

비가간섭광을 이용한 내부전반사 홀로그래픽 리소그래피

이준섭 · 박우제 · 이지환 · 송석호[†]

한양대학교 물리학과
Ⓣ 133-791 서울특별시 성동구 행당동 17

이성진

삼성전자 생산기술연구소
Ⓣ 443-370 경기도 수원시 영통구 매탄동 416

(2009년 9월 21일 받음, 2009년 11월 6일 수정본 받음, 2009년 11월 9일 게재 확정)

최근 디스플레이 기기의 수요가 증대되면서 대면적 노광에 대한 요구가 증대되고 있는데, 내부전반사(total internal reflection: TIR)홀로그래픽 리소그래피는 대면적 노광을 위한 효과적인 방법으로 연구가 진행되고 있다. TIR 홀로그래피에서는 일반적으로 레이저를 이용하여 영상을 기록하고 재생한다. 그러나 자외선 램프와 같은 비가간섭광을 이용하여 재생한다면, 가간섭성에 의해 나타나는 영상잡음을 줄일 수 있고, 대면적 노광에도 보다 용이할 것이다. TIR 홀로그램의 재생을 위하여 자외선 램프를 이용할 때, 램프의 유한한 선폭과 확산각이 재생 영상에 미치는 영향을 분석하고, 재생패턴에 나타나는 선폭 확대 결과를 실험을 통하여 검증하였다. 1 μ m 규모의 선폭을 갖는 대면적 패턴을 TIR 홀로그램으로부터 얻기 위한 재생 광원으로, 가간섭성 광원인 레이저 대신 저잡음성과 경제성을 갖춘 일반적인 자외선 램프의 사용이 가능할 것으로 기대된다.

Total-internal-reflection Holographic Photo-lithography by Using Incoherent Light

Joon-sub Lee, Woo-Jae Park, Jiwhan Lee, and Seok Ho Song[†]

Department of Physics, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

[†]E-mail: shsong@hanyang.ac.kr

SungJin Lee

Mechatronics & Manufacturing Tech Center, Samsung Electronics, 416 Maetan-dong, Youngtong-gu, Suwon 443-370, Korea

(Received September 21, 2009; Revised manuscript November 6, 2009; Accepted November 9, 2009)

Recently, with increasing demand for flat-panel display product, methods for large area patterning are required. TIR (total internal reflection) holographic photo-lithography is studied as one of the methods of large area lithography. In conventional TIR holography, light sources for hologram recording and image reconstruction are coherent beams such as laser beams. If the image is reconstructed with an incoherent light source such as a UV lamp, the image noise from the coherence of light will be reduced and the UV lamp will be a better light source for large area exposure. We analyzed the effect of spectral bandwidth and angular bandwidth of the light source in image reconstruction and verified image blurring with experiments. For large area patterning which has micro-scale line width, it is expected that TIR holographic photo lithography by UV lamp will become a low-noise and low-priced technique.

Keywords: Lithography, Holography, Coherence imaging, Imaging system, Large area lithography

OCIS codes: (110.5220) Photolithography; (090.0090) Holography; (110.1650) Coherence imaging; (110.0110) Imaging system

I. 서 론

리소그래피는 반도체의 미세 회로를 제작하기 위하여 요구되는 공정의 하나이다. 일반적으로 리소그래피의 목적은 미

세 선폭을 왜곡 없이 노광하는 것인데, 이를 위하여 더 짧은 파장의 광원을 사용하거나, 높은 개구수(numerical aperture)의 축소광학계를 노광 장치에 삽입하는 방향으로 기술 개발이 이루어지고 있다.^[1,2] 이러한 리소그래피는 마이크로 머시닝 기술과 평판 디스플레이 기기의 개발, 조명 소자와 같이

