

Optimierung des Schwingungsverhaltens bei Objektiven für die Mikrolithographie

Dipl.-Math. techn. **B. Geuppert**, Dr.-Ing. **J. Kugler**, Carl Zeiss SMT AG, Oberkochen; Dr.-Ing. **Falk Wagner**, ICS Engineering GmbH, Langen

Kurzfassung

Mikrolithographie ist ein optisches Verfahren zur Herstellung von Computerchips. Da die Strukturdimensionen der Chips im Nanometerbereich liegen, darf das Objektiv, das die Abbildung ermöglicht, Bildschwingungen nur im Subnanometerbereich verursachen. Im Folgenden wird dargestellt, wie Bildschwingungen berechnet und optimiert werden. Dabei sind gedämpfte Tilger eine Möglichkeit optimale Schwingungseigenschaften des Objektivs zu erreichen. Abschließend wird ein Ausblick auf die Besonderheiten des dynamischen Verhaltens von Systemen der EUV-Lithographie, der Lithographietechnik für die Zukunft, gegeben.

Abstract

Microolithography is a method to produce microchips by optical means. Structures are projected by a lens onto a wafer coated with photo resist. Critical dimensions of such structures are 45 nanometer and below, therefore the vibration amplitude of the image produced by the lens has to be restricted to even smaller numbers. It is shown here how to calculate vibrations of the image and how to reduce the vibration amplitudes of optical elements by means of tuned mass dampers. Also an overview of the particular dynamic behaviour of systems for EUV-lithography is given. EUV is the future technology for microlithography.

1. Einleitung: Mikrolithographie

Mikrolithographie ist das Standardverfahren zur Herstellung von Computerchips. Eine optische Struktur wird dabei auf einen mit Fotolack beschichteten Wafer, eine Siliziumscheibe, aufgebracht. Durch Ätzen, Dotieren, Oxidieren etc. gibt man dieser Struktur die gewünschten Halbleitereigenschaften. So kann man über mehrere Schichten (sog. Layer) Transistoren, Kondensatoren und andere elektronische Elemente aufbauen.

Erreicht wird die Leistungsfähigkeit moderner Prozessoren durch eine immer größere Anzahl von Transistoren und Kondensatoren pro Flächeneinheit des Chips. Deshalb müssen die Strukturen immer kleiner werden. Heutige Spitzenprodukte bei Prozessoren und Speicherelementen (DRAM und NAND-Flash) haben Strukturen mit einer Linienbreite kleiner als 45

Nanometern. Die hierfür nötigen Lithographie-Scanner und ihre Objektive arbeiten mit Licht im ultravioletten Bereich mit einer Wellenlänge von 193 Nanometer. Um Strukturen mit noch kleineren Linienbreiten ausreichend scharf abbilden zu können, müssen außer der Immersio-ontechnologie auch weitere hochauflösende Techniken wie Double Patterning/Double Exposure verwendet werden. Diese Techniken verlangen eine Genauigkeit Layer to Layer von fünf oder weniger Nanometer.

Der prinzipielle Aufbau der Maschine ist in Bild 1 dargestellt. Das Kernstück für die Abbildung ist das Objektiv (1), das die Struktur auf dem Reticle (2), dem „Diapositiv“, auf den Wafer (3) abbildet. Die Stages, die Reticle und Wafer tragen, sind über eine hochgenaue Messtechnik auf das Objektiv referenziert. Dieses ist mit dem Träger der Messtechnik (4) fest verbunden. Im Strahlengang dem Objektiv vorgeschaltet ist das Beleuchtungssystem (5).

