

레이저 직접묘화방법을 이용한 광도파로 제작

김정민#, 신보성*, 김재구**, 장원석**

Optical Waveguide Fabrication using Laser Direct Writing Method

Jung Min Kim#, Bo Sung Shin*, Jae Gu Kim**, Won Seok Chang**

ABSTRACT

The laser direct writing method has some advantages of being maskless, allowing rapid and inexpensive prototyping in comparison to conventional mask-based photolithography. In general, there are two kinds of laser direct writing methods such as the laser ablation method and the laser polymerization method. The laser polymerization method was studied for manufacturing waveguide in this paper. It is important to reduce line width for image mode waveguides, so some investigations will be carried out in various conditions of process parameters such as laser power, writing speed, focusing height and optical properties of polymer. Experimentally, the optical waveguide was manufactured trapezoid shape. Through SEM the waveguide was 20 μm width and 7.4 μm height.

Key Words : Laser Direct Writing (레이저 직접 묘화), Polymerization (중합), Waveguide (도파로), Polymer(폴리머)

1. 서론

광대역 종합정보시스템의 실현과 더불어 대용량 정보전송을 가능케 하는 광통신 발전이 가시화되고 있다. 이에 따라 초고속, 광대역 통신 시스템과 신호처리 시스템에서 광회로의 집적화가 요구되고, 평판 광소자의 역할이 커지고 있다. 지금까지는 이러한 광소자 및 부품들은 반도체 재료와 무기 실리카 계열의 소재를 근간으로 발전되어 왔으나, 이러한 소재는 고가이어서 상용화에는 부적합하다. 이에 비해 유기고분자 소재는 분자화학에 의해서 물질의 성능을 쉽게 제어할 수 있으며, 가격이 저렴하고, 응답속도가 빠르고, 광대역폭이 높으며, 소자 제작 공정이 저온에서 이루어져 매우

단순하고, 가공성이 좋고, 집적화에 매우 유리하다. 이에 부응하기 위하여 기존의 공정을 대체할 수 있는 신 공정기술의 개발이 활발히 진행되고 있다. 특히, 다품종 소량생산, 신제품 개발주기의 단축과 특수 전용부품의 주문제작이 증가함에 따라 유연성 있게 이에 대처할 수 있는 공정 기술개발의 필요성이 크게 대두되고 있다. 이러한 현실적인 요구사항을 충족시키기 위하여 마이크로 산업분야에 레이저 가공기술을 적용하기 위한 연구가 선진국을 중심으로 진행되고 있다. 레이저를 이용한 가공 공정은 마스크-노광 기술과 레이저 직접 묘화 기술 등이 있다⁽¹⁻⁴⁾. 이 중 레이저 이용한 직접 묘화 기술은 최근 광소자 제조에 많이 응용되고 있는 고분자 재료를 이용하여 광부품을 마스크 없이

접수일 : 2003 년 3 월 29 일; 게재승인일: 2003 년 11 월 14 일
교신저자 : 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부
E-mail : jungmin@kimm.re.kr, Tel: 042) 868-7903
* 부산대학교 ERC/NSDM
** 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부

저온공정으로 제조할 수 있어 제작시간이 짧으며, 시제품을 저렴하게 대량 생산할 수 있다. 또한 마스크-노광 공정에서는 제조하기 어려운 새로운 구조의 제조가 비교적 제작이 쉽다. 레이저 직접 묘화 기술은 고분자에 레이저 빛을 조사하여 굴절률을 변화시킴으로써, 광도파로의 구현이 가능하다. 레이저 직접 묘화 기술을 이용한 광소자 개발은 세계적으로 일본 NTT, 프랑스 Montpellier 대학, 호주 국립대학 그리고 미국의 Allied Signal, USC 그리고 국내에서는 KAIST 에서 활발히 연구 개발 중이다⁽⁵⁻⁶⁾. 호주 국립대학과 프랑스 Montpellier 대학은 공동으로 He-Cd Laser ($\lambda = 325 \text{ nm}$) LDW 시스템으로 유기-무기 혼합물인 Ormosil 계를 사용하여 도파로 크기가 $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ 인 4×4 다중모드 간섭 커플러를 연구 개발하고 있다. 독일 베를린 기술대학에서는 He-Ne Laser($\lambda = 632, 594, 543 \text{ nm}$) LDW 시스템을 이용해 광정보를 저장하는 용도로 이용하는 연구를 진행하고 있다. 프랑스 Montpellier 대학과 미국의 Allied Signal 사는 각각 단일모드 광도파로를 LDW 시스템을 이용하여 아크릴계 고분자 소재를 이용하여 코어의 크기가 $6 \times 6 \mu\text{m}^2$ 인 도파로를 제작하였다. 일본 NTT 는 Kr Laser($\lambda = 413 \text{ nm}$) LDW 시스템과 건식 식각법을 병행하여 중수소 플루오르 성분의 아크릴계열(deuterated fluorometh-acrylate) 고분자를 이용해 단일모드 광도파로를 제작하였다. 특히 광백플레인에 적용하기 위하여 8-inch 실리콘 기판 위에 코어의 크기가 $7 \times 8 \mu\text{m}^2$ 이고 길이가 14 cm인 직선 도파로를 제작한 사례가 발표되고 있다.

