

초소형 광정보저장기기용 웨이퍼 스케일 대물렌즈 제작을 위한 회절광학소자 성형기술 개발

배형대¹, 임지석¹, 정기봉¹, 한정원¹, 유준모², 박노철², 강신일^{1,#}

Fabrication of diffractive optical element for objective lens of small form factor data storage device

H. Bae, J. Lim, K. Jeong, J. Han, J. Yoo, N. Park and S. Kang

Abstract

The demand for small and high-capacity optical data storage devices has rapidly increased. The areal density of optical disk is increased using higher numerical aperture objective lens and shorter wavelength source. A wafer-scale stacked micro objective lens with a numerical aperture of 0.85 and a focal length of 0.467mm for the 405nm blue- violet laser was designed and fabricated. A diffractive optical element (DOE) was used to compensate the spherical aberration of the objective lens. Among the various fabrication methods for micro DOE, the UV-replication process is more suitable for mass-production. In this study, an 8-stepped DOE pattern as a master was fabricated by photolithography and reactive ion etching process. A flexible mold was fabricated for improving the releasing properties and shape accuracy in UV-molding process. In the replication process, the effects of exposing time and applied pressure on the replication quality were analyzed. Finally, the shapes of master, mold and molded pattern were measured by optical scanning profiler. The deviation between the master and the molded DOE was less than 0.1um. The efficiency of the molded DOE was measured by DOE efficiency measurement system which consists of laser source, sample holder, aperture and optical power meter, and the measured value was 84.5%.

Key Words : Small form factor, Diffractive optical element, UV-molding, UV-replication, Microoptics, Photopolymer

1. 서론

유비쿼터스 시대의 도래로 소형화되고 고용량화된 정보저장기기의 수요가 더욱 증가하고 있다. 이로 인해 휴대용 광정보저장매체에서도 더 많은 정보저장용량이 요구되며 면밀도의 증가가 불가피하게 되었다. 면밀도 증가를 위해서는 광정보저장기기 용 대물렌즈의 개구수를 증가 시키거나 보다 짧은 파장의 레이저를 사용해야 한다. 휴대용 광정보저장기기를 소형화하기 위하여 다양한

형태의 대물렌즈가 제안되고 있다[1]. 본 논문에서는 개구수 0.85, 초점거리 0.467mm 의 405nm blue-violet 레이저를 사용하는 웨이퍼 기반의 적층형 마이크로 대물렌즈를 설계 및 제작하였다. 그림. 1 과 표. 1 은 조립된 웨이퍼 기반의 적층형 마이크로 대물렌즈에 대한 개략도와 사양을 보여주며, 대물렌즈의 구면수차를 보정하기 위해 회절광학소자(Diffractive optical element)가 사용되었다. 회절광학소자는 직접가공, 유리기판의 RIE(reactive ion etching), 사출성형, 핫 엠보싱(hot embossing), UV 복제공정 등의 다양한 방법들을 통해서 제작이 가능하다[2]. 이런 방법

1. 연세대학교 기계공학부

2. 정보저장공학과

교신저자: 연세대학교 기계공학부,

E-mail : snlkang@yosei.ac.kr

들 중에서 UV 복제공정은 액상의 photopolymer 를 사용하여 미세패턴을 복제하는 방법으로 타 복제 공정에 비해 성형성이 우수하고 공정시간이 짧아 우수한 품질의 회절광학소자를 대량으로 생산하기에 적합하다[2,3]. 본 연구에서는 광 리소그래피(photolithography)와 RIE 공정을 통해 8 스텝(step)을 갖는 회절광학소자를 제작하였다. 복제 공정을 위한 몰드 제작에 있어 회절광학소자의 회절효율에 영향을 미치는 패턴의 성형성을 최대화하기 위해 높은 이형성 및 수평방향 치수 안정성을 갖는 연성 몰드 재료를 이용한 복제 공정을 사용하였다. 또한 회절광학소자 제작 시 최적의 공정조건을 찾기 위해 광경화폴리머의 경화도에 대한 노광 조건의 영향 및, 표면 거칠기에 대한 성형압력의 영향을 분석하였다. 마지막으로 제작된 회절광학소자의 표면형상과 회절효율에 대한 측정 및 분석을 수행하였다.

