

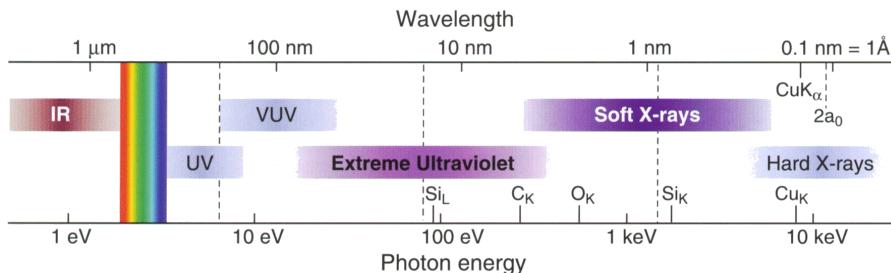
# 1 Einleitung

Im Gegensatz zu sichtbarem Licht, das sich an polierten Metalloberflächen nahezu vollständig reflektieren lässt, ist dies für Röntgenstrahlen außerhalb des sogenannten Totalreflexionsbereichs ohne wesentliche Verluste nicht möglich. Dies folgt unmittelbar aus der Tatsache, dass der Brechnungsindex aller Materialien für Wellenlängen im Röntgenbereich nur sehr wenig kleiner als der Wert 1 ist und sich damit nur geringfügig vom Brechungsindex von Luft oder Vakuum unterscheidet [1].

Schon kurz nach der Entdeckung der sogenannten X-Strahlen im Jahre 1895 durch Röntgen [2] wurde festgestellt, dass die Natur mit den Kristallen periodische Strukturen bereitstellt, an denen durch konstruktive Interferenz der an den Netzebenen reflektierten Teilstrahlen eine nennenswerte Reflexion von Röntgenstrahlung dennoch möglich ist [3, 4]. Dies wurde lange Zeit als einzige Möglichkeit angesehen, Röntgenstrahlen umzulenken oder zu formen. Da die in der Natur vorkommenden Kristalle nicht für jede denkbare Anwendung gleichermaßen geeignet sind, wurden Überlegungen angestellt [5], wie auch die gezielte Reflexion von Röntgenstrahlen einer bestimmten Wellenlänge bei einem bestimmten Winkel realisiert werden könnte. Dies führte zur Entwicklung künstlicher "eindimensionaler Kristalle" (lsm = layered synthetic microstructures = Multischichten), die aus nm-dicken Wechselschichten bestehen [6]. Dabei muss ein Schichtpartner möglichst transparent für Röntgenstrahlen sein (Spacerschicht). Dieser entspricht in Analogie zu den Kristallen den Bereichen mit geringer Elektronendichte zwischen den Atomen. Die andere Schicht muss so ausgewählt werden, dass sowohl ein möglichst guter Elektronendichthekontrast zur Spacerschicht als auch möglichst geringe Absorption der Röntgenstrahlen durch diese Schicht gewährleistet sind. An jeder Einzelschicht ist die Reflexion der Röntgenstrahlung nach wie vor gering. Durch konstruktive Interferenz aller an den einzelnen Perioden reflektierten Teilstrahlen kann jedoch eine Reflexion der Röntgenstrahlung am Multischichtstapel erreicht werden, die abhängig von der verwendeten Wellenlänge und den Schichtsystemen bis zu 92 % betragen kann [7].

Besonderes Interesse erlangten dabei jene Wellenlängen, für die Multischichtsysteme gefunden werden können, die diese Strahlung auch bei nahezu senkrechttem Einfall reflektieren. Damit ist die Möglichkeit gegeben, analog zur klassischen Optik auch im Röntgengebiet komplexe optische Systeme aufzubauen zu können.

Schon sehr früh zeigte sich, dass dem Multischichtsystem bestehend aus Molybdän/Silizium-Wechselschichten (= Mo/Si-Multischichten) als Reflektor für die Strahlung im extrem ultravioletten (EUV) Spektralbereich, der sich über



**Abb. 1.1.** Darstellung des elektromagnetischen Spektrums vom Infraroten (IR) bis zur harten Röntgenstrahlung. Der für diese Arbeit interessante Bereich der extrem ultravioletten (EUV) Strahlung erstreckt sich über Photonenergien zwischen 30 eV und 250 eV (entspricht  $\lambda = 5 \text{ nm}$  bis  $40 \text{ nm}$ ) (aus [9])

den Wellenlängenbereich von  $\lambda = 5 \text{ nm}$  bis  $40 \text{ nm}$  erstreckt (Abb. 1.1), große Bedeutung zukommt [8]. Die ersten Arbeiten deutscher Forschungsgruppen wurden ebenfalls bereits vor mehr als zehn Jahren vorgestellt und befassten sich schon damals mit der Erhöhung des Reflexionsgrades von Mo/Si-Multischichten durch Optimierung der Grenzflächen mittels geeigneter Wärmebehandlungen während des Wachstumsprozesses [10].