따라서 본 논문에서는 DPSS 레이저($\lambda_3 = 355 \text{ nm}$) LDW 시스템을 이용할 때 가장 경화가 잘 일어나는 광개시제 성분을 첨가한 UV 경화성 불소계 아크릴레이트를 제작하고 설계하여 광도파로 제작을 하였다. 또한 레이저 출력, 묘화 속도 등 공정 조건을 변화해가며 기초실험을 하였으며 전자현미경과 간섭계를 사용하여 제작된 도파로 형상을 관찰하였다.

2. 레이저 직접 묘화

2.1 레이저 직접 묘화 기술

레이저 직접 묘화 기술은 기존의 마스크-노광 공정에 의해 형성되어지는 위상형태 뿐만 아니라 노출 광의 세기를 변화시킴으로써 임의의 굴곡형

태의 표면 제작도 가능하다. 임의의 연속 위상 분포를 갖는 마이크로 광학 부품들(Fresnel 렌즈 등)을 한번의 묘화 공정을 제작할 수 있기 때문에 많은 수의 소자들을 집적하여 평판 집적 광회로를 구성하는데 있어서 매우 유리하다⁽⁷⁻⁸⁾.

레이저 직접 묘화 기술에는 레이저 조사시 폴리머의 식각 특성을 이용한 어블레이션 방법과 폴리머의 굴절률을 변화를 이용한 결상 특성을 이용한 광경화 방법이 있다.

2.1.1 레이저 광경화 방법

레이저 직접 묘화 기술 중 폴리머의 레이저 광경화 방법은 기질 위에 UV 경화성 폴리머를 코팅한 후 코팅층에 UV 레이저 빔을 선별적으로 조사하면, 조사된 부분 소재는 서로 가교 결합(cross-linked)되어 망상구조를 이루어 경화되어지고, 현상액으로 현상을 하면 빔이 조사되어진 부분은 경화되어지며 화학적으로 침식되지 않아 광도파로가 형성되어진다⁽⁹⁻¹³⁾. 이러한 레이저 광경화 방법을 이용하여 광도파로를 제작하기 위해서는 고분자의 재료 특성을 고려하여 굴절률 차이를 제어할 수 있는 레이저 출력, 묘화 속도 등의 레이저 조사 조건설정은 소재의 굴절률 차이, 경화밀도, 빔 확산 제어, 폴리머의 경화되는 두께를 결정하는 중요한 인자이다.

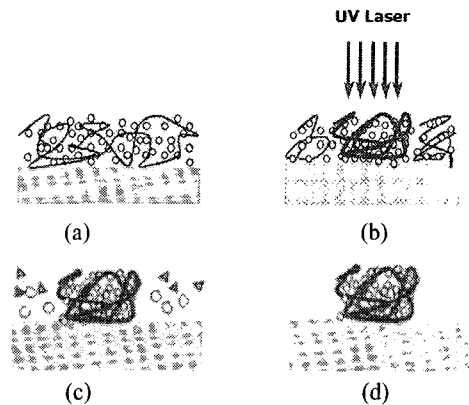


Fig. 1 UV laser polymerization method (a) polymer coating (b) photo-induced polymerization by UV exposure (c) development (d) waveguide pattern

