

마스크 뒷면에 2 위상 회절 격자를 구현한 변형 조명 방법

Modified Illumination by Binary Phase Diffractive Patterns on the Backside of a Photomask

이재철^{1,a}, 오용호¹, 고춘수¹
(Jai-Cheol Lee^{1,a}, Yong-Ho Oh¹, and Chun Soo Go¹)

Abstract

We propose a method that realizes the modified illumination by implementing a binary phase grating at the backside of a photomask. By modeling the relationship between the shape of a grating on the photomask and the light intensity at the pupil plane, we developed a program named MIDAS that finds the optimum grating pattern with a stochastic approach. After applying the program to several examples, we found that the program finds the grating pattern for the modified illumination that we want. By applying the grating at the backside of a photomask, the light efficiency of modified illumination may be improved.

Key Words : Modified illumination, Diffraction grating, Annular illumination, Quadrupole illumination, Deep submicron lithography

1. 서 론

변형조명 기술은 리소그래피 광학계에서 조명계(정확하게는 조명 구경)의 중심 부분을 차폐함으로써 포토마스크에 사입사(oblique) 조명을 만들어 해상도를 증가시키고자 하는 것이다. 전통적으로 많이 사용되던 고리형(annular)조명[1,2]과 1990년대 초에 개발된 4극(quadrupole)조명[3,4]이 대표적으로 널리 사용되고 있는 변형조명 기법이다. 이러한 조명계의 모양은 공정하고자 하는 패턴의 크기 및 모양에 따라 최적의 모양이 달라 통상적으로 최소선폭에 그 최적화 기준을 맞추어 사용하고 있다. 변형조명의 사용은 상당히 간편하면서도 이론적으로 최대 2배까지 해상도를 증가시킬 수 있지만 몇 가지 근본적인 문제점을 갖고 있다. 첫째는 광축(optical axis)을 사용하지 않는 광학계를 구성함에 따라 광량이 현격하게 떨어져서 생산성

(throughput)이 떨어진다는 것이다. 광량 저하의 원인은 전통적인 광학설계가 광축을 중심으로 발전되어 왔고 대부분의 설계는 광축을 중심으로 가우시안(Gaussian)과 같은 형태의 광량 분포를 가지게 되며 이는 리소그래피 광학계에서도 마찬가지이다. 따라서 중심을 차단하는 것은 상당 부분의 광량 손실을 감수할 수 밖에 없다. 둘째는 마스크 패턴의 크기 및 모양에 따라 최적의 조명 조건이 다르며 어느 한 패턴에 조명을 최적화하면 다른 패턴에서는 오히려 악영향을 끼칠 수 있다는 것이다. 현재는 최소선폭을 갖는 패턴에 최적화를 하고 나머지 부분은 광근접효과 보정을 통해 공정을 진행하고 있으나 리소그래피 성능을 최대화 시켜야 하는 차세대 공정에서는 큰 부담일 수 밖에 없다.

이와 같은 문제점을 극복하고자 1990년대 초에 스테퍼 광학계를 변형하지 않고 마스크의 뒷면에 회절패턴을 형성하여 사입사 조명의 효과를 내고자 하는 모조 회절 마스크(dummy diffraction mask) 방법이 개발되었다[5]. 그러나 이 방법은 단순한 위상격자 패턴을 사용함으로써 2극조명, 4극조명 수준의 효과 밖에는 내지 못하고 있으며, 조금 더 복잡한 형태의 조명이 필요할 경우 이에 적합한 회절패턴을 찾아내는 일은 쉬운 일이 아니다.

1. 원광대학교 전기전자 및 정보공학부
(전북 익산시 신용동 344-2)
a. Corresponding Author : jcllee@wonkwang.ac.kr
접수일자 : 2004. 4. 26
1차 심사 : 2004. 5. 8
심사완료 : 2004. 5. 17

이 논문에서는 사용자가 원하는 변형조명을 구현할 수 있는 회절패턴을 거의 아무런 제약조건 없이 설계할 수 있는 프로그램을 제작하고 이를 몇 가지 예제에 적용하였다. 이 프로그램의 기본 전략은 몬테 칼로 방법을 통한 최적화 알고리즘을 사용하였으며, 개발된 프로그램의 이름은 MIDAS(Modified Illumination by DOE Assisted Structure)로 명명하였다. 제2장에서는 MIDAS에서 채택하고 있는 모델방정식에 대한 설명을 하고, 3장에서는 몬테 칼로 알고리즘을 기반으로 한 프로그램의 알고리즘에 대한 설명을, 4장에서는 제작된 프로그램을 사용하여 도출한 몇 가지 예를 보이고 그 유용성을 논하며, 마지막으로 제5장에서 결론을 맺는다.

