

나노 스테레오리소그래피 공정을 이용한 불투명 기판에서의 3차원 마이크로 형상 제작 방법에 관한 연구

Direct Patterning of 3D Microstructures on an Opaque Substrate Using Nano-Stereolithography

손용¹, 임태우¹, 하철우¹, 양동열^{1,✉}, 정병제², 공홍진²

Yong Son¹, Tae Woo Lim¹, Cheol Woo Ha¹, Dong-Yol Yang^{1,✉}, Byung Je Jung² and Hong Jin Kong²

¹ 한국과학기술원 기계항공시스템학부 (School of Mechanical Engineering & Aerospace System, KAIST)

² 한국과학기술원 물리학과 (Department of Physics, KAIST)

✉ Corresponding author: dyyang@kaist.ac.kr, Tel: 042-350-3254

Manuscript received: 2010.4.16 / Accepted: 2010.8.10

A nano-stereolithography is the direct patterning process with a nanoscale resolution using two-photon absorption induced by a femtosecond laser. However, in the majority of the works, the fabrication of 3D microstructures have been done only onto transparent glass due to the use of an oil immersion objective lens for achieving a high resolution. In this work, the coaxial illumination and the auto-focusing system are proposed for the direct patterning of nano-precision patterns on an opaque substrate such as a silicon wafer and a metal substrate. Through this work, 3D polymer structures and metallic patterns are fabricated on a silicon wafer using the developed process.

Key Words: Nano-Stereolithography (나노 스테레오리소그래피), Two-photon Absorption (이광자 흡수현상), Femtosecond Laser (펨토초 레이저), Opaque Substrate (불투명 기판)

기호설명

R = reflectance

n = refractive index

1. 서론

최근 나노/마이크로 패터닝 기술은 의료/바이오/전자/에너지 등의 다양한 분야에서 고부가 가치 제품 창출을 위해 다양하게 연구되고 있다. 현재 까지 개발된 공정들 중에서 포토마스크를 이용한 광 리소그래피 (photolithography) 공정은 미세 패턴을 대량으로 생산할 수 있는 공정으로 IT, BT, NT

등 다양한 분야에서 필요한 응용소자 제작 기술로 적용되고 있다. 그러나 고가의 포토마스크가 필수적으로 필요하며 광의 회절한계로 인해 나노 패터닝 제작에는 어려움이 있다. 따라서 최근에는 나노/마이크로 패턴을 단일공정으로 제작하기 위해 엑스레이 리소그래피 (X-ray lithography),¹ 전자빔 리소그래피 (electron-beam lithography),² 잉크젯 프린팅 (inkjet printing),³ 나노 임프린팅 (nano-imprinting lithography)⁴ 등의 다양한 공정이 연구되고 있다. 이러한 공정 중 이광자 흡수 광조형 공정은 100 nm 급의 정밀도를 가지는 형상을 제작할 수 있는 공정으로 최근 몇 년간 연구가 진행되어 왔다.⁵⁻¹¹ 나노 스테레오리소그래피 (Nano-stereolithography)

공정은 레이저 초점 일부에서만 폴리머가 경화되는 현상을 이용하여 복잡한 3 차원 형상을 단일 공정으로 제작할 수 있어 3 차원 광 결정체 (photonic crystal), 3 차원 극미세 유체 소자 등 다양한 분야의 응용소자 제작이 가능하다. 이러한 임의의 3 차원 형상 제작이 가능한 특성은 마이크로 스테레오리소그래피 (micro-stereolithography) 공정과 유사한 점이 있지만 빛의 회절한계를 극복할 수 있는 비선형 광학현상인 이광자 흡수 현상 (two-photon absorption)을 이용하여 100 nm 급 정밀도를 구현할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 이 공정은 고 정밀도를 구현하기 위해 고 개구수 (high numerical aperture)의 오일 렌즈 (oil immersion objective lens)를 사용함에 따라 투명한 유리기판 위에서만 형상 제작이 이루어져 왔다. 하지만 다양한 응용소자 제작과 다른 공정과의 연계성을 위해서는 실리콘 웨이퍼나 금속 등의 불투명한 기판에 형상을 제작하는 것 또한 중요하다.

본 연구에서는 기존의 나노 스테레오리소그래피 시스템에 고 개구수 오일 렌즈에 사용 가능한 동축 조명 (coaxial illuminator)과 자동초점 장치 (auto-focusing system)를 이용하여 웨이퍼나 금속 등의 불투명 기판에도 고분자 및 금속 형상 제작을 위한 연구를 수행하였다.