2.2 광도파로 소재

광도파로용 많은 폴리머 재료의 특성 요구 사항 중, 사용 파장에서의 낮은 광진행 손실은 중

요한 특성이다. 광도파로의 전체 광 진행 손실은 물질 고유의 광 흡수, 폴리머 박막의 모폴로지에 기인한 광 산란, 그리고 공정 중 보이드(voids), 크랙, 불순물 등과 같은 외부요인에 기인한다. 저 손실 재료 합성을 위해서는 분자 설계 단계에서부터 물질 고유의 흡수를 최소화할 수 있도록 해야 한다. 유기 물질의 고유 광손실은 적외 진동 흡수(infrared vibrational absorption)에 기인한다. 일반적으로 유기 폴리머는 적외 영역에서 분자 구조 내의 진동에 의한 고유 흡수 영역을 가지고 있다. 특히, 탄소-수소(or O-H, N-H) 결합에 의한 근적외선 영역의 진동 흡수 손실은 제 2 및 3 고조파 상음(harmonic overtone)에 기인하는 것으로 광손실의 주된 원인이다. 이러한 손실 문제를 해결하기 위하여 C-H 결합을 C-F 결합으로 해결할 수 있다. 그 외 광손실의 주원인으로 폴리머 박막 형성시 생기는 모폴로지 형상에 의존한다

3. 실험

3.1 실험 장치

본 논문에서 개발한 공정의 기본 메커니즘은 레이저 광경화 방법이다. 사용된 레이저는 Q-Switched DPSS(Diode-Pumped Solid-State) 레이저(Coherent Co.)이며, 자세한 사양은 Table 1 과 같다. DPSS 레이저는 고체상태 레이저로 유독 가스가 발생하지 않기 때문에 사용하기에 안전하며 설치하기에 규모가 작은 편이다. 전체 시스템 구성도는 Fig. 2 와 같으며, 선속 확대기(beam expander), 반사경(mirror), 제어 시스템(control system)과 같은 광학부품과 측정장치 등으로 구성되어 있다.

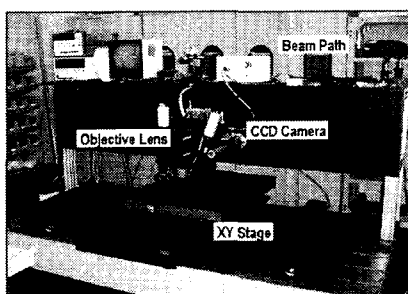


Fig. 2 Photograph of DPSS laser system

3 고조파 DPSS 레이저는 파장 1,064 nm 의 적외선

영역 부근에서 시준된 가간섭성의 빔을 방출하고 펄스 또는 연속적으로 작동될 수 있다. 비선형 광학 크리스탈(KH₂PO₄(KDP), KD₂PO₄(KD*P))을 사용하여, DPSS 레이저의 기본 고조파($\lambda_1 = 1,064$ nm)는 두 번째 고조파($\lambda_2 = 532$ nm)와 세 번째 고조파($\lambda_3 = 355$ nm)로 전환할 수 있다. 적외선부터 가시광선, 자외선까지 스펙트라의 파장을 가진 레이저 빔은 다양한 소재를 가공하기에 적합하다. 레이저 시스템과 광시스템의 개구수(NA) 파장을 사용함으로써 최소 직경(spot)이 결정된다.

Table 1 Specifications of DPSS Laser

	DPSS Laser
Wavelength	$\lambda_3 = 355$ nm
Average Power	0.8 W at 60 kHz
Beam Diameter	2.4 nm
Beam Divergence	0.3 mrad
Pulse Repetition	1 ~ 100 kHz
Pulse Duraturation	< 40 ns
Spatial Mode	TEM ₀₀

3.2 가공 소프트웨어

본 논문에서 개발한 시스템은 PMAC 제어를 장착한 PC 기반의 백러쉬 효과가 없는 XYZ 스테이지를 사용함으로써 패턴의 위치정도, 선축정도, 묘화속도를 향상시킬 수 있다. 형상 데이터 생성은 CAM S/W 를 사용하여 형상데이터를 만들어서 가공을 하였다. 미세 형상을 직접적으로 제작하기 위해 개발된 공정은 Fig. 3 과 같이 제작하고자 하는 형상을 CAD 로 모델링 한 후 가공 데이터로 변화하는 방식이다. 이때 가공 데이터는 제작형상의 외부를 제거해야 하므로 가공 재료의 윤곽을 포함하여 생성하도록 한다.