[†]E-mail: shsong@hanyang.ac.kr

미세 구조가 요구되는 분야로도 그 적용 범위를 넓히고 있는데, 각각의 적용 분야들은 용도에 따라서 다른 리소그래피의 특성을 요구한다.^[3,4,5] 특히 최근 수요가 증대되고 있는 평판 디스플레이 분야에서는 대면적의 노광이 용이한 리소그래피 기술이 요구되고 있다.^[5]

대면적 리소그래피를 위한 방법으로 내부 전반사 (total internal reflection: TIR) 홀로그램 마스크를 이용한 포토 리소그래피 기술이 연구되고 있다.^[6] TIR 홀로그램을 이용하면 영상을 재생하는 과정에서 높은 개구수가 확보되어 고해상도의 재생 영상을 얻을 수 있고, 리소그래피 장치에 축소광학계가 필요 없으므로 재생상의 왜곡을 제거할 수 있으며, 노광 장치의 부피도 줄일 수 있다.^[10] TIR 홀로그래픽 마스크 연구는 약 40년 전에 시작되었는데, 홀로그램 기록 매질과 정렬 기술의 결핍은 기술적 과제였다.^[7,8,9,10] 그러나 추후 적합한 TIR 홀로그램 기록 매질이 개발되고, Holtronics사에서 정렬 장치를 개발하며 최근 연구가 다시 진행되고 있다.^[11]

TIR 홀로그램 노광은 일반적으로 레이저와 같은 가간섭광 (coherent light)을 이용하여 홀로그램 기록 물질에 원본 패턴을 기록하고, 기록시 사용되었던 광원과 동일한 가간섭광으로 기록 영상을 재생하여 리소그래피를 수행한다. 그러나, 대면적 홀로그램 마스크의 제작은 영상 분할을 통한 기록과 재생을 통하여 이루어 지게 되는데, 일반적인 방법을 이용하여 기록 영상을 재생하게 되면 분할 영역에서 간섭 무늬가 발생되어 영상잡음으로 작용하게 된다.^[6] 이러한 간섭 무늬는 재생광의 간섭성이 떨어지면 제거될 것으로 예상되므로 램프와 같은 비가간섭성 광원을 이용한 홀로그램 재생 실험이 요구된다. 간섭 무늬의 제거라는 목적에 더하여 자외선 램프 등의 비가간섭 광원이 레이저와 같은 가간섭성 광원에 비하여 저가이며, 조작성이 용이하므로 이러한 광원을 사용하는 경우의 재생 영상 분석이 요구된다. 본 논문에서는 비가간섭성인 재생광을 사용할 때, 광원의 파장 대역폭과 확산각이 재생 영상의 번짐 현상에 미치는 영향을 이론적으로 분석하고, 실험을 통하여 이를 확인하였다.

II. 본 론

일반적으로 홀로그램은 동일 파장의 빛으로 기록이 되고, 재생된다. 그러나 비가간섭 광을 이용하여 재생하게 되면 기록 파장과 재생 파장에서 차이가 생기며 참조 광원의 각도에서도 차이가 생기므로 재생 영상에서 번짐 효과가 발생된다. 이론적 분석을 통하여 번짐 효과의 정도를 유추할 수 있는데, 번짐 효과는 광원의 주파수 대역폭과 확산각에 의하여 결정된다. 그림 1은 점광원에 의하여 기록되고 재생되는 홀로그램 원리를 보여준다.

홀로그램이 기록되는 과정을 보면, 참조광원 (reference, R) 과 물체광원(object, O) 위치에서 발산되는 빛은 동일한 λ_1 파장을 가지며, 홀로그램 면에 간섭무늬를 형성한다. 반면에, 기록시와는 다른 λ_2 파장을 갖는 재생광원(reconstruction, P)으로 기록된 홀로그램을 비추게 되면, 원래의 물체광원과는 약간 다른 위치에 상(Image, I)이 재생되게 된다. 재생된 상은 $I(x_I, y_I, z_I)$ 위치로 수렴되는 파면을 이루는데, 수렴파동의 위상은 다음과 같이 주어진다.^[12]

$$\varphi_I = (\varphi_P - \varphi_R + \varphi_O) \tag{1}$$

$$= \frac{\pi}{\lambda_2} \left[(x_H^2 + y_H^2) \left(\frac{1}{z_P} + \frac{\mu}{z_O} - \frac{\mu}{z_R} \right) - 2x_H \left(\frac{x_P}{z_P} + \frac{\mu x_O}{z_O} - \frac{\mu x_R}{z_R} \right) - 2y_H \left(\frac{y_P}{z_P} + \frac{\mu y_O}{z_O} - \frac{\mu y_R}{z_R} \right) \right]$$