2. 나노 스테레오리소그래피 공정

2.1 이광자 흡수현상

일반적인 물질에서 관찰되는 단일광자 흡수현상은 Fig. 1(a)와 같이 레이저 빔이 조사될 때 물질이 바닥상태에서 한 개의 광자를 흡수하여 여기상태 (excited state)가 되고 다시 같은 파장의 빛을 내며 바닥상태 (ground state)로 되돌아 가는 현상이다. 하지만 이광자 흡수현상은 Fig. 1(b)와 같이 두 개의 광자를 10^{-15} sec 이내에서 동시에 흡수하여 여기상태가 된 뒤에 약간의 에너지를 소실한 후 동시에 흡수된 두개의 광자가 갖는 에너지에 해당하는 광자를 방출하고 바닥 상태로 돌아가는 비선형 광학현상이다.¹² 예를 들면, 800 nm 파장의 광자 두 개를 흡수하여 약 400 nm 파장의 빛이 발생 되는 현상이다. 이러한 이광자 흡수현상을 일으키기 위해서는 이광자 흡수율을 높이는 물질인 이광자 흡수 색소 (two-photon absorption dye)를 재료에 섞는 화학적인 방법과 레이저의 광자 (photon) 밀도를 높이는 물리적인 방법이 있다. Fig. 2(a)는 레이저

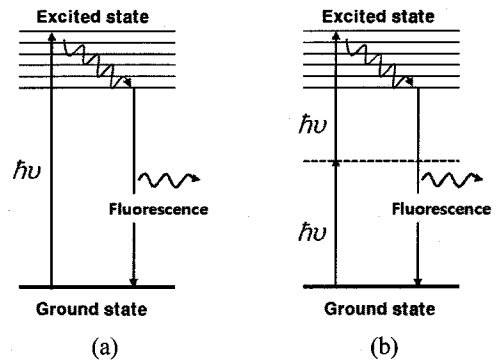


Fig. 1 Schematic diagram of (a) one photon absorption and (b) two photon absorption

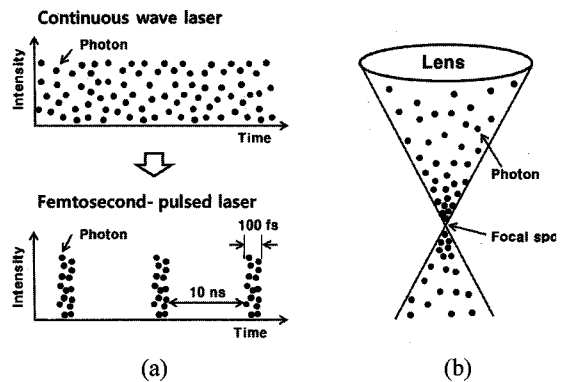


Fig. 2 Schematic diagram of (a) temporal compression of photons during 100 femtosecond pulses and (b) spatial compression of photons by a high-numerical aperture objective lens

펄스 폭을 100 fs (femtosecond: 10^{-15} sec) 이내로 줄여 광자밀도를 높이는 방법으로 주로 펄프초 펄스 폭을 갖는 Ti:sapphire 레이저가 이용된다. Fig. 2(b)는 고 개구수의 오일 렌즈를 이용하여 초점에서의 광자밀도를 높이는 방법을 나타낸다.

Fig. 3은 단일광자 흡수현상과 이광자 흡수현상에 따라 UV (ultraviolet) 경화성 레진이 경화되는 차이를 나타낸다. Fig. 3(a)는 단일광자 흡수현상에 의해 UV가 조사되는 모든 영역이 경화되는 것을 나타낸다. 하지만 이광자 흡수 현상은 Fig. 3(b)와 같이 UV 파장 보다 긴 파장의 레이저를 조사하여 대부분의 영역에서는 레이저가 통과하고 초점 중심부의 일부에서만 경화를 일으킨다. 이와 같이 이광자 흡수현상을 이용하면 레이저 초점부의 일부 영역에서만 경화가 일어나 나노급 정밀도를 얻

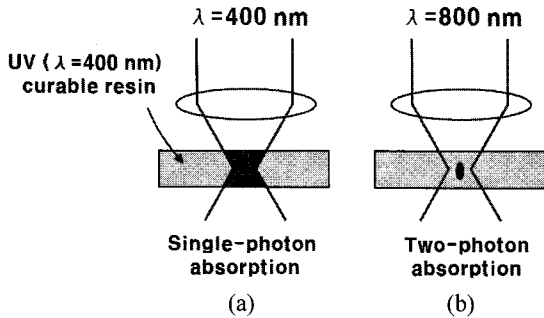


Fig. 3 Polymerization of (a) single photon absorption and (b) two-photon absorption

을 수 있으며, 이러한 반응을 연속적으로 연결하여 임의의 3 차원 형상을 제작할 수 있다.

