

디지털 홀로그래피 현미경을 이용한 위상차 포토마스크 결합 측정

조형준 · 임진웅 · 김두철 · 유영훈[†]

제주대학교 물리학과

☎ 690-756 제주시 아라 1동 1번지

신상훈

AP & Tec

☎ 135-539 AP & Tec., 서울 성동구 행당동

(2007년 8월 16일 받음, 2007년 10월 7일 수정본 받음)

디지털 홀로그래피 현미경을 이용하여 반도체 공정에 사용되는 위상차 포토마스크의 결합을 측정하였다. 이러한 위상차 포토마스크는 위상차를 이용하여 반도체 문양을 만들기 때문에 일반 현미경으로는 패턴을 알 수 없을 뿐 아니라 위상마스크의 결합은 더욱더 찾기 어렵다. 디지털 홀로그래피 현미경을 이용하면 한 장의 홀로그램을 이용하여 위상차 포토마스크의 3차원 구조와 결합을 동시에 측정할 수 있다.

주제어 : Holography, Digital holography, Phase shift photo-mask

I 서 론

반도체 집적도가 비약적으로 높아짐에 따라 반도체 문양의 크기가 나노 크기까지 요구되고 있다. 이러한 나노크기의 문양을 제작하기 위해서는 매우 특별한 광학 석판기술이 요구된다. 나노크기의 문양을 만들기 위하여 석판에 사용되는 빛의 파장을 작게 하거나, 석판에 사용되는 일반적인 광학 마스크 대신에 위상차와 간섭을 이용하는 위상차 광학 마스크(PSM: Phase Shifted Mask)를 이용한다.^[1-5] 이러한 PSM은 전체적으로 투명하기 때문에 일반적인 광학 현미경을 이용해서는 문양을 인식할 수 없고, 또한 PSM에 결합이 있을 시 이를 발견하기가 매우 어렵다. 이러한 PSM의 문양을 인식하기 위해서는 위상차를 영상으로 만들 수 있는 장치가 필요하다. 이러한 장치로 많이 사용되는 것이 위상차현미경(DIM: Differential Interference Microscope)과 최근에 많이 연구되고 있는 디지털 홀로그래피 현미경(DHM: Digital Holography Microscope)이다.

디지털 홀로그램 기술은 기존의 홀로그램 건판을 이용하는 홀로그램 기술과는 달리 CCD(Charge Coupled Device)와 같은 동영상 기록 장치를 이용하여 실시간으로 측정 대상체의 홀로그램 데이터를 획득하고, 수치적 3차원 영상 재생의 방법으로 측정 대상체의 3차원 데이터를 획득하는 방법이다. 이러한 방법은 약 30여년전 개념적 방법론이 제안되어, CCD의 발전과 컴퓨터 연산 속도의 발전으로 수치적 3차원 영상 재생의 방법이 발전하여 현재 실용적 용도에 적용하기 위한 다수의 연구들이 세계적으로 활발히 진행되고 있다.^[6-11] 이와 같이 측정 대상체의 3차원 데이터는 홀로그램 방법으로

기록함으로써 1회 촬영으로 측정 대상체의 3차원 데이터를 획득하고, 수치적 재생으로 측정 대상체의 3차원 데이터를 재구성하여 표시 할 수 있으므로 3차원 데이터 획득, 처리, 표시 면에 있어서 앞서 개발되어온 첨단 현미경들에 비하여 비교할 수 없을 정도의 성능 향상을 기대할 수 있다. 이러한 3차원 데이터 관련 능력으로 보다 다양한 측정 대상체의 데이터 표시 욕구를 충족시킬 수 있어서 다양한 응용이 예상되어진다.^[12-15]

본 논문에서는 DHM을 이용하여 PSM의 문양 측정과 결합을 인식하는 실험을 통하여 DHM이 PSM의 측정과 검사 장비로 사용할 수 있음을 확인하고자 한다.

II 이론적 배경

디지털 홀로그래피 현미경에서 홀로그램 데이터는 CCD로 입력되는 물체광(O)과 참조광(R)의 간섭에 의하여 주어진다. 그림 1과 같은 in-line 투과형 디지털 홀로그래피 현미경을 고려하자.