2. 기본 개념과 이론에 기반을 둔 모델

MIDAS에 사용된 모델 방정식은 기본적으로 NA가 낮은 시스템에 적합한 스칼라 회절 이론에 근거를 두었다. 스칼라 회절 이론을 사용한 배경은 이 프로그램이 추구하는 범위가 단순히 투영광학계의 동공(pupil)면에서 조명을 형성하는 것이기 때문에 사용되는 NA값은 웨이퍼 쪽에서가 아니라 마스크 쪽에서의 NA값이므로 통상적인 4:1 축소 광학계를 생각하면 NA=0.8인 시스템의 마스크 쪽 NA는 0.2로 충분히 낮은 NA이므로 접근 가능한 방법이기 때문이다.

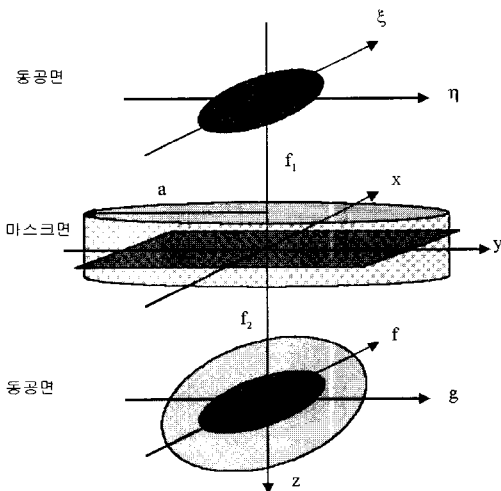


그림 1. 리소그래피 시스템의 개략적 모델.

Fig. 1. Schematic modeling of illumination system.

리소그래피 조명계는 그림 1과 같이 간단하게 모델링할 수 있으며 이 때, 구경면에서의 엇결성의 (incoherent) 광분포를 $I_o(\xi, \eta)$ 라고 하고, 마스크 뒷면의 회절패턴 함수를 $F(x, y)$, 동공면에서의 광분포를 $I(f, g)$ 라고 하면

$$I(f, g) = C_0 \iint d\xi d\eta I_o(\xi, \eta) \left| \iint dx dy F(x, y) e^{\frac{2\pi i}{\lambda} \left[\left(\frac{\xi - f}{f_1 - f_2} \right)^2 + \left(\frac{\eta - g}{f_1 - f_2} \right)^2 \right]} \right|^2 \quad (1)$$

로 주어진다. (이후 모든 방정식에서 논의와 무관한 비례상수 C_0 및 그의 변화는 생략하고 표현한다.) 여기서

$$\frac{\xi}{f_1} = \frac{\xi}{a} (\sigma NA) = (\sigma NA) \bar{\xi}, \quad \frac{\eta}{f_1} = \frac{\eta}{a} (\sigma NA) = (\sigma NA) \bar{\eta}$$

$$\frac{f}{f_2} = \frac{f}{a} (NA) = (NA) \bar{f}, \quad \frac{g}{f_2} = \frac{g}{a} (NA) = (NA) \bar{g}$$

로 규격화하면

$$I(\bar{f}, \bar{g}) = \iint d\bar{\xi} d\bar{\eta} I_o(\bar{\xi}, \bar{\eta}) \left| \iint dx dy F(x, y) e^{\frac{2\pi i NA}{\lambda} \left[(\sigma \bar{\xi} - \bar{f})^2 + (\sigma \bar{\eta} - \bar{g})^2 \right]} \right|^2 \quad (2)$$

이 된다.

여기서 격자 모양을 지칭하는 마스크 함수를 주기가 p_x, p_y 인 주기함수라고 가정하면 푸리에 급수로 표현이 가능하여

$$F(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{mn} e^{2\pi i \left(\frac{m}{p_x} x + \frac{n}{p_y} y \right)} \quad (3)$$

으로 쓸 수 있으며 이 때 각 푸리에 계수는

$$C_{mn} = \frac{1}{p_x p_y} \int_0^{p_x} \int_0^{p_y} dx dy F(x, y) e^{-2\pi i \left(\frac{m}{p_x} x + \frac{n}{p_y} y \right)} \quad (4)$$

로 주어진다.