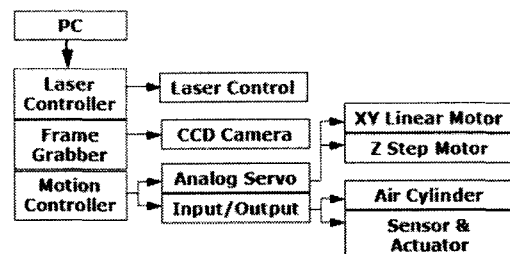


Fig. 3 Software for laser direct writing process

4. 결과

실험에 사용한 폴리머 소재는 광도파로와 박막코팅에 사용되는 UV 경화성 불소계 아크릴레이트 폴리머인 ZPLW207(Zenphotonic.Co.)⁽¹⁴⁾이며, 넓은 범위에서 다양한 굴절률 소재로 사용된다. 사용한 폴리머는 장거리 파장대인 1550 nm 에서 약 0.3 dB/cm 이며, 굴절률은 약 1.47, 유리전이온도는 180℃ 이었다. 레이저 파장대인 350 nm 영역에서 경화가 잘 일어나게 하기 위해 광개시제(photoinitiator)을 코팅층 성분의 2 %정도 첨가하였다. 폴리머 코팅층 두께는 UV 감광을 고려하여 8 μm 로 하였다. 광도파로 제작시 공기중의 탄소와 같은 오염물질을 줄이기 위해 질소분위기에서 실험을 하였다. 필름의 감광성(photosensitivity) 정도를 알기 위해 3 분 동안 마스크 정렬 시스템(mask aligner system)에서 감광시켰다. 이때 전체 감광 시킨 에너지는 약 15 J/cm² 이었다. 도파로 제작을 위해 공정 변수는 레이저 출력, 묘화 속도와 초점 높이를 변화하면서 하였다. Table 2 는 다양한 공정조건에 따라 제작된 도파로의 선폭을 나타낸 것이다.

Table 2 Waveguide line width with various process conditions

Sample No.	Laser Power [mW]	Writing Speed [mm/sec]	Focusing Height [μm]	Line Width [μm]
#1	1.0	600	0	14.5
#2	2.0	600	0	17.4
#3	3.0	600	0	20.2
#4	4.0	600	0	22.4
#5	5.0	600	0	26.8
#6	6.0	600	0	35.4
#7	3.0	600	2	21
#8	3.0	600	4	20.8
#9	3.0	600	6	20.5
#10	3.0	600	8	21.3
#11	3.0	900	0	20
#12	3.0	1,200	0	20.8

Table 2 에서 빔 스폿 크기와 같은 도파로 선폭 크기는 시편 3 이었으며, 레이저 출력 3.0 mW 이하일 경우에는 폴리머가 빔의 크기만큼 출력이 모두 미치지 않았음을 알 수 있었다. Fig. 4 (a) ~ (f)는 광경화 되어 얻어진 도파로 형상을 관찰하기 위해 전자현미경으로 촬영한 것이다. 레이저 빔 모양은 가우시안 분포이며, 가운데 부분의 출력이 높아 어블레이션 되는 모양을 띄고 있다. Fig 5. (a) ~ (c)는 간섭계를 사용하여 레이저 출력이 높아짐에 따라 어블레이션의 정도를 알기 위해 도파로의 3 차원 형상을 관찰한 것이다. 레이저 빔 조사시 폴리머 소재의 응력에 의해 사다리꼴 형태의 도파로가 형성되었다. 공정 시 레이저 출력이 도파로 형상에 가장 큰 영향을 미치는 인자임을 알 수가 있다.

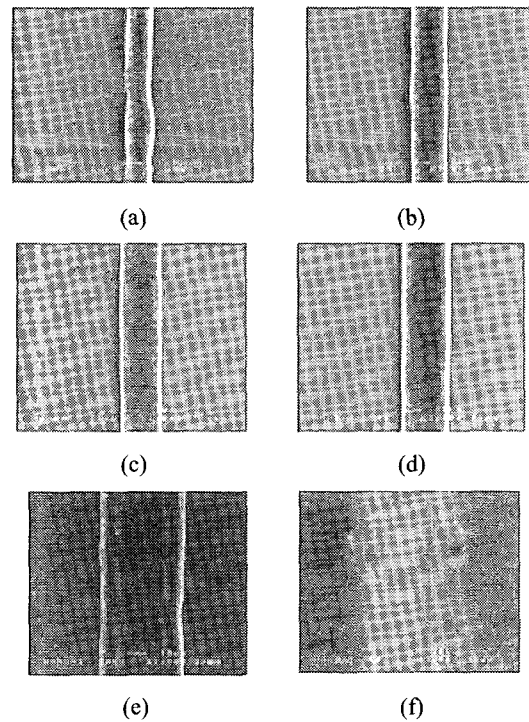


Fig. 4 SEM Photograph of waveguide shape with writing speed 600 mm/sec, laser focus and laser power (a) 1.0 mW (b) 2.0 mW (c) 3.0 mW (d) 4.0 mW (e) 5.0 mW (f) 6.0 mW