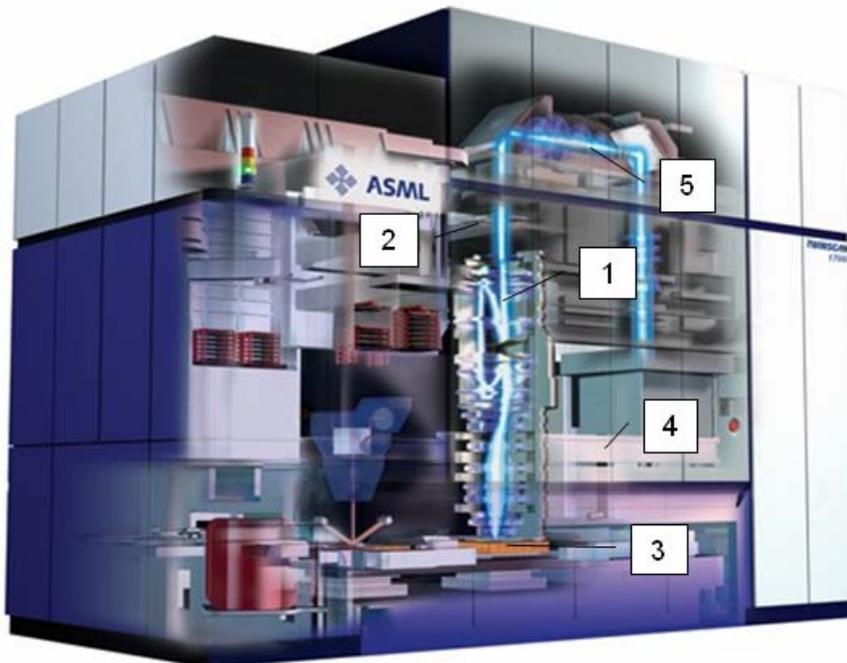


Bild 1: Prinzipieller Aufbau eines Lithographie-Scanners: Twinscan von ASML mit Objektiv Starlith™ 1700 von Carl Zeiss . Quelle: ASML

Das Objektiv ist über sehr niederfrequente Schwingungsisolatoren gegenüber der Umwelt (Bodenschwingungen etc.) und gegenüber den Reaktionskräften aus den Beschleunigungen der Stages isoliert. Damit wird die dynamische Anregung des Objektivs auf ein Minimum reduziert.

2. Objektivdynamik

2.1 Was ist Objektivdynamik?

Wie oben dargestellt, ist ein Scanner eine Produktionsmaschine, bei der das Lithographie-Objektiv ein Bild der gewünschten Struktur auf dem Wafer erzeugt. Entscheidend ist das Schwingungsverhalten des Bildes gegenüber dem Wafer, denn dieses bestimmt, wo auf dem Wafer die Struktur entsteht. Für die dynamische Qualifizierung eines Objektivs ist es also wichtig, die Bildschwingung zu berechnen und mit der Spezifikation zu vergleichen. Die Berechnung der Bildschwingung besteht aus drei Teilen:

1. Bestimmung der Anregung durch externe Störquellen
2. Ermittlung des Schwingungsverhalten des Objektivs und seiner Komponenten (Gehäuse, optische Elemente)
3. Berechnung der Bildschwingung aus den Bewegungen der optischen Elemente

Da das Objektiv gegenüber dem Maschinenrahmen schwingungs isoliert ist, werden eher exotische Anregungen wie zum Beispiel der Luftschall wichtig. Dieser wird erzeugt durch umgebende Maschinenkomponenten, Lüfter für die Prozessluft und die Klimaanlage im Reinraum erzeugt wird. Aber auch Geräusche z.B. durch Radio und Gespräche der Beschäftigten sind nicht vernachlässigbar. Der Luftschall variiert allerdings von Maschine zu Maschine und von Aufstellungsort zu Aufstellungsort stark. Deshalb werden für die Auslegung der Systeme Referenzspektren definiert. Die Anregung wird als über die Objektivoberfläche verteilte Kräfte modelliert, welche als stochastisch angenommen werden. Ihre Amplitude wird über Referenzmessungen skaliert.

