beugungsmaximum des ersten Bildpunktes in das erste Beugungsminimum des zweiten fällt. Hieraus ergibt sich für die minimale

Linienbreite:

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad , \quad (2.1.1)$$

mit der Konstante k_1 , der Wellenlänge λ , der numerischen Apertur $NA = n \cdot \sin \alpha$ mit dem Brechungsindex n und dem halben maximalen Öffnungswinkel α . Die Konstante k_1 wird durch die Abbildungsoptiken, den Lack und den Belichtungsprozess bestimmt und liegt für heutige Fertigungstechniken bei 0,5 [Att99].

Für die Fokustiefe gilt [Att99]:

$$F = k_2 \frac{\lambda}{(NA)^2} \quad , \quad (2.1.2)$$

mit der Konstante k_2 , die bei heutigen Fertigungstechniken einem Wert von 0,6 entspricht. Um die Strukturbreite zu verkleinern, kann zum einen die numerische Apertur erhöht werden, was zu einer starken Verringerung der Fokustiefe führt (vergleiche quadratischen Anstieg in Gleichung (2.1.2)). Das stellt sehr große Anforderungen an die Positionierungsgenauigkeit der zu bearbeitenden Strukturen und bedeutet einen hohen technischen Aufwand. Der Maximalwert der numerischen Apertur beträgt theoretisch $NA = 1$. Heutige Systeme arbeiten schon mit hohen numerischen Aperturen. Somit bleibt als einzige Möglichkeit zur Verkleinerung der Strukturgrößen die Erniedrigung der Wellenlänge.

Stand der heutigen Technik ist der Einsatz von KrF-Excimerlasern der Wellenlänge 248nm mit denen Strukturbreiten bis 130nm erzeugt werden können. Ähnliche Strukturbreiten werden zurzeit auch durch ArF-Laser der Wellenlänge 193nm erreicht. Mit diesen sollen in Zukunft Strukturen bis 90nm produziert werden [Car01]. Die Erzeugung solch geringer Strukturbreiten geht einher mit der Entwicklung so genannter „Enhancement“-Techniken wie Phasenmasken oder speziellen Photolacken, die es ermöglichen scharf begrenzte Strukturen auch unterhalb der nach dem Rayleigh-Kriterium bedingten Unschärfe herzustellen [Kas00].

Der nächste Schritt zur Verkleinerung der Strukturbreiten steht im Einklang mit der Einführung der letztmöglichen kommerziell sinnvoll einsetzbaren Laserwellenlänge im VUV-Bereich, dem 157nm F₂-Laser. Ob diese wirklich für lithographische Zwecke zum Einsatz kommt, ist Gegenstand aktueller Untersuchungen [McC01].

Um noch kleinere Strukturen zu erzeugen, werden kürzere Wellenlängen benötigt. Im elektromagnetischen Spektrum findet man zwischen der Strahlung im Vakuum-UV (VUV) und der Röntgenstrahlung die extrem-ultraviolette Strahlung (EUV) im Wellenlängenbereich von ca. 5 – 40nm (vergleiche Abbildung 2.1.1).