

마스크 뒷면에 동심원 격자를 사용한 변형조명 방법

Modified Illumination with a Concentric Circular Grating at the Backside of a Photomask

오용호¹, 고춘수², 임성우², 이재철^{1,a}

(Yong-Ho Oh¹, Chun Soo Go², Sungwoo Lim², and Jai-Cheol Lee^{1,a})

Abstract

Modified illumination techniques have been used to enhance the resolution of the sub-wavelength lithography. But, since they shield the central part of incident light, the light efficiency is seriously degraded, which in turn reduces the throughput of a lithography process. In this research, we introduced an annular illumination structure that enhances the light efficiency with a concentric circular grating at the backside of a photomask. The efficiency of the structure was theoretically analyzed.

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

1. 서 론

그림 1에 보인 것과 같은 사극(quadrupole) [1,2], 고리(annular)[3,4] 등의 변형조명은 파장보다 작은 패턴을 구현하기 위한 광리소그래피의 해상력 향상 기술의 대표적인 기술로서 널리 사용되고 있다. 이와 같은 변형 조명은 노광 시스템의 구경(aperture)에 4극 또는 고리형 조명 구조를 구현함으로써 아주 쉽게 적용할 수 있으며 따라서 실제 생산공정에 빠르게 적용되어 널리 쓰이고 있다. 물론 조명계의 최적 조건(구경, 위치 등)은 구현하고자 하는 패턴의 크기 및 모양에 따라 달라진다. 따라서 일반적으로는 최소선폭을 가정하고 최적화 조건을 구한 뒤 이 조건을 대부분의 패턴에 적용하고 있다.

변형조명은 매우 사용하기 쉬우면서도 이론적으로 최대 2배까지 해상도를 증가시킬 수 있다. 그러

나 전통적인 방법은 파장보다 작은 패턴의 해상력을 높이는데 큰 도움이 되지만 조명계의 중심 부분을 차폐함으로써 광원의 대부분을 손실하게 되어 생산성을 저하시키는 큰 단점이 있었다. 최근 조명계의 중심을 차폐하는 대신 구경면에 격자를 사용하는 방법으로 효율을 많이 저하시키지 않고 변형조명을 사용하는 방법이 개발되었으나 가격이 비싼 단점이 있다.

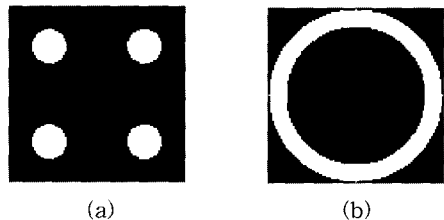


그림 1. 많이 사용되는 변형 조명.

- (a) 4극 조명
- (b) 고리형 조명

Fig. 1. Modified illumination methods that are widely used.

- (a) Quadrupole illumination
- (b) Annular illumination

1. 원광대학교 전기 전자 및 정보공학부
2. 원광대학교 자연과학부
(전북 익산시 신원동 344-2)
a. Corresponding Author : jcle@wonkwang.ac.kr
접수일자 : 2004. 12. 7
1차 심사 : 2005. 1. 11
심사완료 : 2005. 1. 14

구경면에 변형 조명을 구현하는 대신 마스크의 뒷면에 반복선, 바둑판 무늬 등 단순한 형태의 위상 격자를 형성함으로써 2극, 또는 4극 등의 변형 조명을 구현할 수 있는 방법이 보고되었다[5]. 그러나 이 방법으로는 고리형 조명 등 조금 더 복잡한 형태의 조명을 구현하기 위한 회절 격자의 형태를 쉽게 구할 수 없었다. 이를 개선하기 위해 문테 칼로 방법을 사용하여 어떤 변형조명이든지 구현할 수 있는 회절패턴을 거의 아무런 제약조건 없이 설계할 수 있는 프로그램이[6] 개발된 바 있다. 이 프로그램을 사용하면 고리형 조명 등 대칭적인 구조 뿐 아니라 비대칭 구조까지도 구현할 수 있는 조명 구조를 회절 격자 형태를 구할 수 있었다. 그러나 이 경우에도 입사한 모든 빛이 변형 조명에 사용되는 것이 아니며 일부는 원하지 않는 곳으로 누설되어 효율을 떨어뜨리는 문제가 있었다.

수직인 입사광이 광축에 대하여 방사상으로 대칭적일 때 동심원 회절 격자에 의한 상은 원형이 된다. 이 논문에서는 시뮬레이션을 통하여 이와 같은 방법으로 고리형 조명을 형성할 수 있음을 보이고 이러한 방법이 조명 조리개의 중심부 차폐 방식으로 변형 조명을 구현하는 것보다 광효율 측면에서 보다 효율적임을 보였다. 제2장에서는 근거가 되는 이론을 보이고 구현된 격자의 효율을 계산하였다. 제3장에서는 제2장의 결과를 토대로 이 방법의 유용성과 문제점 및 미래 연구 방향에 대해 논의 한다.