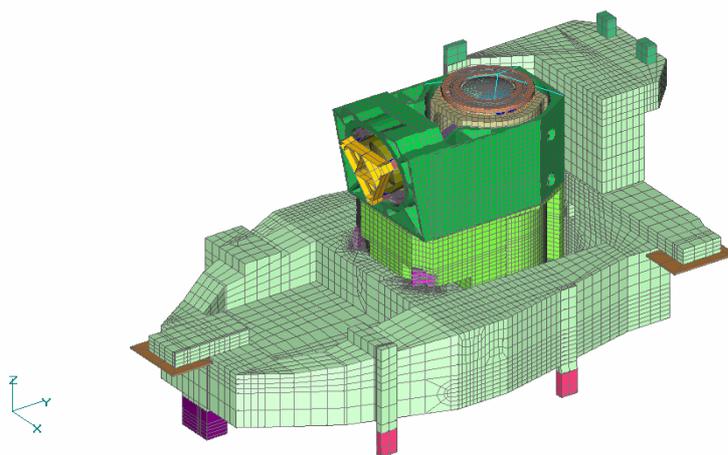


Bild 2: FE-Modell eines Objektivs von Carl Zeiss

Das Schwingungsverhalten des Objektivs und seiner Komponenten als Antwort auf eine vorgegebene Anregung wird üblicherweise mithilfe eines Finite Elemente Modells berechnet. Da sich die Schwingungsamplituden der Komponenten in der Größenordnung einzelner Nanometer bewegen, kann ein lineares

Modell verwendet werden und eine Berechnung im Frequenzbereich ist über einen modalen

Ansatz ist möglich. Wenn $H_{ij}(\omega)$ der (komplexe) Frequenzgang des Objektivmodells von der Anregung am Freiheitsgrad j zur Antwort am Freiheitsgrad i (z.B. Verschiebung der Mitte eines optischen Elements) ist, dann berechnet sich die spektrale Leistungsdichte beispielsweise der Schwingung diesen optischen Elements zu

$$PSD_i(\omega) = |H_{ij}(\omega)|^2 \cdot PSD_j(\omega)$$

(siehe auch [3],[4]). Nun ist vom Schwingungsverhalten der optischen Elemente auf das des Bildes zu schließen. Über die Gesetze der geometrischen Optik kann die (statische) Verschiebung des Bildes, verursacht von einer (statischen) Verschiebung eines einzelnen optischen Elements aus seiner Solllage, berechnet werden. Wegen der Linearität des Modells ist der Effekt von Kombinationen von Verschiebungen optischer Elemente die Summe der Einzeleffekte. Damit lässt sich jedem optischen Element eine optische Sensitivität zuordnen und der Frequenzgang der Verschiebung des Bildes $H_{Bild,j}(\omega)$ als Antwort auf eine Anregung

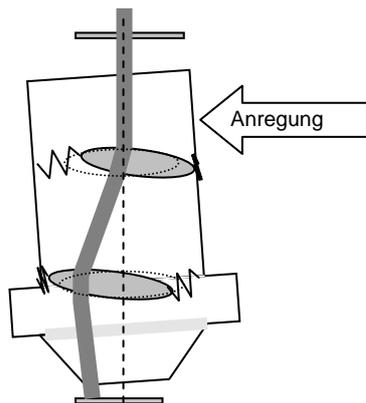


Bild 3: Schematische Darstellung der Bildschwingung

am Freiheitsgrad j lässt sich als Linearkombination der Frequenzgänge der Verschiebungen der optischen Elemente, multipliziert mit ihrer optischen Sensitivität darstellen:

$$H_{Bild,j}(\omega) = \sum_k s_k H_{kj}(\omega), \text{ mit } k = 1 \dots N.$$

N ist die Anzahl der Freiheitsgrade der optischen Elemente und s_k ist die optische Sensitivität eines Linsenfriheitsgrads. Dabei ist die Bestimmung der optischen Sensitivitäten eine wichtige Kompetenz innerhalb der Carl Zeiss SMT AG. Die Entstehung einer Bildschwingung ist in Bild 3 schematisch dargestellt.

2.2. Kenngrößen: Overlay und Fading

Den Endkunden, den Chip-Hersteller interessiert nicht, ob sein Objektiv schwingt. Ihn interessiert nicht einmal, ob das Bild schwingt. Er möchte, dass die verschiedenen Schichten (Layers), aus denen die Struktur eines Chips besteht, exakt genug übereinander liegen und dass die Schärfe der abzubildenden Strukturen den Vorgaben entspricht. Das Maß für die (lokale) Abweichung der Position des folgenden Layers vom vorigen heißt Overlay, das Maß für den Kontrastverlust, verursacht durch die Bewegungsunschärfe des Bildes, heißt Fading.

