

Variable Beleuchtungssysteme

Konzepte und Limitationen am Beispiel Lithographie

Alois M. Herkommer

Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart

<mailto:herkommer@ito.uni-stuttgart.de>

Beleuchtungssysteme sind das Bindeglied zwischen den Eigenschaften der Lichtquelle und den gewünschten Anforderungen am Beleuchtungsort. Systeme mit variablen optischen Eigenschaften stellen dabei besonders hohe Anforderungen an den Beleuchtungs-Designer. Am Beispiel von variablen Beleuchtungssystemen der optischen Lithographie werden Systemkomponenten diskutiert und deren Eigenschaften im Phasenraum verdeutlicht.

1 Einführung

Die generische Aufgabe von Beleuchtungssystemen ist es die Orts- und Winkelverteilung der Lichtquelle derart umzuformen, dass die gewünschten Anforderungen am Beleuchtungsort realisiert werden. Insbesondere bei Systemen die eine möglichst hohe Effizienz, also geringe oder keine Verluste erfordern, ergeben sich durch die Lichtquelleneigenschaften verschiedenartige Randbedingungen an das optische Design und die Auswahl von Misch- und Optikkomponenten. Besondere Herausforderungen stellen dabei Systeme mit variablen optischen Eigenschaften dar.

Beleuchtungssysteme der Lithographie sind ein Beispiel für anspruchsvolle variable Beleuchtungssysteme. Es zeigt sich, dass eine Darstellung der Anforderungen und Komponenteneigenschaften im Phasenraum ein wertvolles Mittel für den Optikdesigner ist.

2 Anforderungen an Lithographie Beleuchtungssysteme

Die Auflösung von lithographischen Systemen ist gegeben durch die Rayleigh'sche Auflösungsformel:

$$CD = k_1 \cdot \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$

Entsprechend wurden im Zuge der Verkleinerung von elektronischen Strukturen und Schaltkreisen sowohl die numerische Apertur NA gesteigert, als auch die Wellenlänge reduziert. Um Belichtungsprozesse an der Auflösungsgrenze zu realisieren ist es jedoch weiterhin notwendig den k_1 -Faktor zu minimieren und gleichzeitig noch einen genügend hohen Kontrast zu erzielen. Dies ist über geeignete Wahl der Beleuchtungswinkel an der Maske (Beleuchtungspupille) möglich, wie in Abb. 1 dargestellt:

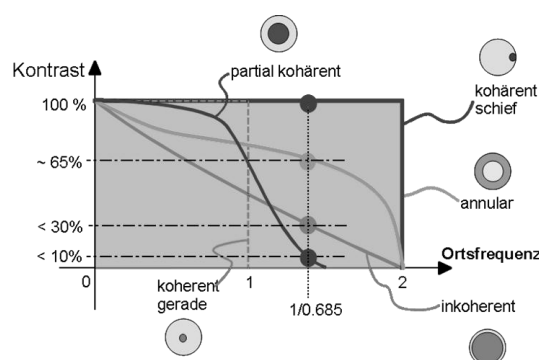


Abb. 1 Einfluss der Beleuchtungspupillenform auf die Auflösungsgrenze und den Kontrast für periodische Strukturen.

Ähnlich wie in der Mikroskopie [1] werden in der optischen Lithographie deshalb zunehmend komplexe Beleuchtungsarten, wie annulare Beleuchtung, Dipol/Quadrupol [2] oder Freiform-Pupillen eingesetzt [3] um kleinste lithographische Strukturen herzustellen. Da jede Maskenstruktur ihre eigene spezielle Beleuchtungspupille erfordert sind effiziente variable Beleuchtungssysteme erforderlich. Eine weitere Anforderung in der Lithographie ist, dass die komplette Maske unter identischen Bedingungen (Intensität, Pupillengeometrie) beleuchtet wird, also eine feldinvariante Pupille erzeugt wird.

3 Aufbau von Lithographie Beleuchtungssystemen

Um obige Anforderungen an variable Pupillenform und Feldinvariante Pupille zu erfüllen sind Beleuchtungssystem der Lithographie meist zweistufig aufgebaut. In einer 1.Stufe wird die Pupille geformt, in einem 2.Schritt wird die Pupille mittels Integralelementen über das Belichtungsfeld „kopiert“ [4].