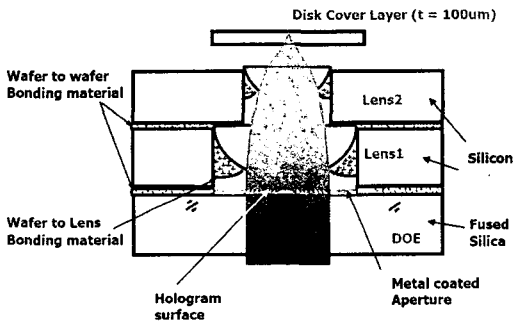


Fig.1 Schematic of assembled wafer-based micro objective lens

Table.1 Design specification

Wavelength(λ)	408(-5/+10)nm
Focal length	0.467mm
Numerical Aperture(NA)	0.85
Entrance Pupil Diameter	ϕ 0.8mm
Working Distance	40um
Cover layer	0.1mm ($n_d=1.58$)
Overall length	1.36mm
Wavefront error(λ_{rms})	0.0078 λ_{rms}

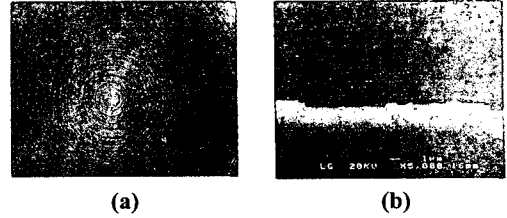


Fig.2 SEM images of master pattern of DOE

2. UV 복제공정을 통한 회절광학소자의 제작

2.1. 마스터 패턴 제작

웨이퍼 기반의 적층형 회절광학소자를 만들기 위해서는 먼저 최종 회절광학소자와 동일한 형상의 마스터 패턴(pattern)이 필요하다. 마스터 패턴은 실리콘 웨이퍼(silicon wafer) 위에 광 리소그래피와 RIE 공정을 통해 제작되었다. 제작된 회절광학소자는 8 스텝을 가지며 이는 3 개의 서로 다른 마스크(mask)를 이용한 RIE 공정으로 제작되었다. 제작된 회절광학소자의 총 식각 깊이는 605nm 이며 하나의 실리콘 기판 위에 총 21 개의 회절광학소자를 제작하였다. 그림. 2(a)와 (b)는 각각 제작된 회절광학소자의 현미경 사진과 단면 SEM 사진이다.

2.2. 몰드 제작

제작된 마스터 DOE 패턴을 이용한 복제 공정을 위해 다양한 재료 및 형태의 몰드가 사용될 수 있으나 wafer scale 의 DOE 패턴을 안정적으로 전사시키기 위해서는 높은 이형성을 가지는 연성 몰드를 사용하는 것이 적합하다. 회절광학소자의 표면품질은 몰드의 이형특성과 직접적인 연관성을 가지는데 이형특성이 우수할수록 패턴의 전사특성과 표면특성이 우수한 복제품을 만들 수 있다. 이형특성은 재료의 표면 에너지와 밀접한 상관관계를 가지는데 일반적으로 표면에너지가 작을수록 이형특성이 우수하다. 표면 에너지는 접촉각의 측정을 통해서 정량적으로 예측이 가능하며 본 연구에서는 성형된 몰드의 이형특성을 평가하기 위해서 실리콘 아크릴레이크 몰드의 접촉각을 마이크로 복제 공정에서 널리 쓰이는 재료 중 하나인 니켈 몰드와 비교하여 측정하였다 [5,6]. 접촉각 측정을 위해서 접촉각 측정 시스템이 사용되었으며 측정 시스템은 디스펜서, CCD 카메라와 접촉각 측정용 소프트웨어로 구성하였다. 접촉각은 일정량의 광경화성 수지가 몰드 위