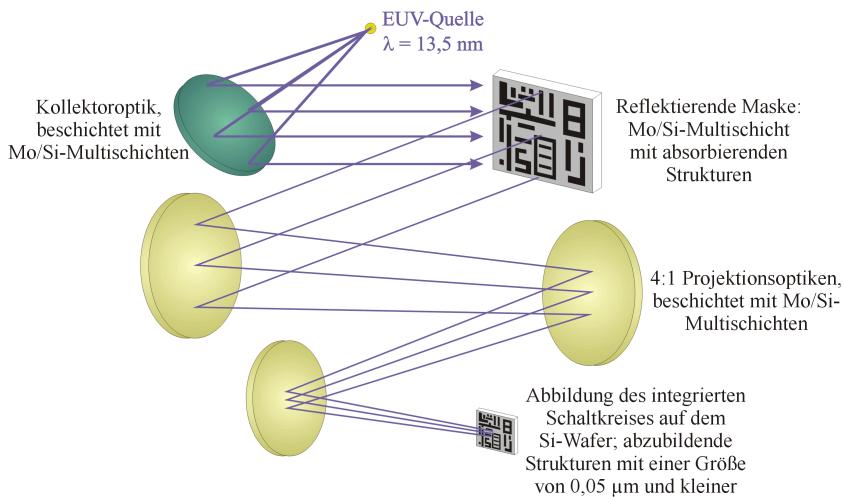
In den letzten Jahren haben sich die weltweiten Aktivitäten zur EUV-Lithographie (EUVL), bei der Strahlung der Wellenlänge um  $\lambda = 13 \text{ nm}$  zur Abbildung von Schaltkreisstrukturen von einer Maske auf Si-Wafer verwendet werden soll, als die Haupttriebkraft für die Weiterentwicklung von Mo/Si-Multischichten erwiesen.

Historisch gesehen ist die Lithographie in ihrer Ursprungsform von Alois Senefelder im Jahre 1798 erfunden worden, um aus einem vorgegebenen, einmal hergestellten Muster beliebig viele Kopien anfertigen zu können [11]. In den Anfängen der Lithographie wurde auf einer glatten Stein- oder Metallplatte eine Originalstruktur aufgebracht, die sich durch Tinte abweisende und Tinte anziehende Bereiche auszeichnete. Dadurch konnte das Original beliebig oft reproduziert werden.

In der Halbleiterindustrie wird momentan die sogenannte optische Lithographie verwendet, um hochkomplizierte Schaltkreisstrukturen von einem Original, der so genannten Maske, zunächst auf strahlungsempfindlichem organischen Lack (Resist) verkleinert abzubilden und durch Ätzprozesse auf den Siliziumwafer zu übertragen. Die Abbildung der Strukturen der Maske erfolgt dabei ähnlich wie bei der aus dem Alltag bekannten Dia-Projektion nur mit dem Unterschied, dass die Strukturen bei der Lithographie verkleinert anstatt vergrößert werden und dass deutlich mehr und präzisere Linsen erforderlich sind, um eine fehlerfreie Abbildung zu gewährleisten. Die Größe

der abzubildenden Strukturen wird dabei durch die verwendete Wellenlänge der Strahlung begrenzt. Je geringer die Wellenlänge ist, desto höher wird das Auflösungsvermögen und desto kleinere Strukturen können realisiert werden. Mit der momentan vorrangig eingesetzten Wellenlänge von  $\lambda = 248$  nm des KrF-Lasers können Strukturbreiten von 130 nm erreicht werden [12]. Eine weitere Verringerung der Strukturgrößen wurde bereits durch den Einsatz von ArF-Lasern ( $\lambda = 193$  nm) erzielt [13].

Es ist jedoch absehbar, dass die optische Lithographie danach an ihre Grenzen gerät. Daher wurden alternative Technologien gesucht, die die Abbildung von noch kleineren Strukturen ermöglichen (Next Generation Lithography, NGL). Ein potentielles Verfahren ist die EUVL mit einer Arbeitswellenlänge von 13,5 nm. Bei der EUVL muss jedoch ein prinzipiell anderer Ansatz gewählt werden. Die transmittierenden Optiken müssen aufgrund der hohen Absorption von Strahlung in diesem Wellenlängenbereich durch reflektierende Optiken ersetzt werden (Abb. 1.2). Diese reflektierenden Optiken bestehen aus einem im Allgemeinen asphärischen Spiegelträger, um eine optimale Bildfehlerkorrektur zu ermöglichen, und den darauf aufgebrachten Reflexionsschichten, den Mo/Si-Multischichten.