2.2 나노 스테레오리소그래피 공정

Fig. 4 에는 불투명 기판에 마이크로 형상 제작을 위해 본 연구에서 개발한 나노 스테레오리소그래피 장치의 구성에 대하여 나타내었다. 사용된 레이저는 펨토초 펄스를 갖는 티타늄:사파이어 (Ti:sapphire) 레이저이며, 작동주파수는 80 MHz, 펄스 폭은 100 fs 이하이며 중심 파장은 780 nm 이다. 반사된 레이저 빛에 의한 레이저 손상을 방지하기 위해 고립계 (isolator)를 레이저 앞에 설치하였고, 반파장판 (1/2 wavelength plate)과 편광 빔분할기 (polarizing beam splitter)를 이용하여 레이저 출력을 조절 하였다. 광학셔터 (optical shutter)를 이용하여 최대 1 ms 의 속도로 레이저의 on/off 를 제어 하였다. 외각선을 적층하여 제작하는 3 차원 형상의 정밀화를 위하여 단위 복셀의 세장비가 낮게 제작되는 개구수 (numerical aperture; NA) 1.4 인 오일 대물렌즈 (oil immersion objective lens)를 이용하여 레이저를 시편에 집광하였다. 시편이 고정된 압전소자 스테이지 (piezoelectric stage)를 이용하여 0.1 nm 정밀도로 800 μm x 800 μm x 250 μm 의 제작영역에 대해 레이저 스캐닝이 가능하도록 하였다. 제작과정을 모니터링 하기 위해 고배율 디지털 CCD 카메라를 이용하였다.

본 공정을 이용하여 패터닝 가능한 재료는 폴리우레탄 아크릴레이트 계열인 SCR 500 레진 (Japan synthetic rubber Co.), 에폭시 계열의 SU-8 레진 (Microchem Co.), 무기 유기 혼합 고분자인 ORMOCER 레진(Micro resist tech. Co.) 등이 있으며 제작하려는 형상 또는 기능에 따라 선택하여 쓸 수 있다. 또한 이광자 흡수에 의한 금속이온 광환

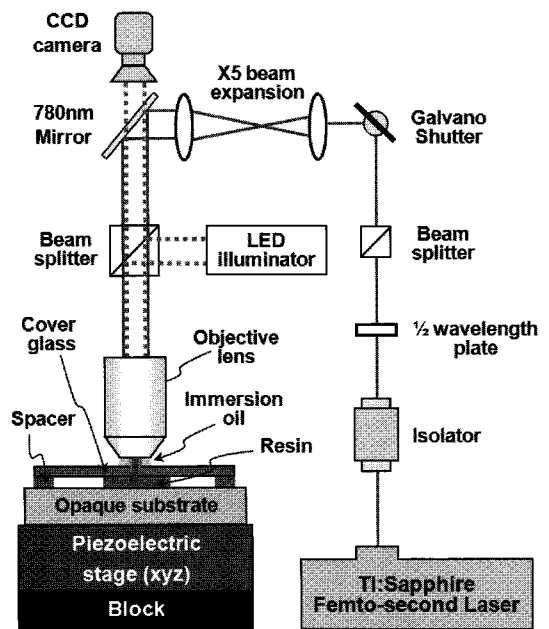


Fig. 4 Schematic diagram of nano-stereolithography system for direct patterning of microstructures on an opaque substrate

원 현상을 이용하여 금속 패터닝도 가능하다. 이렇게 나노 스테레오리소그래피공정은 다양한 재료로 임의의 3 차원 응용소자를 만들 수 있는 공정이다.