CCD에 형성되는 2차원 홀로그램의 빛 세기는 (1)식과 같다.

$$I_h(x, y) = |R|^2 + |O|^2 + R^* O + R O^* \quad (1)$$

(1)식에서 R^* , O^* 은 참조광과 물체광의 공액복소수이며, in-line 홀로그래피에서 참조광과 물체광의 각도는 0° 이다. 여기서 R 은 참조파, O 는 물체파를 나타내고 R^* , O^* 는 각각 참조파와 물체파의 공액복소수이다. 식 (1)의 첫째항은 참조광만의 세기이고, 둘째항은 물체광만의 세기이며 셋째항과 넷째항이 각각 허상항과 실상항을 나타낸다. 따라서 첫째항과 둘째항은 영차회절광에 해당되며 셋째항과 넷째항이

[†]E-mail: ypkim@khu.ac.kr

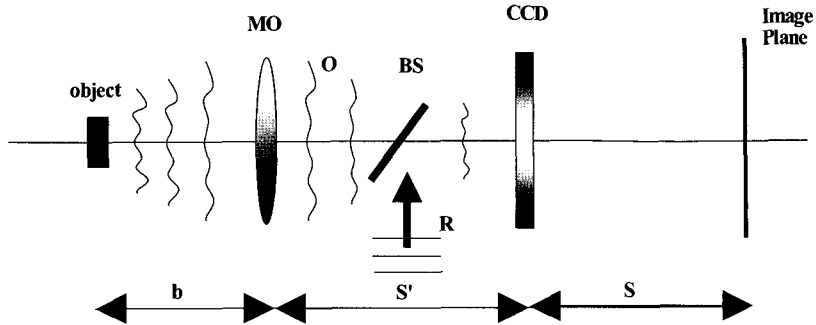


그림 1. 디지털 홀로그래피 현미경 구성과 영상 재생. MO: 확대렌즈, R: 참조광, O: 물체광, BS: 광 분할기, b: 물체와 렌즈간의 거리, S'; 렌즈와 CCD간의 거리, S; CCD와 영상 재생 면까지 거리.

임의의 각도로 회절하는 회절차수에 해당되는 항이다.

일반적으로 디지털 홀로그래피에서 홀로그램을 저장하는 장치로 CCD를 사용한다. CCD의 사양은 픽셀 수 $N_x \times N_y$, 픽셀크기($\Delta x \times \Delta y$)와 센서 크기($L_x \times L_y$)로 주어진다. CCD의 (k, l) 픽셀에 저장되는 간섭세기 정보는 (2)식과 같다.^[16,17]

$$I_h(k, l) = I_h(x, y) \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right) \sum_{k=-N_x/2}^{N_x/2} \sum_{l=-N_y/2}^{N_y/2} \delta(x-k\Delta x, y-l\Delta y) \quad (2)$$

(2)식에서 (x, y) 좌표는 실제 홀로그램 공간에서의 좌표이고, (k, l) 은 디지털화된 공간에서의 좌표이다. 그리고 (2)식은 참조광과 물체광에 의한 홀로그램 데이터로 수치적 영상 재생에 이용된다. 수치적 재생 파동은 참조광과 홀로그램 데이터($I_h(k, l)$)를 이용하여 (3)식과 같이 표현된다.

$$\Psi = RI_h = R|R|^2 + R|O|^2 + RR^*O + RRO^* \quad (3)$$

프레넬(Fresnel) 공식을 이용하여 영상이 맺히는 지점에서의 파동분포는 (4)식과 같다.^[16,17]

$$\Psi(\xi, \eta) = A \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda S}(\xi^2 + \eta^2)\right] \times \iint I_h(x, y) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda S}(x^2 + y^2)\right] \exp\left[\frac{i2\pi}{\lambda S}(x\xi + y\eta)\right] dx dy \quad (4)$$

여기서 λ 는 사용된 빛의 파장이고 S 는 CCD에서 영상이 재생되는 곳까지의 거리, A 는 상수이다. (4)식은 $I_h(x, y) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda S}(x^2 + y^2)\right]$ 을 공간 주파수 공간 $(\xi/\lambda S, \eta/\lambda S)$ 으로 푸리에변환(Fourier Transformation)한 것이다. 일반적으로 (4)식을 계산하기 위하여 FFT(Fast Fourier Transform) 알고리즘을 이용한다. (4)식은 복소수이기 때문에 명암 재생 영상은 (5)식과 같고 재생된 영상의 위상정보는 (6)식과 같다.