2. 이론과 시뮬레이션 결과

먼저 수직인 조명($\sigma=0$)의 조건에서, 마스크의 뒷면에 패턴이 있으면 근사적으로 이의 회절 패턴이 투영 렌즈의 동공면에 형성된다. 뒷면에 새겨진 패턴이 그림 2와 같이 위상차가 Φ 인 고리형태의 무늬라고 하면 동공면에서의 광량은

$$U(\beta) = Ce^{i\phi} \left[r_2^2 \frac{J_1(r_2\beta)}{r_2\beta} - r_1^2 \frac{J_1(r_1\beta)}{r_1\beta} \right], \quad (1)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta$$

으로 주어진다[7]. 여기서 λ 은 입사광의 파장, r_1 , r_2 는 각각 내부 및 외부 반지름을, θ 는 회절각을 나타내며 J_1 은 제1차 베셀 함수를 의미한다. 따라서

이러한 고리형 패턴이 동심원 형태로 반복적으로 존재할 경우 회절 패턴의 광강도는

$$I(\beta) = \left| Ce^{i\phi_0} r_0^2 \frac{J_1(r_0\beta)}{r_0\beta} + \sum_{n=1}^{N-1} U_n(\beta) \right|^2 \quad (2)$$

$$U_n(\beta) = Ce^{i\phi_n} \left[r_n^2 \frac{J_1(r_n\beta)}{r_n\beta} - r_{n-1}^2 \frac{J_1(r_{n-1}\beta)}{r_{n-1}\beta} \right] \quad (3)$$

$$r_0 = r_n - r_{n-1}$$

으로 주어지게 된다.

이론적으로는 톱니형 격자를 구현하여 특정 차수에 대부분의 회절광을 모으는 것이 가장 이상적이다. 그러나 톱니형 격자를 구현하기는 힘들므로 이를 방사 방향으로 주기적인 회절 격자를 계단형으로 구현하면 톱니형 격자를 근사적으로 만들 수 있으며, 이를 통과한 회절광이 특정 차수의 위치에 고리형 피크를 형성할 수 있다.

마스크의 뒷면에 그림 3과 같은 패턴을 형성했을 경우의 회절 패턴을 그림 4에 보였다. 그림 4에 보이는 것처럼 입사광의 대부분의 광량은

$$\sin \theta_n = n\lambda / p \quad (4)$$

의 위치에서 나타나게 된다. 이 때 n 은 회절 차수이며 p 는 주기를 의미한다. 이 중 $n=1$ 인 1차 회절

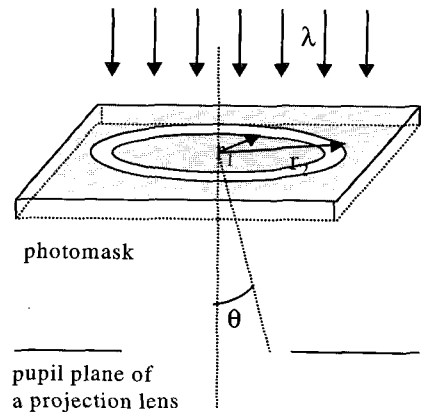


그림 2. 고리형 구경의 프라운호퍼 회절 개념도.
Fig. 2. Fraunhofer diffraction annular aperture.

패턴을 활용하면 고리형 조명을 구현할 수 있게 된다. 이 때 광효율은 톱니형 격자를 구현하기 위한 위상 단계수에 따라 차이를 보이게 된다.

노광 시스템에서는 구경의 크기가 있으므로 수직인 입사만이 존재하는 것은 아니다. 그러나 구경면의 조명은 엇걸의(incoherent) 점광원의 집합으로 가정할 수 있으므로 수직인 조명의 경우와 비교할 때 회절 패턴의 한 점이 구경의 모양과 크기 그대로를 대체한다고 생각할 수 있을 것이다. 따라서 크기가 σ 인 전통 조명 구경을 사용한 노광 시스템에서 그림 2와 같은 패턴을 포토마스크의 뒷면에 형성했을 경우 동공면에서는 이 구경의 투영상들이 폭이 2σ 인 고리형태로 분포하게 될 것이다.