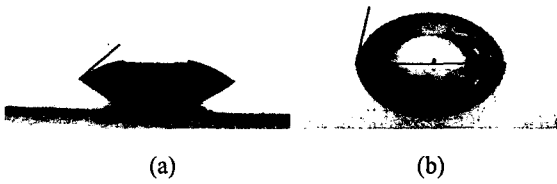


Fig. 3 Images of the photopolymer droplets on (a) nickel mold and (b) UV-transparent mold

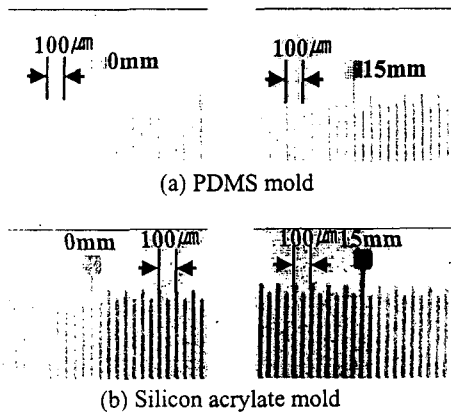


Fig. 4 Comparison of lateral shrinkage of silicon acrylate mold and PDMS mold

에 도포되고 일정 시간 후에 CCD 카메라를 이용하여 영상 데이터로 수집된 후 전용 소프트웨어를 통해서 측정되어진다. 그림. 3 은 각각의 몰드에 대하여 도포된 광경화성 수지를 촬영한 사진이다. 측정결과 니켈 몰드에서는 평균 44.97° , 폴리머 몰드에서는 74.36° 의 결과가 나왔다. 이 결과를 통해 폴리머 몰드가 니켈 몰드에 비하여 보다 나은 이형특성을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

연성몰드 제작을 위한 폴리머 복제 공정 시 발생 가능한 수평방향 수축은 DOE 의 회절효율 저감을 야기시키므로 이의 제어가 필요하다. 수평방향 수축률을 측정하고 평가하기 위해서 본 연구에서는 실리콘 아크릴레이트 계열의 광경화성 몰드와 poly-dimethyl-siloxane(PDMS) 몰드의 수평방향 수축률이 비교되었다. PDMS 는 마이크로 콘택 프린팅과 트랜스퍼 몰딩에 있어서 광범위하게 사용되는 몰드 재료이다[4]. 수축을 평가하기 위해 15mm 길이의 렌즈 어레이(lens array) 마스

터를 사용하여 상기된 두 가지 재료를 사용하여 몰드를 제작하였다. 마이크로 렌즈 어레이의 전체 수평 길이는 눈금이 있는 투명한 자와 현미경을 사용하여 측정하였다.

그림. 3 은 실리콘 아크릴레이트 몰드와 PDMS 몰드에서 lens array 의 시작점과 끝점의 현미경 사진이다. 이러한 측정방법을 통해 실리콘 아크릴레이트 몰드의 길이와 PDMS 몰드의 길이가 각각 15mm, 14.7mm 로 측정되었다. 측정결과된 결과를 바탕으로 PDMS 의 수축율은 약 2% 정도인 것으로 예측될 수 있으며 실리콘 아크릴레이트 몰드의 수축은 무시할 만큼 적은 것으로 평가할 수 있다.

2.3. 회절광학소자의 제작

UV 복제를 이용하여 회절광학소자를 제작하기 위해 그림. 5와 같은 UV 복제 공정을 수행하였다. 그림. 6 은 UV 복제 시스템을 보여준다.