$$I(m, n) = \text{Re}[\Psi(m, n)]^2 + \text{Im}[\Psi(m, n)]^2 \quad (5)$$

$$\psi(m, n) = \arctan\{\text{Im}[\Psi(m, n)]/\text{Re}[\Psi(m, n)]\} \quad (6)$$

$\psi(m, n)$ 은 $-\pi \leq \psi(m, n) < \pi$ 범위의 값을 가진다. 실제 3차원 영상을 얻기 위해서는 (6)식에서 얻어진 위상과 위상편침 이론을 이용하여야 한다.^[10,12]

III. 실험장치

그림 2는 투과형 홀로그래피 현미경의 개략도이다. 기본적인 구성은 마흐젠더 간섭계와 같다. 사용한 광원은 10 mW He-Ne 레이저이고, 시료를 투과한 영상을 확대하기 위하여 현미경 대물렌즈 ML1(Mitutoyo LWD 100X, NA = 0.9)을 사용하였다. 필터 N1과 N2는 간섭 문양의 명암대비가 최대인 홀로그램을 얻기 위하여 사용하였다. 렌즈 L1과 ML2 그리고

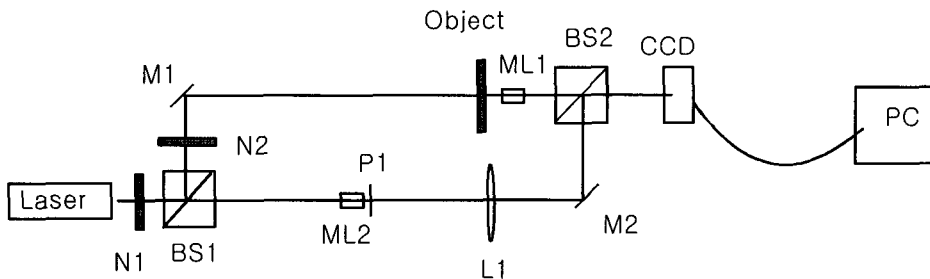


그림 2. 투과형 홀로그래피 현미경 개략도. M1, M2 : mirrors, N1, N2; neutral density filters, ML1, ML2; microscope objective lens, L1; lens, P1; pin hole, BS1, BS2; beam splitters.

핀홀 P1은 TEM00 모드의 참조광 빛을 얻기 위하여 사용하였으며 홀로그래프를 저장하기 위하여 CCD(KODAK Megaplu II)를 사용하였고, CCD의 픽셀크기는 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ 이고 픽셀 개수는 2048×2048 이다. 재생상은 CCD로부터 얻은 디지털 홀로그래프와 (4)-(6)식을 이용하여 컴퓨터 계산에 의해서 얻을 수 있다.

실험에 사용된 위상차 포토마스크의 문양은 그림 3(a)와 같다. 주기 p 는 $0.8 \mu\text{m}$ 에서 $3.6 \mu\text{m}$ 까지 여러 주기로 제작하였고, 시료 깊이 z 는 건식식각 방법을 이용하여 200 nm 에서 800 nm 까지 다양하게 제작하였다. 제작된 시료를 in-line SEM과 AFM으로 측정한 결과 주기 오차는 $\pm 10 \text{ nm}$ 이었으며, 깊이 오차는 $\pm 18 \text{ nm}$ 였다. 결함을 만들기 위하여 그림 3(b)와 같이 제작된 PSM에 400 nm 크기의 PSL(polystyrene latex)을 붙여서 결함을 만들었다.

IV. 실험결과

실험적으로 얻어진 디지털 홀로그래프를 이용하여 상을 재생할 때 재생상의 질을 결정하는 변수 중 하나는 재생 거리이다. 이 재생 거리는 그림 1에서 보는 것과 같이 홀로그래프 측정 시 렌즈의 초점거리(f), 렌즈와 물체의 거리(b)와 렌즈와 CCD간 거리(S')에 의해 렌즈 메이커 공식에 의해 주어진다. 그리고 이렇게 계산된 거리와 실제 렌즈에 의해 상이 형성되는 거리를 실험적으로 측정하여 재생거리(S)를 결정한다.

