

# Einleitung

In dieser Arbeit werden grundlegende Untersuchungen zum lichtinduzierten Trockenätzen durchgeführt. Dabei werden Reaktionen analysiert, die stattfinden, wenn man ein Material einem Gas aussetzt und es zusätzlich belichtet. Lichtinduziertes Trockenätzen ermöglicht prinzipiell, Materialien direkt zu strukturieren, vorausgesetzt es gelingt durch geeignete Parameterwahl, eine Reaktion nur an den Stellen auszulösen, an denen belichtet wird. Bei den herkömmlichen Methoden zur Mikrostrukturierung wird eine Maskenstruktur durch Belichtung auf einen Resistlack übertragen. Er wird entwickelt und dient dann als Maske für eine Ätzung der freiliegenden Stellen des Substrats (meist naßchemisch, oder mittels Plasmaätzen) [Bäu96]. Danach wird die Resistmaske wieder entfernt. Beim hier vorgestellten Trockenätzen entfällt die Notwendigkeit eines Resists und damit mehrere Schritte im Produktionsprozeß.

Die Auflösungsgrenze für eine geätzte Struktur ist durch Beugungseffekte und damit durch die Wellenlänge limitiert. Mit speziellen Methoden (z.B. Phasenmasken) kann diese Auflösungsgrenze noch zu  $\lambda/2$ – $\lambda/3$  verbessert werden [Cou04]. Man erreicht aber nun einen Punkt, an dem Laser als Lichtquelle nicht mehr ausreichen (ArF-Laser: 193 nm, F<sub>2</sub>-Laser: 157 nm). Viel Forschung wird der Röntgenlithographie gewidmet, für die insbesondere geeignete optische Elemente entwickelt werden müssen. Der Wellenlängenbereich des VUV (vakuumultraviolett) liegt dazwischen und wird in dieser Arbeit untersucht.

Im Hinblick auf eine technologische Anwendung war es wichtig, unter möglichst realen Bedingungen zu arbeiten. Fragen wie „Welches Gas, bei welchem Gasdruck?“, „Wie muß das Material präpariert werden?“, „Wie sehen die Oberflächen davor und danach aus?“, „Welche Wellenlänge ist am geeignetsten?“ sollten beantwortet werden.

Das Besondere an den hier vorgestellten Untersuchungen ist, daß die Effizienz der Ätzreaktion in Abhängigkeit von der Wellenlänge (also der Photonenenergie) vermessen wird. Sonst üblich sind Untersuchungen mit einem Laser bei festgelegten Wellenlängen, oder Weißlichtexperimente, die über einen

größeren Spektralbereich mitteln [UrK87]. Im Gegensatz dazu liefert das in dieser Arbeit verwendete Synchrotron monochromatisches Licht, mit hohem Fluß ( $10^{12} \gamma/s$ ), über einen weiten Spektralbereich (50–620 nm). Die Experimente wurden am Monochromator 3m-NIM-1 bei der Berliner Elektronen-Speicherringgesellschaft für Synchrotronstrahlung (BESSY II) durchgeführt. Vorangegangene Messungen waren bei BESSY I gemacht worden, wo ein fast fünffacher Ringstrom und damit fünfmal so viele Photonen zur Verfügung standen. Das führte zur Notwendigkeit, eine Meßmethode zu finden, die trotz des geringeren Photonenflusses bei BESSY II eine ausreichend hohe Genauigkeit in sinnvoller Zeit liefert. Außerdem sollten die Ätzraten möglichst schon während der Ätzung bestimmbar sein.