2.3 동축 조명 장치

지금까지 나노 스테레오리소그래피 공정으로 제작된 형상들은 Fig. 5(a)와 같이 대부분 투명한 유리기판인 커버글라스 (cover glass) 에서만 제작되었다. 사용할 수 있는 기판이 제한된 이유는 고 정밀도 형상 제작을 위한 고 개구수의 오일 대물렌즈를 사용함에 따라 시편과 렌즈와의 공간이 없어 외부 조명을 위치하는 방법이 제한되기 때문이다. 정밀한 3 차원 형상 제작을 위해서는 레이저 초점을 기판에 정확히 위치시키는 것이 중요하며 이러한 작업은 CCD 카메라를 이용한 실시간 이미징 관찰로 이루어진다. 이러한 실시간 이미지는 렌즈 아래에 위치한 조명 빛이 레진과 커버글라스를 통과하여 CCD 카메라에 도달함으로써 얻을 수 있다. 하지만 불투명 레진을 사용하거나 불투명 기판을 사용하게 되면 렌즈 아래에 위치한 조명을 사용할 수 없게 되어 레이저 초점을 기판에 정확히 위치하는 것이 불가능 하다.

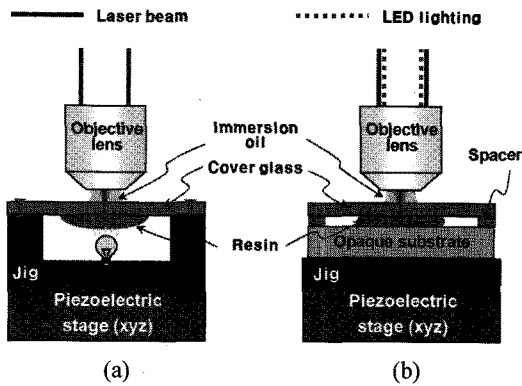


Fig. 5 Schematic diagram of patterning module with (a) a transparent substrate and (b) an opaque substrate

따라서 본 연구에서는 레이저 경로와 같은 방향으로 조명을 비추는 방법인 동축 조명 장치를 구축하여 불투명 기판 위를 관찰할 수 있게 하였다. Fig. 5(b)는 불투명 기판에 형상을 제작하기 위한 방법이다. 시편은 불투명 기판과 커버글라스 사이에 레진을 채워 넣어 공기 층이 없도록 준비하며, 형상 제작을 위한 레이저 빔과 제작과정을 관찰하기 위한 외부 조명 빛을 대물렌즈에 같이 입사시켰다. 고 배율의 이미지 관찰을 위해서는 강한 빛이 필요함에 따라 고효율 발광다이오드(light emitting diode)를 조명 빛으로 사용하였다. Fig. 6(a)는 외부 조명과 대물렌즈를 이용하여 웨이퍼를 관찰한 이미지로 외부에서 입사된 원형의 발광다이오드 빛이 대물렌즈에 의해 집광되어 기판을 관찰할 수 없음을 알 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 발광다이오드 앞에 산광기(diffuser)를 설치하여 넓은 영역에 균일한 빛을 대물렌즈에 입사시켜 Fig. 6(b)와 같이 웨이퍼 위의 ‘L’ 형태의

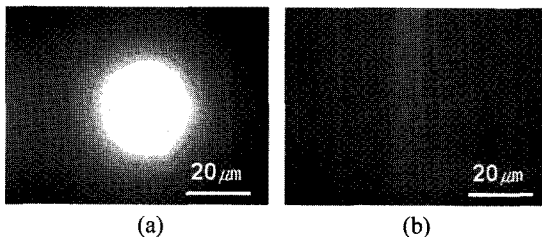


Fig. 6 (a) CCD images of a concentrated external light by objective lens and (b) a ‘L’ pattern on wafer substrate by using a diffuser

패턴에 대한 이미지를 얻었다. 이러한 동축 조명 장치를 나노 스테레오리소그래피 시스템에 이용함으로써 불투명 기판에도 정확한 위치에 형상 제작이 가능하게 하였다.

2.4 자동초점 장치

나노 스테레오리소그래피 공정을 이용하여 3 차원 형상 제작을 위해서는 기존의 캐속조형(rapid prototyping) 장비와 같이 2 차원 단면을 연속적으로 적층하는 방법을 이용한다. 이러한 적층 방법은 시작하는 위치가 정확해야 하므로 사용되는 기판의 표면에 레이저 빔 초점을 정확히 맞추는 과정이 중요하다. 만약 레이저 초점이 기판 속에서부터 시작하여 적층하게 되면 제작하고자 하는 3 차원 형상의 밑 부분이 제작되지 않으며, 레진 속에서부터 형상 제작이 시작되면 제작된 형상이 기판에 고정되지 않아 현상(developing) 시 쓰러지거나 소실되게 된다. 그러므로 정확한 3 차원 형상 제작을 위해 나노 스테레오리소그래피 공정의 높이 방향의 최소정밀도인 300 nm 이하로 레이저 초점을 기판에 위치시키는 것이 중요하다.