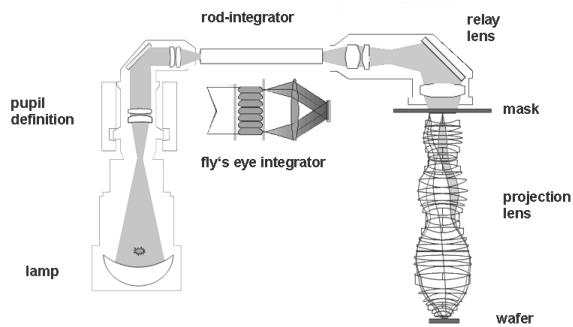


Abb. 2 Typischer Beleuchtungssystem der Lithographie

4 Interpretation im Phasenraum

Die Anforderungen an Beleuchtungssysteme lässt sich auf sehr anschauliche Weise im Phasenraum darstellen. Der Phasenraum ist eine Darstellung der Lichtverteilung über Ort (x,y) und Winkel (p,q). Vereinfacht auf einen 2-dimensionalen Fall, bzw. rotationssymmetrische Systeme lässt sich das Ziel-Phasenraumbild eine Lithographie-Beleuchtung folgendermaßen darstellen:

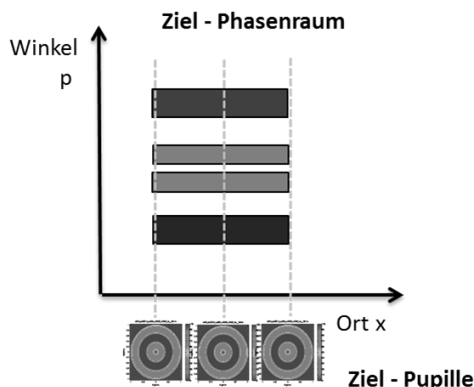


Abb. 3 Zweidimensionale Ziel-Phasenraumverteilung für eine strukturierte Beleuchtung (hier doppelt annular).

Da die Pupille feldinvariant sein muss, ergibt sich ein Streifenmuster in der Orts-Winkel-Darstellung in Abb. 3. Eine variable Beleuchtung erfordert demnach die Generierung eines variablen Streifenmusters im Phasenraum.

5 Etendue Betrachtung

Das beleuchtete Phasenraumvolumen entspricht der sog. Etendue des Systems.

$$Etendue = A \cdot \pi \cdot NA^2 \quad (2)$$

Die Etendue ist jedoch eine Erhaltungsgröße, daher muss die System-Etendue verglichen werden mit der Etendue der Quelle. Nur wenn die Etendue der Quelle kleiner ist als die Etendue des Systems ist eine verlustfreie variable Beleuchtung möglich.

Demensprechend bilden Lasersysteme wesentlich mehr Spielraum für verlustfreie variable Beleuchtung, als lampenbasierte Systeme.

6 Pupillenformung

Die Form der Pupille kann dabei zum Beispiel bei Laser-basierten Systemen durch den Einsatz von DOE und Zoom-Axikon Systemen realisiert werden [5]. In den modernsten Beleuchtungssystemen für Freiformpupillen erfolgt die Pupillenformen teilweise auch über programmierbare Elemente [6].

7 Wabenkondensoren als ideale Integratoren

Die lokal geformte Pupille muss mittels eines Integrator-Elements über das Feld kopiert werden. Die Phasenraumbetrachtung zeigt, dass hier ein Wabenkondensator ideal geeignet ist, da ein Wabenkondensator generisch ein gerades Streifenmuster im Phasenraum erzeugt [7] wie in Abb. 3, wohingegen ein Integrator-Stab zu diagonalen Streifen und Symmetrisierung führt. Es zeigt sich weiter dass das Konzept eines Wabenkondensators auch auf die nächste Generation von Lithographiesystemen bei EUV-Wellenlängen (13.5nm) angewandt werden kann um Feld- und Pupille zu formen [8].

8 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Analyse von Beleuchtungssystemen im Phasenraum ein extrem hilfreiches Instrument für den Beleuchtungsdesigner darstellt um komplexe, facettenreiche und variable Beleuchtungssysteme auszuliegen. Das Konzept lässt neben Lithographie sich auf andere Applikationen wie Solarkonzentratoren oder LED-Beleuchtung [7] übertragen.

Literatur

- [1] M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics", Pergamon Press.
- [2] Handbook of Optical Systems, Volume 2, Physical Image Formation, by Wolfgang Singer, Michael Totzeck, Herbert Gross, Wiley-VCH (2005).
- [3] A.E. Rosenbluth et al, "Optimum Mask and Source patterns to Print a given shape", SPIE Vol. 4346, (2001).
- [4] A. M. Herkommer, "Evolution of illumination systems in microlithography – a retrospective", Proc. SPIE 7652, (2010).
- [5] J. Wangler, US 5,675,401 (1995).
- [6] M. Mulder et. al., "Performance of a programmable illuminator", Proc. SPIE 7520, 75200Y (2009).
- [7] O. Dross et al. "Illumination optics: Köhler integration optics improve illumination homogeneity", Laser Focus World 45, (2009)
- [8] Katsuhiko Murakami et. al. "Development of optics for EUV lithography", Proc. SPIE 6517 (2007).