여기서, μ 는 재생 및 기록광원의 파장 비로서, λ_2/λ_1 로 정의된다. 재생상이 하나의 점을 이루기 위해서는 수식 (1)의 위상 파면은 다음과 같은 구면파를 이루어야 한다.

$$\varphi_I = \frac{2\pi}{\lambda_2} (HI - z_I) \approx \frac{\pi}{\lambda_2 z_I} (x_H^2 + y_H^2 - 2x_H x_I - 2y_H y_I) \tag{2}$$

수식 (1)과 (2)을 일치시키게 되면, 재생상의 위치 좌표를 얻을 수 있다. 홀로그램 마스크를 이용한 대면적 리소그래피에서는 참조광 및 재생광으로 평행광을 사용하게 되므로, z_R 과 z_P 를 무한대로 놓을 수 있다. 따라서, z_I 위치에서의 재생 상 평면에서 보면, 상 점의 위치가 원래의 물체광원의 위치와

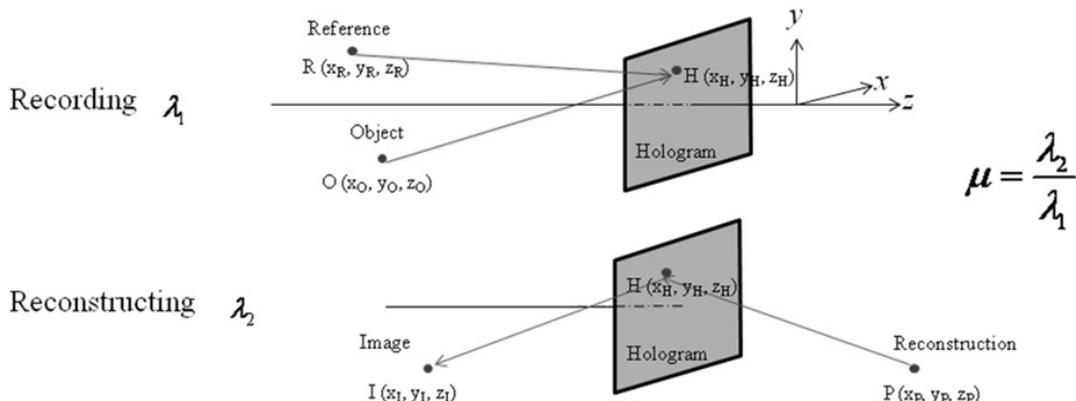


FIG. 1. Hologram recording and reconstructing by point light source.

는 다른 좌표값을 갖게 되는데, x_I 값을 구해보면 다음과 같다.

$$x_I(\lambda_1, \lambda_2) = x_o + z_o \left(\frac{x_p}{z_p} \right) \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) - z_o \left(\frac{x_R}{z_R} \right) = x_o - z_o \left(\frac{x_R}{z_R} \right) + z_o \left(\frac{1}{\mu} \right) \tan \theta_p \quad (3)$$

$\tan \theta_p = x_p / z_p$ 이다. 만일, $\mu \sim 1$, 즉 기록광과 재생광의 중심 파장이 비슷하고, 재생광원의 파장 대역폭이 $\Delta \lambda_2$, 확산각이 $\Delta \theta_p$ 이라 하면,

$$|\Delta x_I| = \left(\frac{z_o \tan \theta_p}{\lambda_2} \right) \Delta \lambda_2 + \left(\frac{z_o}{\cos \theta_p} \right) \Delta \theta_p \quad (4)$$