일반적으로 레이저 빔을 기판 표면에 위치하기 위해서는 공기와 기판과의 굴절률 차이에 의한 반사율이 기판의 표면에서 최대가 되는 것을 이용한다. 식(1)은 두 개의 다른 굴절률을 가진 물질에 빛이 수직으로 입사할 때의 반사율에 관한 식이다.

$$R = [(n_0 - n_1)/(n_0 + n_1)]^2 \quad (1)$$

Fig. 7(a)는 레진이 없는 영역에서 유리기판 표면에 맺힌 레이저 빔의 초점 이미지이다. 초점의 광 세기를 눈으로 관찰하여 기판표면을 찾을 수 있을 만큼 선명함을 알 수 있다. 이 때의 반사율은 유리의 굴절률 1.515, 공기의 굴절률 1 을 식 1 에 대입하면 약 4 %가 됨을 알 수 있다. 하지만 형상제작을 위해 레이저 빔이 레진 안으로 들어가게 되면 레이저 초점이 기판에서 반사되는 이미지를 얻을 수 없게 된다. 이것은 레진의 굴절률이 1.55 로 유리의 굴절률과 차이가 거의 없어 반사율이 식 1 에 의해 0.01 % 로 매우 낮음을 알 수 있다. 그러므로 기판과 레진 사이의 경계를 찾기 위해 일반적으로 이용되는 굴절률 차이에 의한 레이저 초점의 세기 변화를 이용할 수 없다.

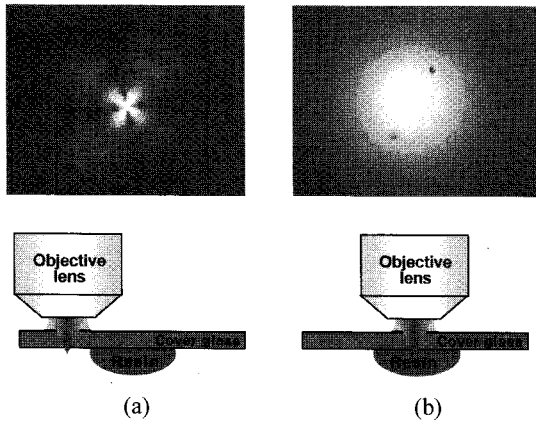


Fig. 7 (a) CCD image of focused laser beam out of the resin, (b) The fluorescence image due to the two photon absorption

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 레진에 레이저 빔이 조사될 때 이광자 흡수 현상에 의한 형광 (fluorescence) 의 세기 변화를 이용하여 정확한 기판 표면의 위치를 찾는 자동초점 장치를 구현하였다. Fig. 7(b)는 레이저 빔이 레진에 조사될 때 나타난 형광의 이미지를 나타내는 것으로서 레이저 빔이 기판을 지나 레진 속으로 들어감에 따라 형광 된 빛의 세기가 변하는 원리를 이용하였다. Fig. 8(a)는 레이저 초점이 유리기판 속에 위치할 때의 발광 이미지로 주변과 차이가 없음을 알 수 있다. 하지만 Fig. 8(b)와 같이 레이저 초점이 레진 속에 들어가면 이광자 흡수에 의한 형광 이미지를 얻을 수 있다. Fig. 8(c)는 Z축 피에조 스테이지를 이용하여 레이저 초점을 기판에서부터 레진 속으로까지 100 nm 간격으로 변화하면서 발생한 형광의 이미지를 디지털 CCD 카메라와 이미지 프로세싱 프로그램을 이용하여 빛의 세기로 표현한 그래프이다. 그래프의 기울기 분석을 통해 형광의 세기가 갑자기 변화하는 값으로부터 레이저 초점을 기판 표면에 정확히 위치시킬 수 있다. 이와 같이 디지털 CCD 카메라와 이미지 프로세싱 프로그램을 이용한 이광자 흡수에 의한 형광의 세기 변화를 측정하여 나노 스테레오리소그래피 공정에 맞는 자동초점 장치를 100 nm 정밀도로 구현하였다.