적절한 노광시간을 선정하기 위해 Fourier transform infrared(FTIR) spectroscopy 를 이용한 경화도 측정 방법을 사용하였다[7]. FTIR spectroscopy 는 자외선의 흡수 또는 산란을 측정하여 재료의 화학구조를 분석하는 방법이다. 성형공정에서는 우레탄 아크릴레이트 계열의 광경화성 폴리머가 사용되었다. 이러한 우레탄 아크릴레이트를 포함하는 대부분의 광경화성 폴리머는 모노머(monomer) 상태에서 탄소 이중결합을 가지며 광경화 과정을 통해서 탄소 이중결합은 탄소 일중결합으로 변환된다. 경화(polymerization) 정도는 탄소 이중결합이 분열된 정도에 의해서 예측될 수 있다. 특정한 분자자는 고유한 파장의 빛을 흡수하기 때문에 결합의 분열된 정도는 적외선 파장대역 빛의 투과 스펙트럼에 의해서 관측될 수 있다. 그림. 7 은 본 연구에서 사용된 UV 경화 폴리머의 FTIR spectroscopy 결과이다. UV 경화 폴리머는 미경화된 상태에서 2037cm^{-1} 와 3100cm^{-1} 의 웨이브넘버에서 흡수 피크(peak)를 가지는데 이러한 흡수 피크는 노광이 시작된 후 약 10 초 후면 사라졌으며 이후 투과도에 대한 변화는 나타나지 않았다.

일반적으로 UV 복제공정에서는 복제품 표면에 주름이 생기는 surface wrinkling 현상이 발생한다. 이는 광경화 수지가 다른 곳보다 먼저 경화되기 때문에 발생하는 현상이다. 이러한 표면결함도 회절광학소자의 회절효율을 저하시키는 요인이 되며 가압공정을 통하여 제어가 가능하다.

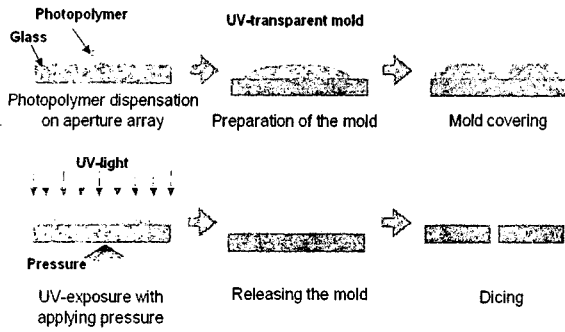


Fig. 5 Process flow of UV-replication for DOE

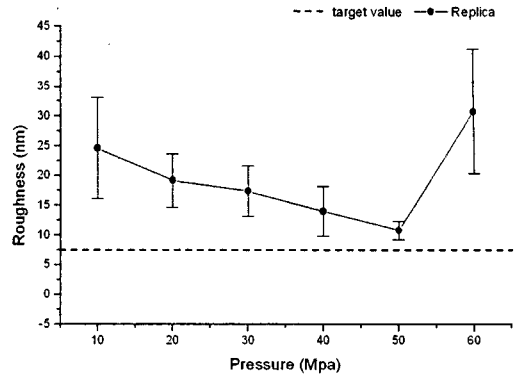


Fig. 8 Surface roughness of master, mold and replica for increasing values of applying pressure