와 같은 크기로 물체광원의 크기가 확대되어 재생된다. y 축 방향으로도 동일한 확대가 일어난다. 만약 $\lambda_2 = 364 \text{ nm}$, $z_o = 160 \text{ }\mu\text{m}$, $\theta_p = 45^\circ$ 이고, $\Delta \lambda_2$ 와 $\Delta \theta_p$ 가 각각 $9.62 \text{ }\mu\text{m}$, 0.92° 이면, 재생된 상은 대략 직경이 $9.37 \text{ }\mu\text{m}$ 정도인 가우시안 광 분포를 갖는다.

그림 2는 45° 입사각을 갖는 참조광(Reference Beam)을 이용한 TIR 홀로그램 기록을 위한 실험장치의 개략도이다. 홀로그램 매질에 기록하고자 하는 마스크 패턴은 홀로그램 면으로부터 일정거리 (R_I) 만큼 떨어져 있으며, 물체광(Object beam)은 마스크를 통과한 후 홀로그램 면에 대해 수직으로 입사된다. 기록하고자 하는 마스크 패턴을 사용하기 전에, TIR 홀로그램의 기록, 재생 특성을 알아보기 위하여 평행광을 이용한 실험을 선행하였다. 기록시 사용된 레이저 (Spectra-Physics 사, BeamLok 2065-7S ION Laser) 의 파장은 364 nm , 물체광과 참조광의 광량은 동일하게 하였으며, 홀로그램 면에 조사되는 총 에너지는 4.5 mJ 이었다. DuPont 사의 홀로그램 매질을 유리판 위에 $16 \text{ }\mu\text{m}$ 두께로 도포 (1700rpm, 7초; UV curing, 15분; 90°C baking, 15분)한 후에 프리즘 면에 굴절률이 같은 기름(index-matching oil)으로 접합하였다. 45° 참조광에 의한 홀로그램의 회절효율은 50% 이었다. 입사각을 크게 하면 참조광이 프리즘면에서 반사되는 면적이 넓어지므로 대면적 영상 재생과 노광에 유리하다. 80° 의 입사각에 대해서는 23% 의 회절 효율을 보였는데, 실험에서는 큰 입사각으로 인하여 물체광과 참조광의 광량비를 정밀하게 조절하지 못하였기 때문에 판단된다.

선폭이 $3 \text{ }\mu\text{m} \sim 10 \text{ }\mu\text{m}$ 정도인 선들로 이루어진 마스크 패턴을 이용하여 TIR 홀로그램 마스크를 제작하였다. 그림 2에 정의된 R_I 는 $160 \text{ }\mu\text{m}$ 로 유지 하였으며, 평면파를 이용한 사진 실험에서와 동일한 레이저와 실험조건을 가지고 TIR 홀로그램을 기록하였다. 재생 시에는 기록할 때와 동일한 레이저 광원과 자외선 램프(USHIO 사, Spot cure SP-9)를 사용하여 재생 영상을 얻었으며, 이 둘 간의 비교를 수행하였다.

그림 3은 레이저 및 자외선 램프를 사용하여 얻은 재생영상이다. 재생광의 입사각도는 기록시 사용된 참조광과 동일한 45° 를 유지하였으며, 재생영상은 원래 마스크 패턴이 놓였던 위치(이미지 면)에 생기는 광분포를 CCD 카메라를 이

용하여 결상하여 얻었다. 그림 3의 레이저를 이용한 재생영상에서는 선폭이 각각 $3.5 \text{ }\mu\text{m}$, $5 \text{ }\mu\text{m}$, $7 \text{ }\mu\text{m}$, $10 \text{ }\mu\text{m}$ 인 원래의 마스크 패턴이 선명하게 재생된 반면, 밝은 선 모양의 주변에 잡음이 많이 발생하고 있다. 이는 레이저 광의 가간섭성에 의한 것으로, 기록시 마스크 패턴에서 생기는 임의의 산란광이나, 재생시 광학계에서 오는 산란광들에 의해 발생하