이와 같은 주기 함수를 가정하면 동공 면에서의 광분포는

$$I(\bar{f}, \bar{g}) = \sum_{mn} |C_{mn}|^2 I_o \left[\frac{1}{\sigma} \left(\bar{f} + \frac{m}{p_x} \right), \frac{1}{\sigma} \left(\bar{g} + \frac{n}{p_y} \right) \right] \quad (5)$$

이 된다. 여기서 마스크 함수에서 거리 차원은

$$\bar{x} \equiv x \left(\frac{NA}{\lambda} \right), \quad \bar{y} \equiv y \left(\frac{NA}{\lambda} \right),$$

$$\bar{p}_x \equiv p_x \left(\frac{NA}{\lambda} \right), \quad \bar{p}_y \equiv p_y \left(\frac{NA}{\lambda} \right)$$

으로 규격화 하였다.

식 (5)을 살펴볼 때 I는 조명 구경의 영상을 나타내고 있으므로, 동공 면에서의 광분포는 (m/p_x, n/p_y)에 중심을 둔 조명계 구경의 각각의 상들이 중첩하여 형성되는 것을 알 수 있다. 이 때 각 구경 상들의 위치는 (m, n)차 회절광이, 광강도는 C_{mn} 즉 격자 모양의 푸리에 계수가 결정하고 있다. 결국 동공 면에서의 특정한 광분포를 만들고자 하면 푸리에 계수, 즉 마스크를 변화시키면서 목적하는 분포에 가장 가까운 형태를 찾는 일이 된다.

3. 격자 모양 설계를 위한 알고리즘

그림 2는 MIDAS의 알고리즘에 대한 흐름도이다. 투영광학계의 동공 면에서 사용자가 설정한 목표 이미지를 가장 정확하게 구현할 수 있는 회절 패턴을 찾는 것이 본 프로그램의 목적이며 이를 달성하기 위한 방법으로 몬테 칼로 방법을 도입하였다.

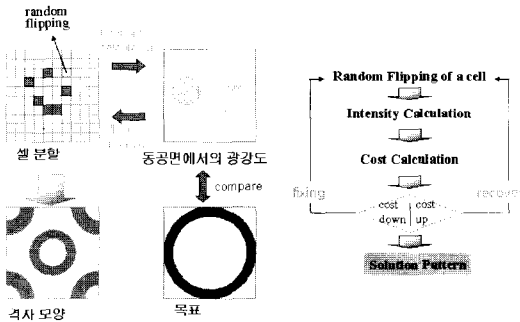


그림 2. MIDAS 프로그램 개요.
Fig. 2. Simplified view of MIDAS program.

먼저 마스크의 한 주기 내의 공간을 4각형의 셀 (cell) 단위로 나누어 처리하는 방법을 택하였으며, 이 중 무작위로 선택한 셀의 상태를 바꾸어 공간 이미지를 계산한다. 재계산된 공간 이미지의 모양이 이전의 모양보다 향상되면(목표 이미지에 가까우면) 선택된 변화된 셀의 특성을 채택하고, 그렇지 않으면 본래의 특성으로 되돌린다. 이러한 과정

을 더 이상 공간 이미지 모양의 향상이 없을 때까지 반복한다. 이 과정에서 완성된 회절 패턴을 얻게 된다.

4. 사용 예

제작된 프로그램의 효용성을 테스트하기 위하여 4극(quadrupole), 고리(annular) 등의 기초적인 변형 조명을 대상으로 설정하여 MIDAS를 적용해 보았다. 이 때 노광장비에 관한 조건은 모두 KrF 광원 (248 nm), 0.8 NA 투영, 0.3 σ 진동 조명으로 설정하였다.

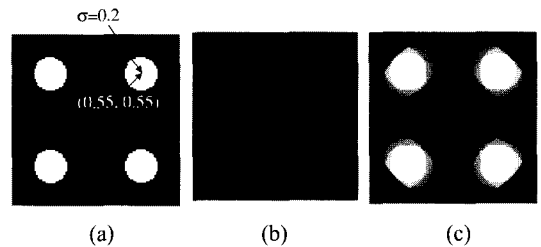


그림 3. 4극 조명을 구현하기 위한 회절격자 모양.
(a) 동공면에서의 광강도: 목표
(b) 격자 모양(위상 0, π)
(c) 동공면에서의 광강도: 시뮬레이션 결과

Fig. 3. Diffraction grating pattern for quadrupole illumination.

