

Interferenzlithografie mit gesteuerter Belichtungsverteilung

M. Burkhardt*, R. Steiner*, A. Gatto*, S. Sinzinger**

*Carl Zeiss Jena GmbH, Carl-Zeiss-Promenade 10, 07745 Jena, Germany

** Technische Universität Ilmenau, Postfach 100565, 98684 Ilmenau, Germany

[mailto: matthias.burkhardt@zeiss.com](mailto:matthias.burkhardt@zeiss.com)

Die Interferenzlithografie stellt hohe Anforderungen an die Stabilität der Phasenlage der interferierenden Wellen. Eine Modifikation der räumlichen Intensitätsverteilung erscheint bei Berücksichtigung dieser Randbedingung als schwierig. Dennoch können wir zeigen, dass eine technologisch recht einfache Methode diese Bedingungen erfüllt.

1 Einführung

Bei der Herstellung holografischer Gitter mit hohen Passe- bzw. Ebenheitsforderungen muss u. a. eine homogene Intensitätsverteilung in der Belichtungsebene sicher gestellt sein. Lokale Schwankungen der mittleren eingeschriebenen Belichtungsenergie wirken sich auf den Abtrag des Fotoresists beim Entwickeln aus und resultieren damit in einer Dickenvariation der Resistmaske. Im für gewöhnlich nachfolgenden Ionenstrahlätzprozess würde diese Dickenvariation i. d. R. verstärkt übertragen. Resultierende Formfehler in der Größenordnung um 100nm sind inakzeptabel z.B. für Gitterapplikationen insbesondere im EUV-Bereich.

Das klassische Verfahren zur Erzielung einer ausreichend homogenen Intensitätsverteilung basiert auf der starken Aufweitung des Laserstrahls in Kombination mit einem Raumfilter bestehend aus Fokussieroptik+ Pinhole z.B. beschrieben in [1], [2]. Die Verteilung entspricht dann nahezu perfekt der Gaußverteilung des TEM₀₀-Modes und die Wellenfront ist dabei aberrationsfrei.

2 Motivation

Energetisch stellt die einfache Aufweitung des Gaußstrahles eine ungünstige Lösung dar, wie beispielhaft für einen Randabfall von 5% in Abb.1 veranschaulicht wurde.

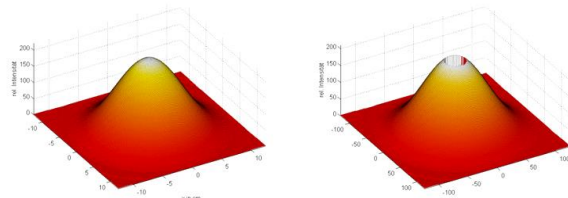


Abb. 1 Veranschaulichung der energetischen Effizienz, links: Laterale Intensitätsverteilung des Gaußpeaks, rechts: ungenutzter Anteil ca. 95% bei 5% Randabfall

Insbesondere bei holografischer Realisierung sehr ausgedehnter Gitterflächen ergeben sich unter

Berücksichtigung üblicher Homogenitätsanforderungen, z.B. besser 5%, sehr lange und oft aus Stabilitätsgründen kaum mehr beherrschbare Belichtungszeiten. Bei einer Intensitätsvariation (Randabfall) von maximal 5% ergibt sich beispielsweise ein Anteil ausgeblendeter Laserstrahlung von 95%! Auf der anderen Seite ist die Leistung geeigneter kommerziell verfügbarer Laser auf maximal einige Watt begrenzt.

3 Prinzip der Homogenisierung

Eine wesentliche Voraussetzung für die Methode einer variierenden Pupillenausleuchtung ist eine Fokussieroptik mit einer ausreichenden Öffnungsreserve. D. h., der eingangsseitig freie nutzbare Durchmesser der Optik muss deutlich größer sein als der einfallende Laserstrahl. Typische Laserstrahl-Durchmesser liegen bei ca. 1mm. Wird hier ein Mikroskopobjektiv verwendet, ist diese Bedingung bereits erfüllt (\varnothing ca. 7mm). Der korrigierte Öffnungsfehler ermöglicht einen entsprechend beugungsbegrenzten Fokus für beliebige Intensitätsverteilungen in der Pupillenebene.

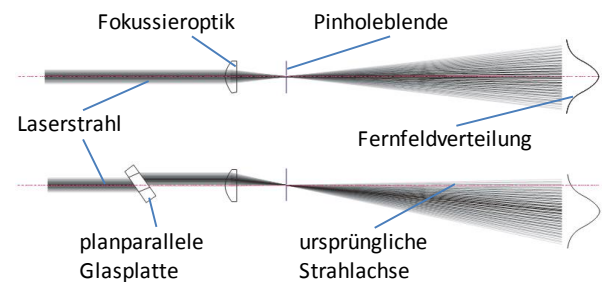


Abb. 2 Prinzip der Verschiebung des Schwerpunktes der Gaußverteilung im Fernfeld durch parallelversetzen Eingangsstrahl

Die Fokusverteilung wird bei einem leichten Parallelversatz des Lasers mittels Periskop oder geneigter planparalleler Glasplatte (Abb. 2 unten) nicht verändert. Jedoch wird durch die veränderte Einfallrichtung auch der Richtungsschwerpunkt der Strahlung nach dem Pinhole bestimmt. So ergibt sich ein lateraler Versatz der Intensitätsverteilung

auf einem Schirm bzw. innerhalb der Öffnung einer Kollimationsoptik nach der Strahlaufweitung.