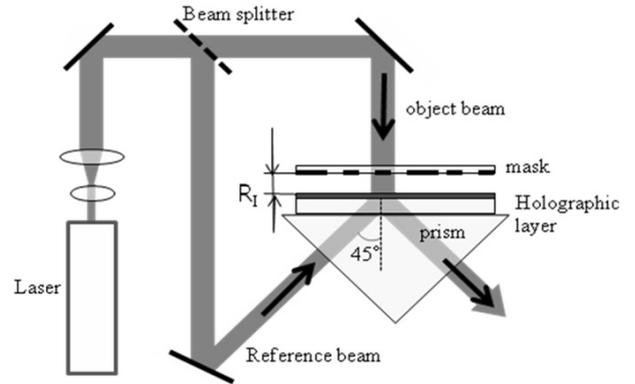


FIG. 2. Schematic of TIR hologram recording system.

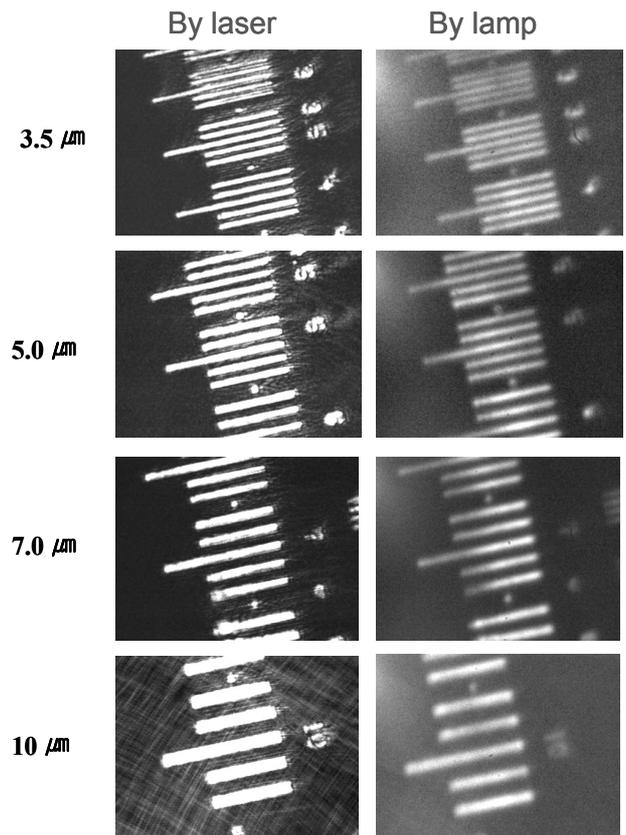


FIG. 3. Reconstructed images by laser and UV lamp. The images which were reconstructed by laser have clear patterns but there are noises. The images which were reconstructed by UV lamp have little noises and smooth pattern boundary.

게 된다. 그러나, 자외선 램프를 사용하여 얻은 그림 3의 재생상을 보면, 재생된 선들의 주변에 생긴 잡음이 상대적으로 매우 적으며 재생 선들의 경계가 부드러움을 알 수 있다.

자외선 램프를 사용하여 얻은 TIR 홀로그래프 재생영상을 보다 수치적으로 분석하기 위하여, 램프로 재생된 선폭과 수식 (4)로부터 계산된 선폭을 비교하였다. 그림 4(a)의 요동치는 검은 선들은 그림 3에 있는 램프 재생영상의 밝기 데이터를 그린 것이며, 부드러운 굵은 실선은 수식 (4)로부터 얻은 재생 선폭의 밝기 분포이다. TIR 홀로그래프 재생에 사용된 자