3. 불투명 기판위 마이크로 형상 제작

개발된 나노 스테레오리소그래피 공정과 본 연

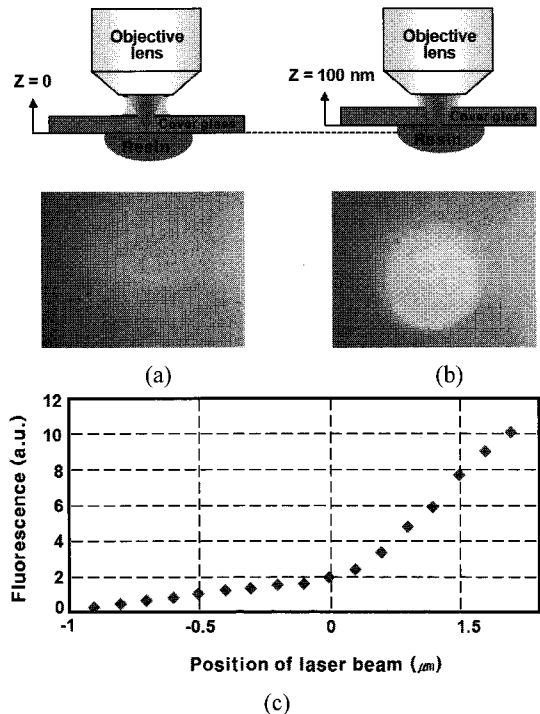


Fig. 8 (a) There is no fluorescence when the laser beam is focused in the glass, (b) but there is fluorescence when the laser beam is focused in the resin. (c) Experimental results of the auto-focusing test. The slope of the intensity of fluorescence has been changed suddenly when the focused laser beam spot is moved inside the resin

구에서 구축한 동축 조명과 자동초점 장치를 이용하여 불투명 기판인 실리콘 웨이퍼 위에 폴리머 3차원 형상을 제작하였다. 동축 조명과 CCD 카메라를 이용한 실시간 이미지 영상으로 실리콘 웨이퍼 위에 제작하고자 하는 위치를 정하였으며, 자동초점장치를 이용하여 정밀한 3차원 형상 제작을 위한 레이저 초점을 기판에 위치하였다. 이러한 방법을 이용하여 Fig. 9와 같이 SU8 폴리머 레진을 이용하여 불투명 기판인 실리콘 웨이퍼 위에 비틀어진 사각 셀 형상을 제작하였다. 레이저 출력은 50 mW, 스캐닝 속도는 40 nm/1 ms 를 사용하였다. 또한 Fig. 10 은 이광자 흡수 광환원 공정을 이용하여 금속 (silver) 패턴을 실리콘 웨이퍼 위에 제작한 것으로 불투명 기판에서도 다양한 재료로 형상 제작이 가능함을 알 수 있다. 사용된 레이저 출력은 60 mW, 스캐닝 속도는 40 nm/5 ms 이다.