그림 4는 결함이 없는 위상차 시료의 홀로그래프와 CCD에서 60 cm 떨어진 지점에 수직적으로 재생한 영상이다.

그림 4(a)는 시료의 홀로그래프, (b)는 재생된 위상정보, (c)는 위상 펼침을 이용해 얻은 위상복원 영상, (d)는 3차원 디스플레이, (e)는 800 nm pitch 격자 시료의 측정 결과 확대, (f)는 800 nm pitch 격자 시료의 측정 결과 확대

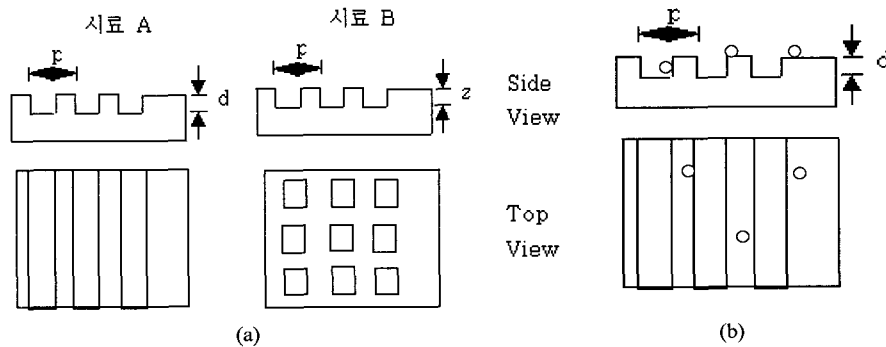


그림 3. (a) 위상차 포토마스크, (b) PSL을 이용한 위상결함 위상차 포토마스크.

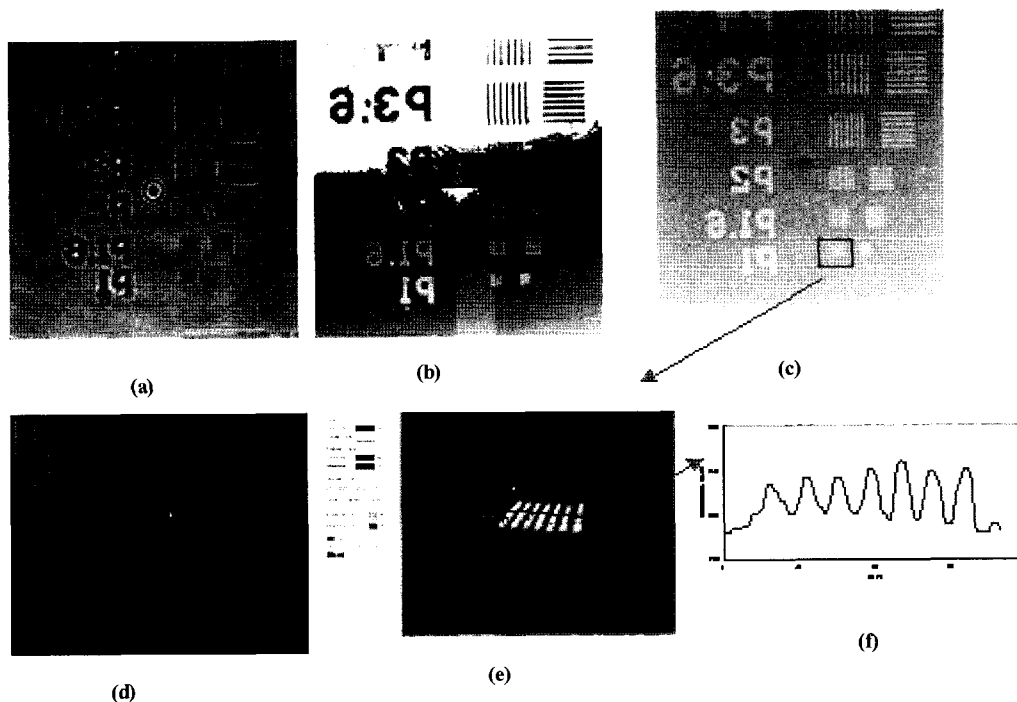


그림 4. (a) 홀로그래프, (b) 위상재생, (c) 위상복원 영상, (d) 3차원 디스플레이, (e) 800 nm pitch 격자 시료의 측정 결과 확대, (f) 단면의 높낮이 분포시료: 400 nm 깊이를 가진 위상차 포토 마스크.