외선 램프의 파장 대역폭은 그림 4(b)에 제시된 측정 스펙트럼으로부터, $\Delta\lambda_2 = 9.62 \text{ nm}$ 로 결정될 수 있었다. 램프의 확산각은 레이저에 비해 매우 큰 것이 일반적이다. 그러나, 본 실험에 사용된 홀로그래프 매질의 두께가 $16 \mu\text{m}$ 정도로 두꺼우므로, 기록된 TIR 홀로그래프가 부피 격자(volume grating) 형태로 기록되었다고 할 수 있다. 따라서, 부피격자가 갖는 각도 선택도(angular selectivity)에 의해 기록된 TIR 홀로그래프를 재생하는데 적용된 램프 광의 확산각은 원래의 램프 확산각에 비해 매우 작을 것으로 가정할 수 있다. 두께가 d 인

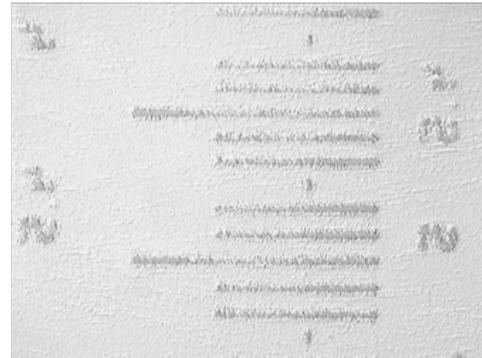
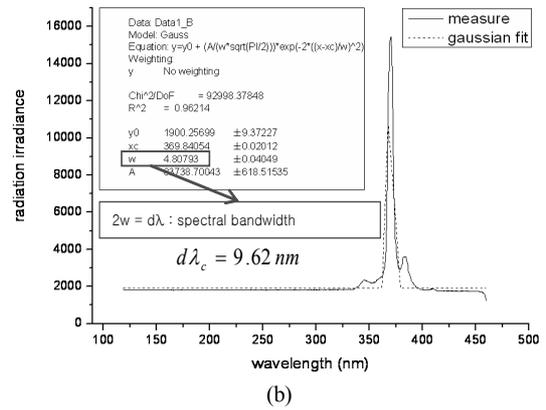
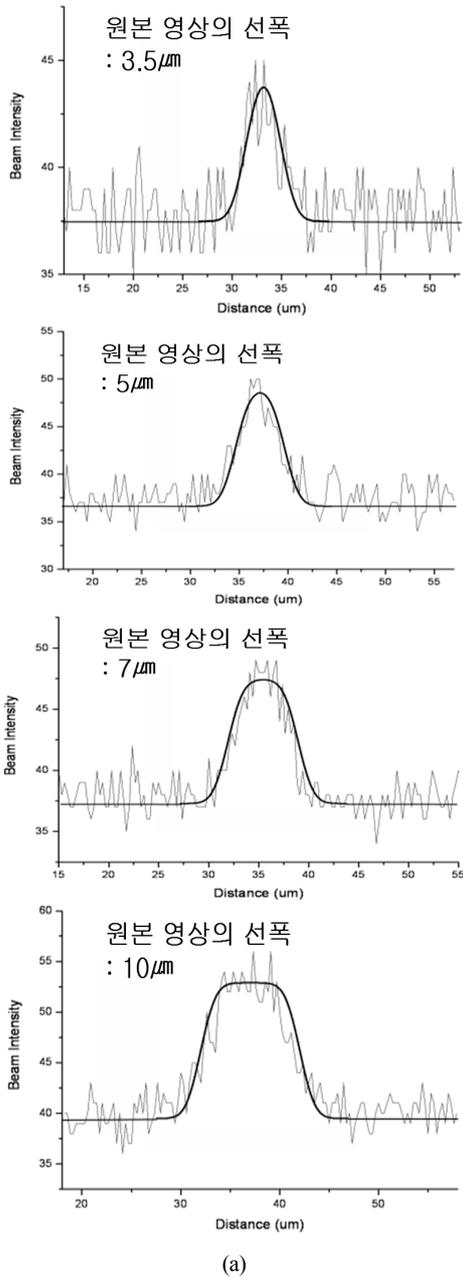


FIG. 4. Results. Thin lines in (a) are measured values, which show brightness of reconstructed images by UV lamp. Thick lines in (a) are calculated brightness by equation (4). Thin lines and thick lines have similar trajectory. (b) shows spectrum of UV lamp which was used for experiments. Spectral bandwidth was 9.62nm. Photos in (c) and (d) are results of lithography. For the photo in (c), photoresist was exposed by laser, and for the photo in (d), photoresist was exposed by UV lamp.