Eine Bildschwingung wirkt auf beide Fehlerarten, weil ein Layer abgescannt wird. Daher sieht immer nur ein Teil des Chips Licht. Wenn nun das Bild eine Schwingungsdauer T hat, die größer ist als die Zeit T_{scan} , die der Scannerschlitz braucht, um einen Punkt auf dem Chip zu überstreichen, so verschiebt sich der Schwerpunkt der abzubildenden Struktur gegenüber der Solllage. Somit ergibt sich ein Versatz zur darunterliegenden Struktur, also ein Overlay-Fehler. Ist jedoch die Schwingungsdauer T deutlich kleiner als T_{scan} , so bleibt der Schwerpunkt annähernd in der Solllage, aber das Bild wird unscharf und die Struktur wird breiter.

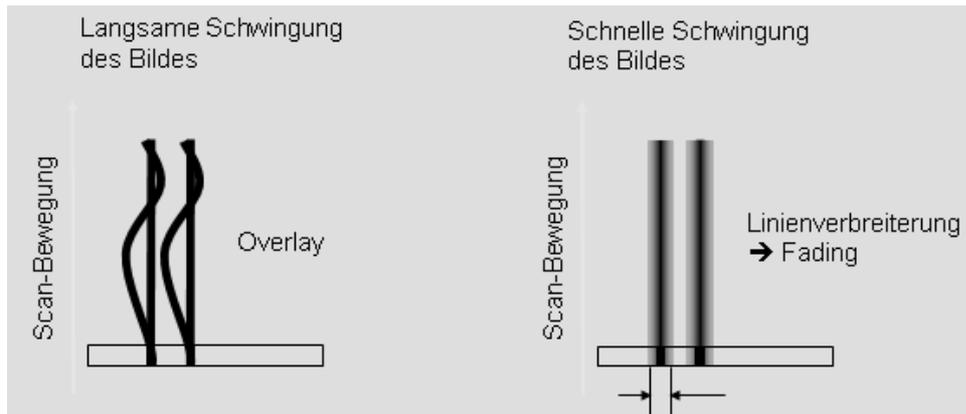


Bild 4: Prinzipskizze zur Entstehung von Overlay und Fading aus Bildschwingungen

Im Zeitbereich lässt sich der Overlay-Fehler als Moving Average (MA) der Bildschwingung, gemittelt über die Zeit T_{scan} , beschreiben, der Fading-Fehler als Moving Standard Deviation (MSD). Im Frequenzbereich lässt sich der MA-Wert ermitteln, indem man den Frequenzgang $H_{Bild,j}(\omega)$ zunächst mit einem Low Pass Filter multipliziert und anschließend den 3σ -Wert berechnet. Der MSD-Wert ist näherungsweise der 3σ -Wert des mit einem High Pass Filter multiplizierten Frequenzgangs. Die Eigenschaften dieser Filter ergeben sich aus der Scanning-Zeit T_{scan} und dem Profil der Lichtintensität über die Schlitzbreite.

3. Optimierung des Schwingungsverhaltens eines Lithographieobjektivs

3.1 Möglichkeiten und Grenzen der Optimierung

Ziel einer Optimierung des Schwingungsverhaltens eines Lithographieobjektivs ist die Reduktion der Amplitude der Bildschwingung. Die Parameter, an denen man ein schwingungsfähiges System optimieren kann, finden sich in der Schwingungsgleichung

$$M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx = F(t)$$

als da sind Masse, Dämpfung, Steifigkeit und externe Anregung. Hier unterscheidet sich ein Objektiv nicht von anderen mechanischen Systemen. Der Unterschied liegt in den Randbe-

dingungen: Optischen Elemente dürfen nur wenige Nanometer deformiert werden. Deshalb stößt eine Versteifung der Anbindung der optischen Elemente an die Fassung mit dem Ziel der Verringerung der Schwingungsamplitude sehr schnell an Grenzen. Ebenso ist eine Massenreduktion z.B. durch Leichtgewichtsstrukturen in der Regel nicht möglich. Für die Reduktion der Anregung wird mit der in Kap. 1 beschriebenen Schwingungsisolierung schon ein sehr guter Zustand erreicht, eine Abschirmung vom Umgebungsschall durch eine Einhausung mit einem schallabsorbierenden Gehäuse ist nur bedingt möglich. Bleibt die Dämpfung, wobei auch hier zwei Punkte zu beachten sind: 1. Es müssen Schwingungsamplituden von wenigen Nanometern gedämpft werden. 2. Wenn durch die Dämpfungseinrichtung statische Kräfte auf die Linse wirken, müssen diese über Jahre konstant sein. Mehr als 10-100 mN Veränderung sind nicht zulässig. Ansonsten ändern sich die Positionen und/oder die Deformationszustände der optischen Elemente.