한 것이고, (f)는 시료 단면의 높낮이를 나타낸 것이다. 그림 4에서 문양 중 주기가 가장 작은 $0.8 \mu\text{m}$ 주기의 문양이 잘 재생되었음을 그림 4(c)로부터 알 수 있고, $1.28 \mu\text{m}$, $1.6 \mu\text{m}$ 주기 문양도 잘 재생되었음을 그림 4로부터 알 수 있다. 수치적으로 재생된 영상으로부터 측정된 주기는 각각 $0.81 \pm 0.07 \mu\text{m}$, $1.22 \pm 0.02 \mu\text{m}$, $1.6 \pm 0.02 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 상대적으로 작은 $0.8 \mu\text{m}$ 주기 문양의 오차가 큰 것은 0차 회절광의 영향을 완벽하게 제거하지 못하여 문양의 경계부분이 상대적으로 불분명해서 생긴 것으로 생각된다. 그림 3의 데이터로부터 본 연구에 사용된 디지털 홀로그래피 현미경이 μm 이하 영역까지 측정 할 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 영상을 구현하기 위하여 계산에 사용된 CPU는 Intel T7250이며 운영체제는 Windows XP이이고 계산 시간은 약 20초이다.

위상 결함을 만들기 위하여 사용된 400 nm PSL의 홀로그램, 위상 영상 및 크기 데이터가 그림 5와 같다. 그림 5(a)는 홀로그램, (b)는 위상 영상, (c)는 위상 영상으로부터 얻은 PSL의 크기 데이터이다. 그림 5(c)로부터 측정된 PSL의 크기는 $400 \text{ nm} \pm 70 \text{ nm}$ 로 오차가 상대적으로 크다. 이는 위상 재생 시 영차 회절광의 영향으로 신호 대 잡음비가 충분히 큰 위상 영상을 얻지 못한 결과이고 PSL 측정 시 유리판 위에 증류수와 혼합하여 측정하였기 때문에 PSL이 한 면에 있지 않고 부유한 것도 있어 상대적으로 큰 오차가 생긴 것으로 생각된다.

그러나 그림 5로부터 PSL의 위상 영상을 재생할 수 있고, 크기 측정도 가능함을 알 수 있다.

위상 결함이 있는 위상차 마스크를 측정 한 결과는 그림 6

과 같다. 그림 6(a)는 결함이 있는 위상차 포토마스크의 홀로그램 그리고 (b)는 위상 이미지 (c)는 위상이미지와 위상 복원을 이용하여 표현한 3차원 영상이고, (d), (e)는 그림 6(c)에서 나타난 위상 결함부분을 확대한 3차원 영상이다. 그림 6으로부터 일반적인 광학 현미경으로는 측정 할 수 없는 위상차 마스크의 문양을 디지털 홀로그래피 현미경을 통해서 측정 할 수 있고, 위상 결함도 측정 할 수 있음을 확인 할 수 있

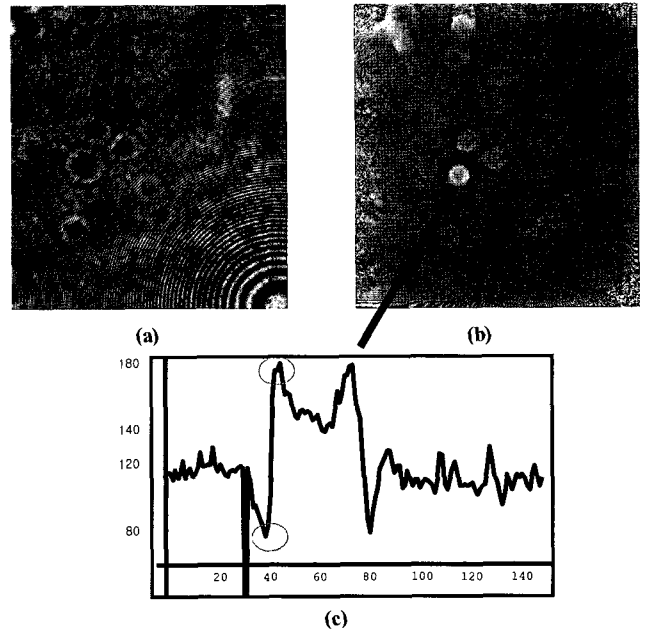


그림 5. (a) PSL의 홀로그램, (b) PSL의 위상영상, (c) 측정 데이터.