Ursprünglich wurde das lichtinduzierte Trockenätzen mit folgender Meßmethode untersucht [Li92, Str97, Raa00]: Um den Effekt der lichtinduzierten Ätzung zu erkennen, wird vor der Belichtung eine Maske auf eine Materialprobe gelegt. Diese Probe wird dann unter verschiedenen Bedingungen belichtet. Die fertig strukturierte Probe wird an Luft mit einem Mikroskop, einem Stylus (Profilometer) und einem AFM (atomic force microscope, Rasterkraftmikroskop) untersucht. Das ist sehr zeitaufwendig, da für eine Wellenlängenabhängigkeit bis zu 100 Proben bei sonst gleichen Bedingungen geätzt werden müssen.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Massenänderungen direkt während der Ätzreaktion mithilfe einer Quarzwaage *in situ* gemessen. Schwingquarze sind sehr empfindlich – kleinste Reaktionsratenunterschiede (entsprechend 0,1 Hz bei einer Grundfrequenz von 6 MHz) können vermessen werden. Diese Methode ist sehr gut geeignet, um die Ätzrate in Abhängigkeit von Parameteränderungen wie Druck, Gasfluß und Gaskonzentration direkt an einer Probe zu messen. Erstmals konnte so die Wellenlängenabhängigkeit einer Ätzreaktion an einer einzigen Probe bestimmt werden. Auch zeitabhängige Phänomene wie eine erhöhte Rate zu Beginn der Reaktion können beobachtet werden. Außerdem konnte die Dunkelrate (also die Reaktion von Halogen und Metall ohne Belichtung) systematisch an unterschiedlich präparierten Systemen vermessen werden, was grundlegend für das Verständnis der lichtinduzierten Reaktionen ist. Im Zuge des Umbaus der Ätzapparatur wurde auch die Möglichkeit geschaffen, Materialien im Ultrahochvakuum (UHV) zu präparieren, transferieren und dann zu ätzen. Somit konnte gezeigt werden, daß insbesondere Luftkontakt die Reaktionsraten stark beeinflusst.

Lichtinduziertes Trockenätzen im VUV wurde schon an den Systemen Si/XeF<sub>2</sub> [Str97], GaAs/Cl<sub>2</sub> [Li92] und auch Cu/Cl<sub>2</sub> [Raa00] untersucht und mit Erfolg getestet. Das macht deutlich, wie vielfältig dieser Prozeß einsetzbar ist. Die in dieser Arbeit untersuchten Materialien sind Kupfer und Kobalt mit dem Ätzgas Chlor. Kupfer wurde gewählt, da es ideal für Anschlußmes-

sungen hätte sein sollen, da es zuvor ausführlich von u.a. [Raa00, SC86a] untersucht worden war. Diese Anschlußmessungen an vorherige Arbeiten waren erforderlich, da der experimentelle Aufbau mit einer neuen Meßmethode modifiziert wurde, zudem wurden die Materialien als dünne Filme untersucht und nicht mehr als mm-dickes Volumenmaterial (*Bulk*). Außerdem wurde die Lichtquelle gewechselt (BEESY II anstelle von BEESY I).

Als neu zu untersuchendes Material wurde Kobalt aufgrund seiner magnetischen Eigenschaften und der Passivierung an Luft ausgewählt. Nickel hatte sich als resistent gegenüber den üblichen Ätzgasen herausgestellt [Li92] und wird deshalb auch als Maskenmaterial eingesetzt. Eisen hat ein hohes magnetisches Moment, korrodiert aber schnell mit Luft. Kobalt und generell Kobaltreiche Legierungen werden zudem in MRAM-Elementen (magnetic random access memory) schon technologisch eingesetzt. Zusätzlich besteht ein besonderes Interesse an strukturierten, magnetischen Materialien für magnetische Speichermedien [LSP91], die aktuell aus polykristallinen dünnen Kobaltfilmen hergestellt werden. Trotz vielfältiger Untersuchungen ist es nach wie vor problematisch, magnetische Materialien zu ätzen, da diese meistens nichtflüchtige Produkte mit den herkömmlichen Methoden (z.B. Ionenstrahlätzen) bilden [JMS99]. Einige Vorschläge wurden gemacht, diese sind jedoch aufwendig [NPW94]. In dieser Arbeit sollen grundlegende Bedingungen getestet werden, um herauszufinden, ob Kobalt mittels lichtinduziertem Trockenätzen strukturiert werden kann.

Im ersten Kapitel werden einige physikalische Grundlagen zum Verständnis der Arbeit zusammengefaßt. Danach wird der zur Untersuchung verwendete experimentelle Aufbau vorgestellt. Im anschließenden Kapitel „Charakterisierung“ sind experimentelle Details, wie Photonenflußspektren der Lichtquellen, Probenpräparation, Auswertetechniken und Stabilität des Systems zusammengestellt. In den beiden folgenden Kapiteln werden die Meßergebnisse von Dunkelreaktion und lichtinduzierter Reaktion für die Materialien Kupfer und Kobalt vorgestellt. Abschliessend werden diese Ergebnisse interpretiert und diskutiert.