**Abb. 1.2.** Schematische Darstellung des Belichtungsprinzips bei der EUV-Lithographie. Die auf der Maske enthaltenden Schaltkreisstrukturen werden über die sogenannten Projektionsoptiken verkleinert auf den Resist des Si-Wafers belichtet. Durch anschließende Ätzprozesse wird die Schaltkreisstruktur auf den Si-Wafer übertragen. Im Einsatzfall besteht das Projektionssystem aus mindestens 6 verschiedenen Spiegeln

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Struktur und Eigenschaften von Mo/Si-Multischichten untersucht, die mittels Puls-Laser-Deposition (PLD) und

Magnetron-Sputter-Deposition (MSD) synthetisiert wurden. Ausgehend vom zweikomponentigen Grundsystem, bestehend aus Molybdän-, Silizium- und Übergangsschichten, erfolgte eine Weiterentwicklung dieses Grundsystems, indem dünNSTe Barriereschichten zwischen die eigentlichen Mo- und Si-Lagen eingefügt wurden, die effektiv Interdiffusion und chemische Reaktionen der beiden Hauptkomponenten verringern können. Die damit verbundenen strukturellen Veränderungen innerhalb der Multischichten wurden mittels verschiedener Dünnschichtcharakterisierungsverfahren (Röntgenreflektometrie, EUV-Reflektometrie, Röntgendiffraktometrie, Transmissionselektronenmikroskopie = TEM) analysiert und die Auswirkungen auf die röntgenoptischen Eigenschaften werden beschrieben.

Die Arbeit gliedert sich neben dieser Einleitung in 6 weitere Kapitel. Die Kapitel 2 bis 4 sollen zunächst die Voraussetzungen schaffen zum Verständnis der zwei Hauptkapitel 5 und 6, die den wesentlichen Bestandteil dieser Arbeit bilden.

Im Kapitel 2 werden kurz die aus der Literatur bekannten theoretischen Grundlagen der Reflexion von elektromagnetischer Strahlung an Multischichten rekapituliert. Weiterhin wird beschrieben, wie Realstruktureffekte (Schichtdickenschwankungen, Grenzflächenrauigkeiten und -diffusivitäten, Dichteabweichungen, Oberflächenoxidation und -kontamination) den theoretisch möglichen Reflexionsgrad verringern können. Darauf aufbauend wird für den EUV-Spektralbereich dargestellt, warum gerade das Mo/Si-Multischichtsystem am besten zur Reflexion bei Wellenlängen zwischen 12,5-20 nm geeignet ist. Der aus den Modellrechnungen folgende optimale Multischichtaufbau wird vorgestellt.

Kapitel 3 gibt einen Überblick über die zur Synthese von nm-Multischichten eingesetzten Beschichtungsverfahren. Anhand von Strukturzonenmodellen werden die unterschiedlichen Verfahren analysiert und Vor- und Nachteile für die Herstellung von röntgenoptischen Multischichten diskutiert.

Im Kapitel 4 werden die zur Charakterisierung der Schichten eingesetzten Techniken beschrieben. Es erfolgt eine Angabe zu Schichtinformationen, die aus den jeweiligen Charakterisierungsmethoden ableitbar sind, zu erreichbaren Genauigkeiten und Grenzen der Methoden.

Kapitel 5 widmet sich der detaillierten Darstellung der Beschichtungs- und Charakterisierungsergebnisse von EUV-Spiegeln, die mittels PLD abgeschieden wurden. Es wird zunächst ein Überblick über die wenigen in der Literatur verfügbaren Informationen zur Synthese von Mo/Si-Multischichten mittels PLD gegeben. Es folgen Betrachtungen zur Stabilität des Abscheideprozesses und zum Schichtwachstum. Dabei werden ballistische Effekte und Diffusionsprozesse untersucht. Die folgenden Abschnitte befassen sich mit der Variation unterschiedlicher Beschichtungsparameter (C-Barriereschichtdicke, Anzahl

der Perioden, Laserleistungsdichte am Target, alternative Absorberschichtmaterialien) mit dem Ziel, möglichst hohe EUV-Reflexionsgrade und homogene Schichten zu erhalten. Abschließend wird ein Schichtstrukturmodell für optimierte Mo/Si-Multischichten vorgestellt, welches sich als konsistent mit den Auswertungsergebnissen verschiedener Analysemethoden erwiesen hat.

Im Kapitel 6 werden die Ergebnisse des zweiten angewendeten Beschichtungsverfahrens, der Magnetron-Sputter-Deposition, vorgestellt. Zunächst wird das zweikomponentige Mo/Si-Grundsystem betrachtet. Es werden Aussagen zur Reproduzierbarkeit der Multischichtsynthese, zu Abscheideraten und Periodendickenkontraktion, zur Schichthomogenität und zur Schichtbildung in Abhängigkeit vom Ar-Sputtergasdruck gemacht. Dabei zeigt sich, dass im Unterschied zu den PLD-Schichten auch ohne Diffusionsbarrieren hochreflektierende EUV-Spiegel hergestellt werden können. Weiterhin wird für das reine Mo/Si-System ebenfalls ein Schichtstrukturmodell entwickelt. In den folgenden Abschnitten wird beschrieben, wie sich Barrièreschichten in magnetron-gesputterten Mo/Si-Multischichten auswirken. Intensiv werden die Materialien Kohlenstoff und Borkarbid als Barrièreschichten untersucht. Es wird gezeigt, dass die Interdiffusion der Mo/Si-Multischichten reduziert und der EUV-Reflexionsgrad erhöht werden kann. Außerdem werden auch alternative Materialien wie Silber und Ruthenium im Multischichtstapel eingebaut und die sich ausbildende Schichtmorphologie untersucht.

Den Schluss der Arbeit bildet Kapitel 7, in dem die wesentlichen Ergebnisse nochmals zusammengefasst werden.