3.2 Dämpfung der Linsenschwingungen mithilfe gedämpfter Tilger

Eine Möglichkeit zur Dämpfung von Linsenschwingungen besteht aus einem gedämpften Tilger. Dadurch kann eine dämpfende Wirkung auf die Bewegung des optischen Elements erreicht werden, ohne eine zusätzliche Verbindung zwischen Objektivgehäuse und optischem Element zu schaffen, die deformierende Kräfte erzeugt. Die Theorie eines gedämpften Tilgers wird zum Beispiel in [1] dargestellt. Ein ungedämpfter Tilger genügt nicht, denn neben der ausgelöschten Resonanz entstehen zwei neue Resonanzen, die wegen der breitbandigen Schallanregung angeregt würden (siehe auch [2]).

Umgesetzt werden kann der Tilger als eine Masse, die über eine Gummischicht als Zwischenlage auf einen Teil der Fassung, den sog. Innenring, der mit dem optischen Element einigermaßen steif verbunden ist, aufgeschraubt wird. Dabei dient die Gummischicht sowohl als Feder als auch als Dämpfer. Ihre Dicke wird so berechnet, dass die störende Resonanz ausreichend gedämpft ist. Eine Prinzipskizze zeigt Bild 5.

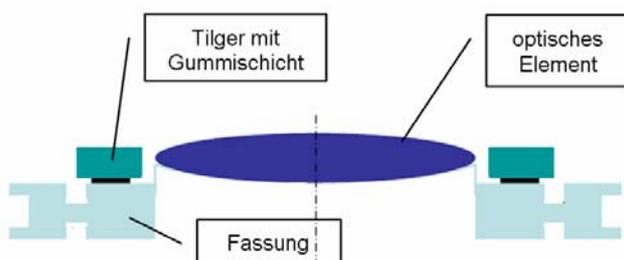


Bild 5: Prinzipskizze einer Fassung mit gedämpftem Tilger

Messungen zeigen eine Verringerung der Amplitude in der störenden Resonanzfrequenz um den Faktor 50 (siehe auch Bild 6). Dabei wurde bei der Messung darauf geachtet, dass nur so stark angeregt wurde, dass die Schwingungsamplitude in der Größenordnung der Amplitude im Betrieb des Objektivs, d. h. wenige Nanometer, bleibt.

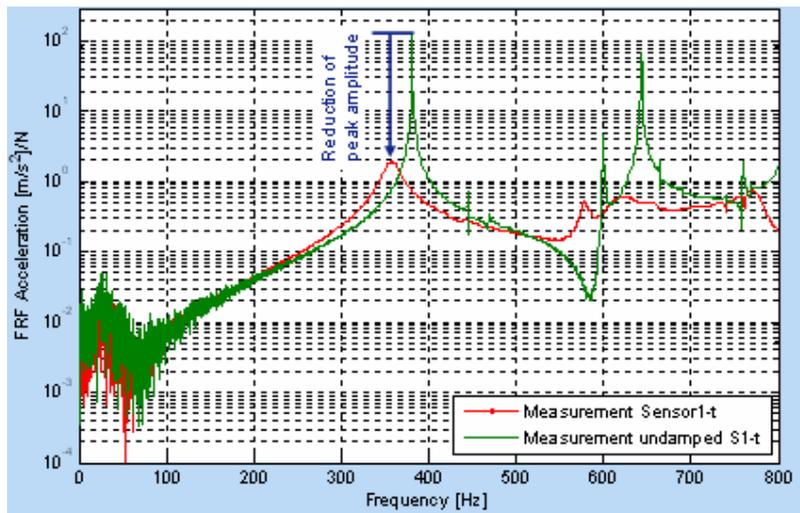


Bild 6: Frequenzgang (gemessen) einer Testfassung mit und ohne gedämpften Tilger

4. Ausblick: Neue Aspekte der Objektivdynamik bei der EUV-Lithographie

Zur Verbesserung der Auflösung bei noch kleineren Strukturdimensionen (22 und 16 Nano-