- (a) Light intensity at the pupil plane: target
- (b) Diffraction grating(phase 0 and π)
- (c) Light intensity at the pupil plane: simulation result

그림 3은 4극 조명에 적용한 예이다. (a)에서 보듯이 대상은 (0.55, 0.55)위치에 $\sigma=0.2$ 인 4극 조명으로 설정하였고 이를 형성하기 위한 회절 패턴의 주기는 x, y 모두 4 μm (1 X 배)로 설정하였다. 이 때 회절 패턴은 0, π 의 2개의 위상을 갖는 것으로 가정하였다. 이 경우 (b)에는 회절 패턴의 모양을 (c)에는 (b)의 패턴을 사용했을 경우의 투영 렌즈의 동공에서의 광강분포를 보였다. 예측했던 바와 같이 (b)의 회절 패턴 결과는 이론적으로 어느 정도 예측 가능한 결과이고, (c)의 결과에서 보면 원래 조명($\sigma=0.3$)보다 더 작은 목표($\sigma=0.2$)를 형성하기 위하여 몇 개의 큰 광원들이 중첩하고 있음을 알 수 있다.

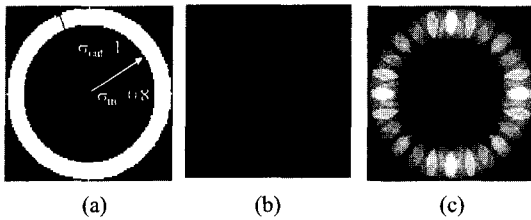


그림 4. 고리 조명을 구현하기 위한 회절격자 모양.
 (a) 동공면에서의 광강도: 목표
 (b) 격자 모양(위상 0, π)
 (c) 동공면에서의 광강도: 시뮬레이션 결과

Fig. 4. Diffraction grating pattern for annular illumination.
 (a) Light intensity at the pupil plane: target
 (b) Diffraction Grating(phase 0 and π)
 (c) Light intensity at the pupil plane: simulation result

그림 4는 고리 조명을 얻기 위한 회절 패턴에 관한 것이다. 이는 간단한 이론으로는 예측하기 힘든 일이다. 대상은 내부 $\sigma = 0.8$, 외부 $\sigma = 1.0$ 인 고리조명 형태이며 이것 역시 원점 대칭의 구조이므로 패턴의 셀 상태는 0, π 의 2개의 위상을 갖도록 하였다. 동공 면에서의 광량 분포를 보면 이 역시 많은 원래 광원의 구경 모양의 분포가 중첩되어 고리 조명을 형성함을 알 수 있으며 시뮬레이션 결과는 균일성이 떨어지는 현상을 보이고 있으나 이는 회절 패턴의 주기를 크게 가져가면 해결 가능한 문제이다.

5. 결론

포토마스크의 뒷면에 격자 모양을 배치하면 변형조명 효과를 얻을 수 있으나 원하는 조명에 맞는 격자 모양을 설계하는 일은 쉽지 않다. 이 연구에서는 마스크의 뒷면에 놓인 격자 모양과 투영 렌즈의 동공 면 상의 광량분포와의 관계를 간단한 모델로써 규명하고, 이 관계식을 이용하여 원하는 조명을 얻기 위한 격자 모양을 설계할 수 있는 프로그램인 MIDAS를 제작하였다. 이를 몇 가지 예제에 적용하여 본 결과 원하는 변형조명을 잘 구현할 수 있다는 결과를 얻었으며 이와 같은 격자의 사용은 광효율을 높일 수 있을 것으로 기대된다. 이에 대한 연구는 계속 진행 중이며 조만간 보고하겠다.

감사의 글

본 연구는 2002년 원광대학교 교내연구비의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] G. O Reynolds, "A concept for a high resolution optical lithographic system for producing one half micron linewidths", SPIE Optical Microlithography, p. 228, 1986.
- [2] K. Kamon, T. Miyamoto, Y. Myoi, H. Nagata, M. Tanaka, and K. Horie, "Photographic system using annular illumination", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 30, No. 11B, p. 3021, 1991.
- [3] M. Noguchi, M. Muraki, Y. Iwasaki, and A. Suzuki, "Subhalf micron lithography system with phase shifting effect", SPIE Optical Microlithography, p. 92, 1992.
- [4] H. Y. Kang, C. H. Kim, J. H. Lee, W. S. Han, and Y. B. Koh, "High performance lithography with advanced modified illumination", IEEE Trans. on Electronics, Vol. 77 C, No. 3, p. 432, 1994.
- [5] D. H. Kim, B. S. Park, H. B. Chung, J. H. Lee, H. J. Yoo, and Y. H. Oh, "KrF excimer laser lithography with a dummy diffraction mask", J. of Korean Phys., Soc., Vol. 29, No. 3, p. 317, 1996.