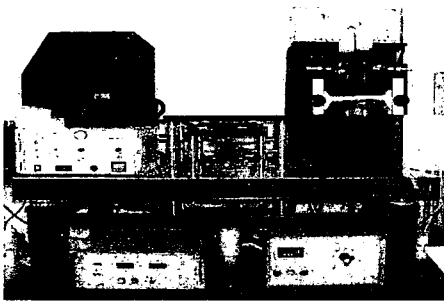


Fig. 6 Image of UV-replication system

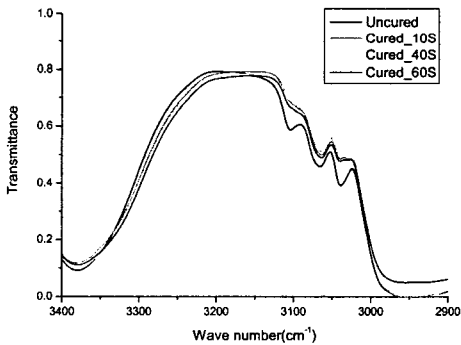


Fig.7 Measurement result of FTIR spectroscopy for silicon urethane acrylate

본 연구에서는 인가되는 압력에 대한 표면조도의 영향을 관찰함으로써, 가압공정에 따른 surface wrinkling 현상을 분석하고 최적 공정조건을 선정하였다. 그림 8. 은 복제공정 중 적절한 압력을 가할 경우 표면에 주름이 생기는 현상이 사라지는 것을 보여준다. 하지만 과도한 압력을 가할 경우에는 오히려 표면품위가 저하되게 된다. 그림. 9 는 50kPa 의 압력을 인가하여 제작한 회절 광학소자의 SEM 사진이다.

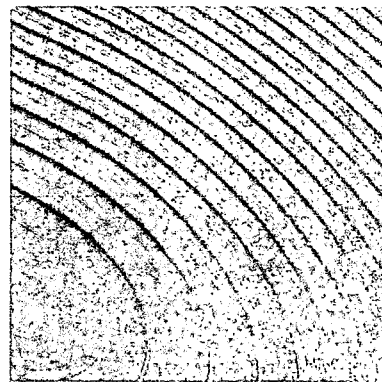


Fig. 9 SEM images of replicated DOE

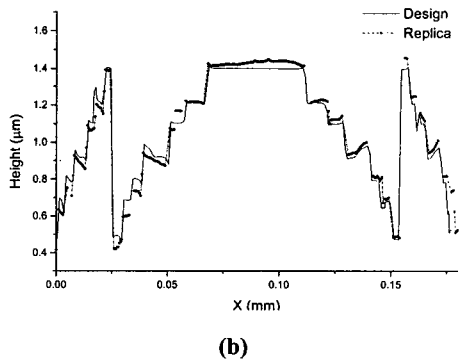


Fig. 10 Comparison of surface profile of designed DOE and replica

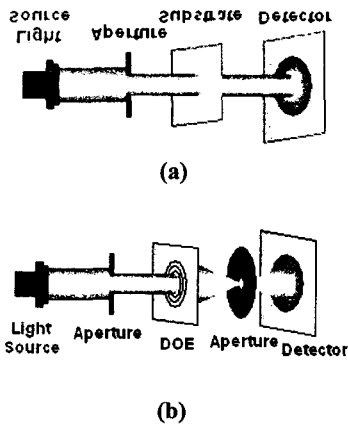


Fig. 11 (a) Measurement system for intensity of reference light, (b) Measurement system for intensity of first order diffraction

Table. 2 The efficiency of the replicated DOE efficiency

Sample	$I_{reference}$ (μW)	I_{DOE} (μW)	Efficiency (%)
Sample 1	2.67	2.23	83.52
		2.24	83.90
		2.32	86.89
Average			84.77
Sample 2	2.63	2.22	84.41
		2.23	84.79
		2.25	85.55
Average			84.92
Sample 3	2.71	2.31	85.24
		2.31	85.24
		2.29	84.50
Average			84.99
Sample 4	2.80	2.35	83.93
		2.34	83.57
		2.30	82.14
Average			83.21

3. 성형된 회절광학소자의 평가

회절광학소자를 평가하기 위하여 성형된 회절광학소자의 기하학적 형상과 회절효율을 측정하였다. 그림 10 은 마스터의 형상과 성형된 복제품의 표면 형상에 대한 비교이다. 마스터와 성형

된 회절광학소자 간의 형상 오차는 $0.1 \mu m$ 이하로 나타났다.