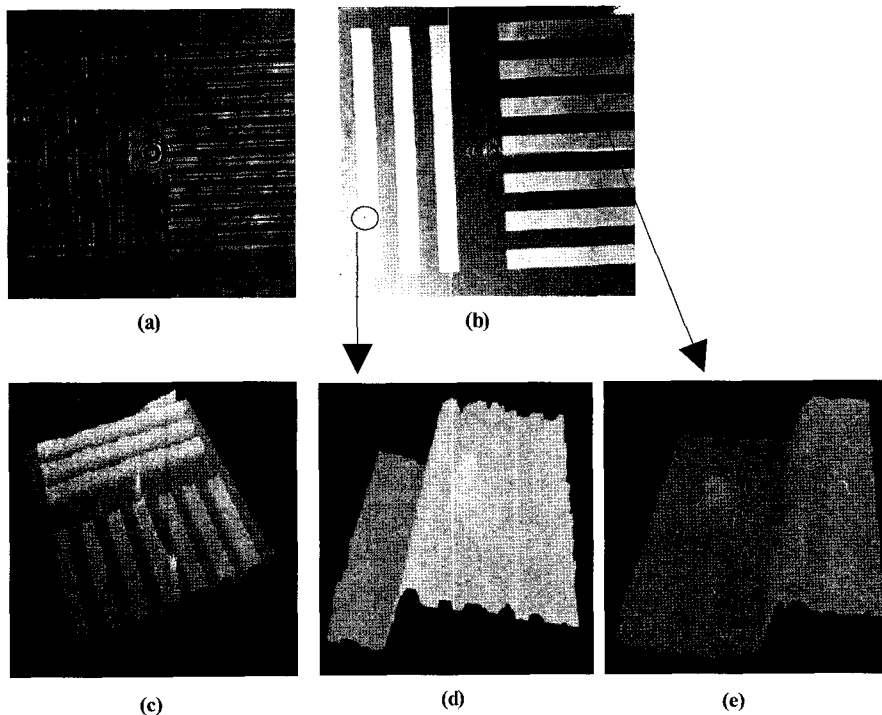


그림 6. (a) 위상 결함 위상차 포토마스크의 홀로그램, (b) 위상이미지, (c) 3차원 위상, (d), (e) 결함이 있는 위상 이미지 확대 그림.

다. 위상 영상 재현 시 잡음 처리 효과를 보다 높이면 신호 대 잡음비가 좋은 영상을 얻을 수 있고 또한 위상 영상을 얻기 위한 계산 시간을 단축하면, 이를 통하여 DHM이 위상차 마스크의 문양 측정 및 결함 검사에 응용될 수 있다.

V. 결 론

나노크기의 문양을 제작하기 위하여 사용되는 위상차 포토마스크의 문양과 결함을 측정하기 위하여 디지털 홀로그래피 현미경을 구성하였다. 디지털 홀로그래피 현미경은 명암 이미지와 위상 이미지를 동시에 측정 할 수 있는 장점이 있다. 일반적인 광학 현미경을 이용해서는 투명한 PSM의 문양과 결함을 측정 할 수 없다. 본 연구에서는 디지털 홀로그래피 현미경을 이용하여 한 장의 홀로그램을 이용하여 위상차 포토마스크의 3차원 구조와 결함을 동시에 측정할 수 있음을 확인 하였고, 이 장치가 투명한 물체의 문양의 측정 및 검사에 사용될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부 차세대신기술개발사업 지원으로 수행되었으며, 연구에 참여한 연구자의 일부는 '2단계 BK21 사업'의 지원비를 받았다.

참고문헌

[1] T. Yasuzato, S. Ishida, and H. Tanabe, "Pattern Dependence of Mask Topography Effect in Alternating Phase-Shifting Masks," *SPIE*, vol. 3748, pp. 363-370, 1999.