부피격자의 각도 선택도는 $\lambda/(2d\sin\theta_p)$ 로 정의된다.^[13] 본 실험의 경우, $\lambda = 365 \text{ nm}$, $d = 16 \text{ }\mu\text{m}$, $\theta_p = 45^\circ$ 이므로, 실제 마스크 선폭의 확대에 작용된 재생광의 확산각도는 대략 1° 이하임을 유추할 수 있다. 이러한 램프광원의 확산각 유추 결과는, 그림 4(a)에서 보여주는 측정치와 계산치의 우수하게 일치되는 결과 비교 그림을 통하여서도 확인되었다. 그림 3의 램프 재생영상과 그림 4의 측정 데이터를 보면, 선폭이 감소할수록 밝기 분포의 불균일성이 증가하고 선들간에 경계가 나빠지고 있는데, 이는 실험에 사용된 램프의 파워가 수십 mW 정도로 약해서 CCD에서 얻은 영상 데이터에 전기적인 잡음이 섞여서 발생하는 것으로 추정된다. 그림 4(a)를 보면 각각의 원본 영상의 선폭에 대하여 배경 복사에 의한 밝기 값은 모두 비슷하지만 가장 밝은 위치의 밝기 값은 선폭이 좁으면 낮아지는 것을 볼 수 있다. 높은 파워를 갖는 램프를 이용하여 재생 영상의 가장 밝은 위치의 밝기 값이 증가하면, 밝기 분포의 불균일성과 선들간에 경계도 흐릿한 문제점은 해결될 것으로 예상된다. 그림 4(c)와 4(d)는 실제 감광제가 도포된 웨이퍼를 마스크 패턴이 재생되는 면에 놓고, 레이저 광과 램프를 사용하여 TIR 홀로그래프의 재생패턴을 감광제 면에 노광을 하여 얻은 결과 사진이다. 노광된 선 패턴들의 선폭은 $5 \text{ }\mu\text{m}$ 이었다. 앞에서 논의된 바와 같이, 레이저를 사용하여 노광한 경우인 그림 4(c)를 보면 많은 잡음이 섞여 있음을 알 수 있고, 반면에 램프를 사용하여 얻은 결과인 그림 4(d)를 보면, 그림 4(c)에 나타나 있는 잡음이 거의 나타나지 않는다. 따라서, 기록에 사용된 레이저 광원이 아닌 간섭성이 없는 자외선 램프를 사용하여도 수 μm 폭의 마스크 패턴이 비교적 적은 잡음을 가지고 재생되고, 감광제가 도포된 웨이퍼 위에 원래의 마스크 패턴을 잘 형성할 수 있음을 알 수 있다. 램프 광원 사용시 발생하는 선들간의 경계가 뚜렷하지 않다는 문제는 감광제의 감마특성 (contrast)을 조정하여 해결할 수 있을 것이다. 감마특성은 감광제의 노광 특성을 보여주는데, 감광제의 제거 여부는 임계치를 넘어서는 노광량에 의하여 결정이 되므로, 노광에 사용되는 빛의 밝기 분포보다는 더욱 수직에 가까운 노광 결과를 얻을 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 대면적 TIR 홀로그래픽 리소그라피를 구현하기 위한 한 방법으로서, 레이저 광원 대신 간섭성이 없는 자외선 램프를 사용하여 TIR 홀로그래프를 재생하는 방식을 제안하였으며, 재생광원의 파장 대역폭과 확산각이 재생 패턴에 주는 영향을 분석하고 실험을 통하여 분석결과의 타당성을 입증하였다. $3.5 \text{ }\mu\text{m}$, $5 \text{ }\mu\text{m}$, $7 \text{ }\mu\text{m}$, $10 \text{ }\mu\text{m}$ 의 선폭을 갖는 영상을 비가간섭 광원을 이용하여 재생한 결과, 계산치와 유사한 영상의 재생 특성을 보임을 알 수 있었다. TIR 홀로그래프 기록시와는 다른 비 간섭성 자외선 램프를 사용하여 가간섭성 광원의 사용시에 나타나는 영상잡음 문제를 줄일 수 있고 대면적 노광이 보다 용이할 것으로 기대된다. $5 \text{ }\mu\text{m}$ 선