$\sigma_{in}=0.7$, $\sigma_{out}=1$ 인 고리형 조명을 가정하고 통상적인 변형조명과 광효율을 비교하였다. 통상적인 변형조명의 경우 구경에서의 광강도가 균일하게 분포한다고 가정하고 이를 면적비로 나타낼 수 있으므로 광 효율이 약 50 %라고 할 수 있다. 이 논문에서 제안한 경우에는 $\sigma=0.15$ 인 광원을 사용하고 회절 패턴을 사용할 경우 그림 3에서 볼 수 있듯이 2 개의 위상을 사용할 경우 79 %, 8 위상의 경우 93 % 이상의 광 효율이 기대되므로 30 % 이상의 효율 증가를 얻을 수 있다. 이상의 논의는 구경에서의 광분포가 균일함을 가정한 결과이지만 실제 노광 시스템에서는 가우시안 (Gaussian) 분포와

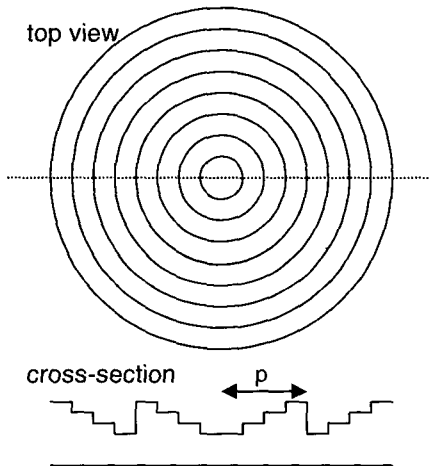
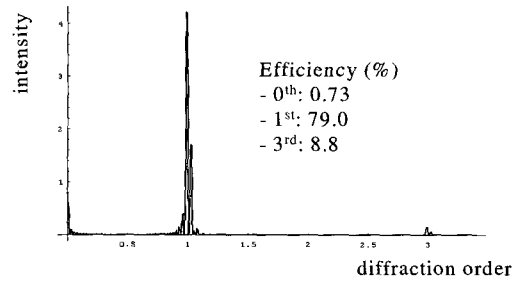


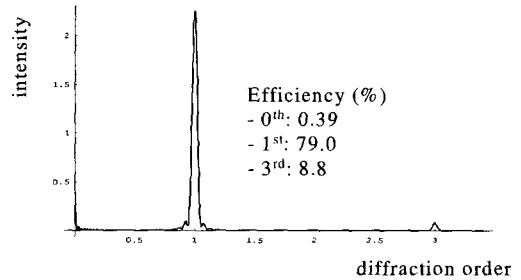
그림 3. 동심원 구조의 톱니 격자를 4개의 단계로 근사한 예.

Fig. 3. Concentric saw-tooth grating with 4 phase steps.

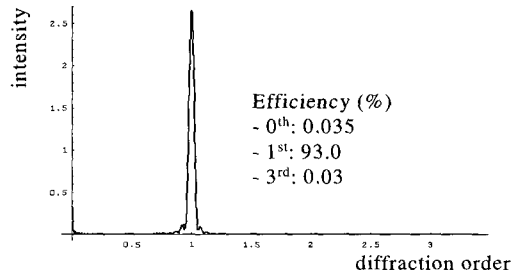
같이 광축에서 멀어질수록 광강도가 낮아지는 분포를 보이기 때문에 광효율의 증가는 훨씬 두드러지게 나타날 것이다.



(a)



(b)



(c)

그림 4. 동심원 구조의 톱니형 위상 격자의 회절 패턴(20 주기).

- (a) 2단계 위상 ($0, \pi$)
- (b) 4 단계 위상 ($0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$)
- (c) 8 단계 위상 ($0, \pi/4, \dots, 7\pi/4$)

Fig. 4. Diffraction patterns of concentric saw-tooth phase gratings(20 periods)

- (a) Binary phase steps ($0, \pi$)
- (b) 4 phase steps ($0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$)
- (c) 8 phase steps ($0, \pi/4, \dots, 7\pi/4$)

3. 결 론

광리소그래피의 노광 시스템에서 포토마스크의 뒷면에 주기적인 동심원 위상 격자 패턴을 형성하고 전통 조명을 사용하면 구경 크기만한 폭을 갖는 고리형 조명을 형성할 수 있음을 보였다. 이 때 조명의 위치는 패턴의 주기로 조절할 수 있다. 이와 같은 조명을 사용했을 경우와 일반적인 고리형 조명의 경우 광 효율을 시뮬레이션을 통해 비교해 본 결과 2개의 위상을 사용할 경우에도 30 % 이상의 증가 효과가 있음을 알 수 있었다. 물론 4위상이나 8위상을 사용하면 광효율을 더 높일 수 있으나, 4위상을 구현하기 위해서는 최소 2장, 8위상은 3개의 마스크를 사용하여야 하며 이 때 마스크 사이의 정렬 오차 및 식각 깊이 오차 등으로 인해 정확한 고리 조명의 구현이 어려워질 것으로 예상된다.

몬테 칼로 방법을 통해 구한 회절 격자를 사용한 변형조명 방법과 이 논문에 제시된 변형 조명 방법을 실제로 구현할 때 따르는 문제점에 대해서는 반도체 제조회사와 공동 연구를 진행 중이며 이에 대해서는 추후에 보고하도록 하겠다.

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.

[6] 이재철, 오용호, 고춘수, "마스크 뒷면에 2 위상 회절 격자를 구현한 변형 조명 방법", 전기전자재료학회논문지, 17권, 7호, p. 697, 2004.

[7] M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics", Pergamon Press, Oxford, p. 395, 1985.