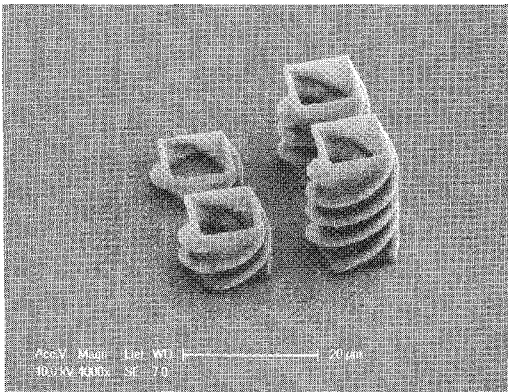


Fig. 9 SEM image of fabricated twisted box structures on a wafer substrate

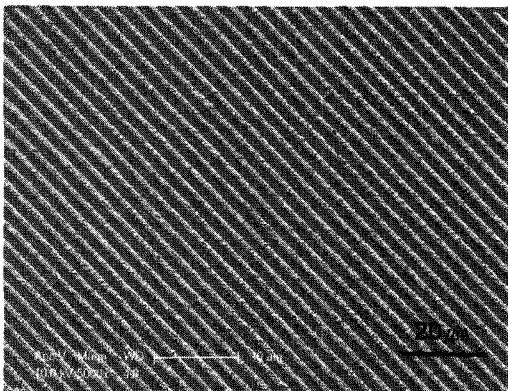


Fig. 10 SEM image of fabricated metal lines on a wafer substrate

4. 결론

나노 스테레오리소그래피 공정을 이용하여 불투명 기판 위에 마이크로형상 제작을 위한 동축 조명 및 자동초점 장치에 관한 방법을 제안하였다. 고 개구수의 오일 대물렌즈를 사용하는 시스템에 맞는 동축 조명 장치를 이용하여 불투명 기판에서도 CCD 카메라를 이용한 위치를 정할 수 있었으며, 자동초점 장치를 이용하여 레이저 초점을 기판 위에 정확히 위치시킬 수 있어 불투명 기판인 실리콘 웨이퍼에도 형상 제작이 가능함을 확인하였다. 본 연구를 통해 나노 스테레오리소그래피 공정을 이용하여 다양한 기판에서의 형상 제작이 가능하게 되어 고기능성 마이크로 응용소자 제작에 유리한 공정으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 지원 나노원천기술 개발과제 (과제 번호: 2010-0019185)에 의하여 수행되었으며 관계자 분들께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Mekaru, H. and Takahashi, M., "Imprinting a Needle Array on a Polycarbonate Substrate," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 10, No. 1, pp. 79-83, 2009.
2. Gersborg-Hansen, M., Thamdrup, L. H., Mironov, A. and Kristensen, A., "Combined electron beam and UV lithography in SU-8," *Microelectron. Eng.*, Vol. 84, No. 5, pp. 1058-1061, 2007.
3. Park, B. K., Kim, D. J., Jeong, S. H., Moon, J. H. and Kim, J. S., "Direct writing of copper conductive patterns by ink-jet printing," *Thin Solid Films*, Vol. 515, No. 19, pp. 7706-7711, 2007.
4. Cho, Y. T., Kwon, S., Seo, J. W., Kim, J. G., Cho, J. W., Park, J. W., Kim, H. and Lee, S. W., "Development of large area nano imprint technology by step and repeat process and pattern stitching technique," *Microelectron. Eng.*, Vol. 86, No. 12, pp. 2417-2422, 2009.
5. Kawata, S., Sun, H. B., Tanaka, T. and Takada, K., "Finer features for functional microdevices," *Nature*, Vol. 412, No. 16, pp. 697-698, 2001.
6. Stellacci, F., Bauer, C. A., Friedrichsen, T. M., Wenseleers, W., Alain, V., Kuebler, S. M., Pond, S. J. K., Zhang, Y., Marder, S. R. and Perry, J. W., "Laser and electron-beam induced growth of nanoparticles for 2D and 3D metal patterning," *Adv. Mater.*, Vol. 14, No. 3, pp. 194-198, 2002.
7. Serbin, J., Egbert, A., Ostendorf, A. and Chichkov, B. N., "Femtosecond laser-induced two-photon polymerization of inorganic-organic hybrid materials for applications in photonics," *Optics Letters*, Vol. 28, No. 5, pp. 301-303, 2003.
8. Deubel, M., Freymann, G. V., Wegener, M., Pereira, S., Busch, K. and Soukoulis, C. M., "Direct laser writing of three-dimensional photonic-crystal templates for telecommunications," *Nature Materials*, Vol. 3, No. 7, pp. 444-447, 2004.
9. Yang, D. Y., Park, S. H., Lim, T. W., Kong, H. J., Yi,

- S. W., Yang, H. K. and Lee, K. S., "Ultraprecise micro-reproduction of a three-dimensional artistic sculpture by multipath scanning method in two-photon photopolymerization," *Applied Physics Letters*, Vol. 90, No. 1, Paper No. 013113, 2007.
10. Son, Y., Lim, T. W., Yang, D. Y., Yi, S. W., Kong, H. J. and Park, S. H., "Study on process parameters of a su-8 resin in two-photon stereolithography for the fabrication of robust three-dimensional microstructures," *J. of KSPE*, Vol. 25, No. 1, pp. 130-137, 2008.
 11. Son, Y., Lim, T. W., Yang, D. Y., Prabhakaran, P. and Lee, K. S., "Improvement of metallic micro-structure precision employing two photon induced photoreduction process," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 32, No. 9, pp. 754-760, 2008.
 12. Lee, K. S., Kim, R. H., Yang, D. Y. and Park, S. H., "Advances in 3D nano/microfabrication using two-photon initiated polymerization," *Progress in Polymer Science*, Vol. 33, No. 6, pp. 631-681, 2008.