폭의 리소그라피 결과물에서 잡음이 제거된 것을 볼 수 있다. 경계가 뚜렷하지 않으나 이는 감광제의 감마특성을 조정하여 해결할 수 있을 것이다. 유한한 파장 대역폭과 확산각을 갖는 자외선 램프를 사용한 TIR 홀로그래프의 재생방식은, μm 규모의 선폭을 갖는 패턴에 대해서 대면적 홀로그래픽 리소그라피 기술의 상용화에 기여하리라 기대된다.

References

1. Y. Chen, Y. Shroff, and W. G. Oldham, "Modeling and control of nanomirrors for EUV maskless lithography," in *Proc. Technical Proc. Int. Conf. Modeling and Simulation of Microsystems* (San Diego, USA, Mar. 2000), pp. 602-604.
2. M. J. Madou, *Fundamentals of Microfabrication the Science of Miniaturization*, 2nd ed. (CRC Press, FL, USA, 2002), pp. 22-28.
3. N. Matsuzuka and O. Tabata, "Algorithm for analyzing optimal mask movement pattern in moving mask deep x-ray lithography," in *Proc. 2002 International Symposium on Micromechanics and Human Science* (Nagoya, Japan, Oct. 2002), pp. 159-164.
4. D. C. O'Shea, T. J. Suleski, A. D. Kathman, and D. W. Prather, *Diffraction Optics Design, Fabrication, and Test* (SPIE Press, Washington, USA, 2004), pp. 149-154.
5. K. Jain, M. Zemel, and M. Klosner, "Large-area high-resolution lithography and photoablation systems for microelectronics and optoelectronics fabrication," *Proc. of IEEE* **90**, 1681-1688 (2002).
6. J.-S. Lee, W.-J. Park, J. Lee, S. H. Song, S. Lee, and O. S. Kim, "Image stitching and seamless holographic photolithography for large-area patterning," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **20**, 23-28 (2009).
7. K. Stetson, "Holography with totally internally reflected light," *Appl. Phys. Lett.* **11**, 225-226 (1967).
8. E. B. Champagne and N. G. Massey, "Resolution in holography," *Appl. Opt.* **8**, 1879-1885 (1969).
9. R. Dandliker and J. Brook, "Holographic photolithography for submicron VLSI structure," in *Proc. Holographic Systems, Components and Applications, Second International Conference* (Bath, UK, Sept. 1989), pp. 127-132.
10. F. Clube, S. Gray, D. Struchen, J.-C. Tisserand, S. Malfoy, and Y. Darbellay, "Holographic microlithography," *Opt. Eng.* **34** 2724-2730 (1995).
11. W. Park, J. S. Lee, S. H. Song, S. Lee, and T. Kim, "TIR holographic lithography using surface relief hologram mask," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **20**, 175-181 (2009).
12. P. Hariharan, *Optical Holography Principles, Techniques, and Applications*, 2nd ed. (Cambridge University Press, New York, USA, 1996), pp. 25-29.
13. H. J. Coufal, D. Psaltis, and G. T. Sincerbox, *Holographic Data Storage* (Springer Series in Optical Sciences, New York, USA, 2000), pp. 35-38.