회절효율은 입사된 광량에 대하여 출사되는 1차 광의 광량의 비율로 나타나고 식으로는 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_{efficiency} = \frac{I_{DOE}}{I_{reference}} \times 100(\%) \quad (1)$$

성형된 제품의 회절효율 측정을 위해서 측정 시스템을 구축하였다. 회절효율 측정시스템은 406nm 청색 반도체레이저, 시편 고정부, 개구, intensity 측정기로 구성되어 있다[8]. 그림. 11 는 intensity 측정방법의 개략도이다. intensity의 측정은 다음과 같이 진행되었다. 먼저 회절광학소자와 동일한 재료, 두께의 모의기판을 통해서 기준 광량이 측정되었다. 이후 1차 회절 광의 광량을 측정하기 위해서 모의 기판을 대신하여 회절광학소자를 넣어 1차 광의 광량을 측정하였다. 지름 $500 \mu m$ 크기의 개구를 광원과 모의기판 사이에 있는 초점거리에 두어 1차 광만을 측정할 수 있게 하였다. 표. 2 에는 측정된 광량과 계산된 효율을 나타내었다. 구축된 시스템을 통하여 측정된 1차 회절효율은 평균 84.5%이다.

4. 결론

본 연구에서는 웨이퍼 기반의 적층형 마이크로 대물렌즈 용 회절광학소자를 UV 복제공정으로 제작하였다. 마스터 패턴은 광 리소그래피 공정과 RIE 공정을 통해서 제작되었다. 높은 이형특성 및 수평방향 치수 안정성을 확보하기 위해 실리콘 아크릴레이트 UV 경화 폴리머가 몰드재료로 사용되었다. 자외선 경화수지의 경화도에 대한 분석과 인가된 압력에 대한 표면조도 변화를 분석하여 최적 조건을 선정하고 8-steped DOE 를 제작하였다. 제작된 마스터와 복제된 회절광학소자는 $0.1 \mu m$ 이하의 형상차이를 보였으며 성형된 회절광학소자의 회절효율은 1차 광에서 평균 84.5%로 측정되었다. 현재 회절광학소자의 효율을 높이는 연구가 진행중이다.

후기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업 중 “나노 몰드 및 고분자 나노 복제 기술의 나

노 광전자소자 응용” 연구과제(M10400000062-04J0000-06210) 로서 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. Mifune, Y. Satoh, Y. Kiyosawa and S. Satoh, 2002, Fabrication of a High NA Microlens with Two Substrates, *Microoptics News*, Vol.19, pp. 49~54.
- [2] Fredrik Nikolajeff, Sverker Hard and Bernard Curtis, 1997, Diffractive microlenses replicated in fused silica for excimer laser-beam homogenizing, *Applied optics*, Vol. 36, pp. 8481~8489.
- [3] S. Kang, 2004, Replication Technology for Micro/Nano Optical Components, *Japanese journal of applied physics*, Vol.43, pp.5706~5716.
- [4] Philippe Nussbaum, Irene Philipoussis, Allne Husser, Hans Peter Herzig, 1998, Simple technique for replication of micro-optical element, *Society of photo-optical instrumentation engineers*, 37 (6) pp.1804~1808.
- [5] Namseok Lee, Young-Kyu Kim and Shinill Kang, 2004, Temperature dependence of anti-adhesion between a stamper with sub-micron patterns and the polymer in nano-moulding processes, *J. Phys. D: Applied physics*, 37, 1624~1629.
- [6] Namsuk Lee, Su-dong Moon, Shinill Kang and Suho Ahn, 2003, The Effect of Wettability of Nickel Mold Insert on the Surface Quality of Molded Microlenses, *Optical review* Vol. 10.
- [7] Richard P. Witte, Alexander J. Blake, Christine Palmer, Weiyuan John Kao, Analysis of poly(ethylene glycol)-diacrylate macromer polymerization within a multicomponent semi-interpenetrating polymer network system.
- [8] J. S. Sohn, M. B. Lee, W. C. Kim, et al., 2005, Design and fabrication of diffractive optical elements by use of gray-scale photolithography, *Appl. Opt.* 44, 506~511.