[2] S. Peng, "Through-Focus Image Balancing of Alternating Phase Shifting Masks," *SPIE*, vol. 3873, pp. 328-336, 1999.

[3] L. Liebmann, S. Mansfield, A. Wong, J. Smolinski, S. Peng, K. Kimmel, M. Rudzinski, J. Wiley, and L. Zurbrick, "High Resolution Ultraviolet Defect Inspection of DAP Reticles Darkfield Alternate Phase," *SPIE*, vol. 3873, pp. 148-161, 1999.

[4] S. Nagashige, K. Hayashi, S. Akima, H. Takahashi, K. Chiba, Y. Yamada, and Y. Matsuzawa, "Detection and Repair of Multiphase defects on Alternating Phase-Shift Masks for DUV Lithography," *SPIE*, vol. 3873, pp. 127-137, 1999.

[5] W. H. Foo, S. S. Mehta, R. Kumar, A. O. Adeyeye, H. Suda, T. Kubota, Y. Kimura, and H. Kinoshita, "Swing effects in alternating phase shift mask lithography: Implications of low illumination," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 24, pp. 2326-2330, 2006.

[6] J. W. Goodman and R. W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 11, pp. 77-79, 1967.

[7] M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov, and L. P. Yaroslavski, "Reconstruction of hologram with a computer," *Sov. Phys. Tech.*, vol. 17, pp. 434-444, 1972.

[8] G. K. Wernicke, O. Kruschke, N. Demoli, and H. Gruber, "Investigation of micro-opto-electro-mechanical components with a holographic microscopic interferometer," *SPIE*, vol. 3396, pp. 238-243, 1998.

[9] L. Xu, X. Peng, J. Miao, and K. Asundi, "Studies of digital microscopic with application to microstructure testing," *Appl. Opt.*, vol. 40, pp. 5046-5051, 2001.

[10] H. Cho, D. Kim, Y. Yu, W. Jung, and S. Shin, "디지털 홀로그래피 현미경과 위상 펄침을 이용한 3차원 측정", *한국광학회지*, vol. 17, pp. 329-334, 2006.

[11] S. Kim, H. Lee, and J. Son, "디지털 홀로그래피에서의 공초점 렌즈계를 이용한 보다 큰 물체의 기록", *한국광학회지*, vol. 14, pp. 244-248, 2003.

[12] U. Schnars, "Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. A 11, pp. 2011-2015, 1994.

[13] C. Wagneer, S. Seebacher, W. Osten, and W. Juptner, "Digital recording and numerical reconstruction of lensless Fourier holograms in optical metrology," *Appl. Opt.*, vol. 38, pp. 4812-4820, 1999.

[14] Y. Takaki and H. Ohzu, "Fast numerical reconstruction technique for high resolution hybrid holographic microscopy," *Appl. Opt.*, vol. 38, pp. 2204-2055, 1999.

[15] L. Xu, J. Miao, and A. Asundi, "Properties of digital holography based on in-line configuration," *Opt. Eng.*, vol. 39, pp. 3214-3219, 1999.

[16] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (Roberts & Company Publishers, USA, 2005) Ch. 9.

[17] E. Cuche, P. Marquet, and C. Depeursinge, "Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms," *Appl. Opt.*, vol. 38, pp. 6994-7001, 1999.

Defect Inspection of Phase Shift Photo-Mask with Digital Hologram Microscope

Hyungjun Cho, Jinwoong Lim, Doocheol Kim, and Younghun Yu[†]

Department of Physics, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

[†]*E-mail: yyhyoung@cheju.ac.kr*

Sanghoon Shin

AP & Tec, Haengdang dong, Seongdong Gu, Seoul 133-791, Korea

(Received August 16, 2007, Revised manuscript October 7, 2007)

We report here on the application of a digital holographic microscope as a metrology tool for the inspection and the micro-topography reconstruction of different micro-structures of phase shift photo-mask (PSM). The lithography by phase shift photo-mask uses the interference and the pattern of the PSM is not imaged by general optical microscope. The technique allows us to obtain digitally a high-fidelity surface topography description of the phase shift photo-mask with only one hologram image acquisition, allowing us to have relatively simple and compact set-ups able to give quantitative information of PSM.

OCIS code : 090.0090, 090.1760, 110.3960.