Der geringe Neigungswinkel des Schwerpunkstrahles zur optischen Achse ist unkritisch wenn die Geometrie der Pinholeblende (dünne Metallfolie) gut definiert ist. Dies ist mit Ausnahme der Raumfilter für Hochleistungs-Pulslaser [3] i.d.R. gegeben. Die Lokalisierung des Laserlichts in der Fokusebene auf einen räumlichen Bereich innerhalb des ortsfestes Pinholes garantiert eine aberrationsfreie sphärische Wellenfront (ideale Punktlichtquelle). Mit einem angepassten Interferometeraufbau wurde die konstante räumliche Lage und Form der Wellenfronten bei bewegter Ausleuchtung experimentell verifiziert.

Ein nächster Schritt besteht nun in der kontinuierlichen Bewegung der Fernfeldverteilung zur Erzielung einer durch zeitliche Mittelung entstehenden Energieverteilung. Mit einer besonders einfachen Lösung lässt sich z. B. eine rotationssymmetrische Verteilung erzeugen, die im zentralen Bereich gegenüber der ursprünglichen Gaußverteilung deutlich abgeflachter ausfällt. Dazu wird das Element rotiert, welches den lateralen Strahlversatz verursacht. Laserstrahlachse und Rotationsachse sind dabei identisch oder zumindest parallel.

4 Bestimmung der Strahlausnutzung bei rotierter der Intensitätsverteilung

Durch numerische Integration einer gemessenen Verteilung, oder vereinfacht, durch die Annahme einer 2D-Gaußverteilung, durch welche der aufgeweitete und gefilterte TEM₀₀-Mode sehr gut beschrieben wird, lässt sich der nutzbare Anteil der Laserstrahlung leicht abschätzen (Gleichung 1).

$$f(x, y) = A \cdot e^{-\frac{1}{2} \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{\sigma^2}} \quad (1)$$

Vereinfacht wird dabei für beide Strahlachsen ein identischer Wert für σ angenommen. Die Faltung der Strahl-Verteilungsfunktion mit einem Kreis mit Radius r als Raumkurve, wie in Abb. 3 links dargestellt, ergibt die homogenisierte Energieverteilung (Abb.3 rechts).

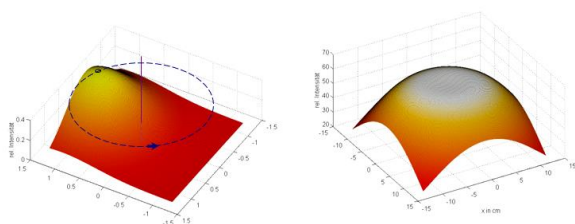


Abb. 3 Prinzip der Homogenisierung, links – Bewegung der Gaußverteilung (Intensität) entlang einer Kreisbahn mit dem Radius r , rechts – resultierende Energieverteilung in einer Schirmebene

Im praktischen Anwendungsfall muss dabei genau eine Drehung um 360° oder ein Vielfaches davon realisiert werden.

Unter Verwendung eines σ/r -Verhältnisses von z.B. 0,69 ergibt die Berechnung einen abgeflachten zentralen Bereich mit einer Variation der eingeschriebenen Energie von lediglich 0,25%. Die Ausnutzung des Strahl-Querschnittes beträgt dabei ca. 7%. Erlaubt man dagegen mittlere lokale Energieunterschiede von bis zu 5% ($\sigma/r=0,631$), dann lässt sich der aufgeweitete Strahl zu mehr als 28% ausnutzen – eine effektive Effizienzsteigerung um mehr als das Fünffache. Abb.4 stellt den Querschnitt der resultierenden Verteilung dem der ursprünglichen gegenüber.

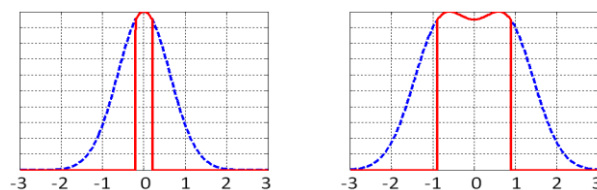


Abb. 4 Vergleich der nutzbaren Anteile (rote Linie) bei Gaußverteilung (links) und rotierter Gaußverteilung mit einem σ/r -Verhältnis von 0,631 (rechts)

Die Energieverteilung weist im letzten Fall ein lokales Minimum im Zentrum auf. Mit vergrößertem σ/r -Verhältnis wird dieses Minimum ausgeprägter. Eine derartige Verteilung kann vorteilhaft zum Erreichen konstanter Strukturiefen bei der Belichtung hoch geöffneter holografischer Linsen oder abbildender Gitter auf stark gekrümmten Trägern verwendet werden.

Zusammenfassung

Die vorgestellte Methode zur Homogenisierung der Energieverteilung im Umfeld der Interferenzlithografie basiert auf einem zeitlich gesteuerten lateralen Versatz des Laserstrahls vor der Aufweitungseinheit. Durch Anwendung der strahlversetzenden Komponente vor einem Strahlteiler kann die Methode auch in Zweistrahlbauten angewendet werden. Alle übrigen Komponenten werden beibehalten. Insbesondere wird die Raum-Filterung des Laserstrahls nicht nachteilig beeinflusst und die Wellenfront behält ihre ideale Form.

Literatur

- [1] J. Goodman: „Introduction to Fourier Optics“, Roberts and Company Publishers, (2004) ISBN-10: 0974707724
- [2] A. K. Potemkin, et. al.: „Spatial filters for high-peak-power multistage laser amplifiers“ in: APPLIED OPTICS, Vol. 46, No. 20, (2007)
- [3] P. M. Celliers, et. al.: „Spatial filter pinhole for high-energy lasers“ in: APPLIED OPTICS, Vol. 37, No. 12, (1998)