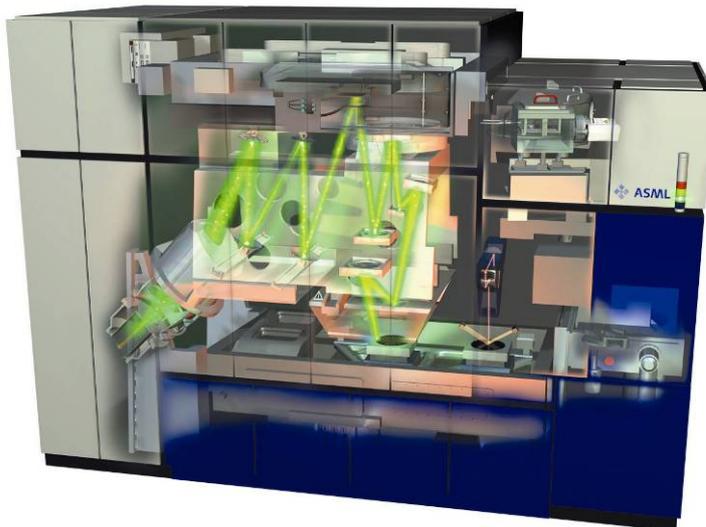


Bild 1: EUV-Scanner (Twinscan von ASML mit Objektiv Starlith™ 3100 von Carl Zeiss). Quelle: ASML

meter sind die angepeilten kritischen Dimensionen in den nächsten Jahren) will man Verfahren mit EUV (extreme ultraviolett = schwache Röntgenstrahlung) nutzen. Diese Strahlung wird jedoch von allen Materialien, auch von Luft, absorbiert, deshalb müssen die Objektive Spiegelsysteme im Vakuum sein. Spiegel sind jedoch auf Deformation der Oberfläche wie auch auf Positionstoleranzen wesentlich empfindlicher als Lin-

sen, weil wegen dem Reflektionsgesetz (Einfallswinkel = Ausfallswinkel) ein Winkelfehler der Oberfläche gleich verdoppelt wird. Würde man einen EUV-Spiegel mit der hier geforderten Positionsstabilität auf dem Mond aufstellen und von der der Erde aus beleuchten, so würde der Strahl einen mit einer Genauigkeit von kleiner als 10 cm zurückkommen. Das bedeutet einen hohen Aufwand bei der Optimierung des dynamischen Verhaltens des EUV-Objektivs.

5. Fazit

Wie dargestellt wurde, liegen die Spezifikationen für die Schwingungsamplituden eines Lithographiobjektivs bei wenigen Nanometern. Dies ist begründet in den kleinen Strukturbreiten moderner Mikrochips. Um diese kleinen Schwingungsamplituden zu erreichen, müssen die Objektive bezüglich ihrer Dynamik optimiert werden, da trotz Schwingungsisolierung Störquellen wie Umgebungsgeräusche signifikante Schwingungsanregungen darstellen. Bei zukünftigen EUV-Systemen sind die Anforderungen wegen der empfindlichen Spiegel nochmals deutlich höher.

Danksagung

Die hier erwähnten Methoden und Lösungen sind zum Teil in den vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekten "157nm Lithographie" Förderkennzeichen 01 M 2995C, und "Lithographie für den 45nm- und 32nm-Knoten", Förderkennzeichen 13N9112 im Rahmen der MEDEA+ Projekte T401 "FLUOR" und 2T304 "LIQUID" entstanden. Hierfür gilt mein besonderer Dank.

Literaturangaben

- [1] Wölfel, H. P.: Umdruck zur Vorlesung Maschinendynamik. Darmstadt WS 2004/2005'
- [2] US 2008/0278828 A1
- [3] Cough, R.W., Penzien, J.: Dynamics of Structures. New York: McGraw-Hill, 1993²
- [4] DeJong, R. G.: Statistical Methods for Analyzing Vibrating Systems. In: Harris, C. (Ed.): Shock and Vibration Handbook. New York: McGraw-Hill 1996⁴, S. 11.1-11.32