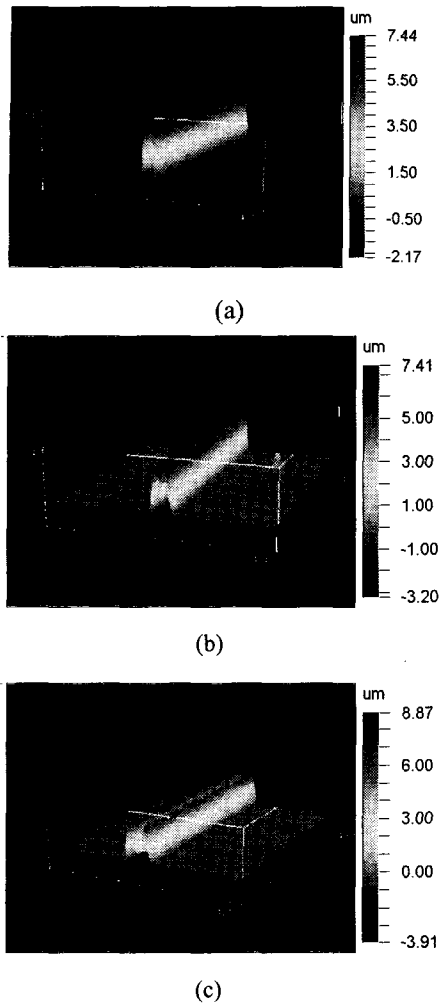


Fig. 5 Cross sectional shape waveguide with writing speed 600 mm/sec, focusing height 0 μm and laser power (a) 3.0 mW (b) 4.0 mW (c) 5.0 mW

5. 결론

본 논문에서는 레이저 직접묘화 기술 중 UV 레이저 광경화 방법을 사용하여 광도파로를 제작하였다. 사용한 소재는 광경화성 불소계 아크릴레이트 폴리머이며, 사용한 레이저 파장대에서 광반응을 잘 일으키게 하기 위해 폴리머 합성시 광개시제 성분을 첨가하여 합성하였다. 레이저 직접묘화를 위한 기초실험은 DPSS 레이저 시스템($\lambda_3 = 355 \text{ nm}$)으로 하였으며, 그 결과 단면의 형상이 사다리꼴인 광도파로 코어부분을 얻을 수 있었으며

선폭 20 μm, 높이 7.4 μm 이었다. 향후 도파로 선폭은 레이저 직접묘화 시스템에 대물렌즈를 사용하여 레이저 빔을 집중시키면 선폭을 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 논문은 산업자원부·정보통신연구부가 지원하고 있는 IMT-2000 정부출연급기술개발 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 광소자 제조를 위한 Laser Beam Direct Writing System 개발 사업을 수행 중이며, 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

1. Chrisey, D. B., Pique, A., Fitz-Gerald, J., Auyeung, R. C. Y., McGill, R. A., Wu, H. D., Duignan, M., "New approach to laser direct writing active and passive mesoscope circuit elements," *Applied Surface Science*, Vol. 154-155, pp. 594-600, 2000.
2. Wong, W. H., Zhou, J. and Pun, E. Y., "Low-loss polymeric optical waveguide using electron-beam direct writing," *Applied Physics Letters*, Vol.78, No. 15, pp. 2110-2112, 2001.
3. Wong, W. H. and Pun, E. Y., "Polymeric waveguide wavelength filters using electron-beam direct writing," *Applied Physics Letters*, Vol. 79, No. 22, pp. 3576-3578, 2001.
4. Baek, N. K., Kim, D. E., "Optimization of laser lithography technique based on taghchi method," *J. of the KSPE*, Vol. 19, No. 7, pp. 59-63, 2002.
5. Jung, J. I., Park, O. H. and Bae, B. S., "Fabrication of channel waveguide by photochemical self-developing in doped sol-gel hybrid glass," *J. Sol-Gel Tech*, Vol. 26, pp. 897-901, 2003.
6. Bae, B. S., Park, O. H., Charters, R., Luther-Davies, B., Atkins, G. R., "Direct laser writing of self-developed waveguides in benzyl dimethyl ketal-doped sol-gel hybrid glass," *J. Mat. Res.*, Vol. 16, No. 11, pp. 3184-3187, 2001.
7. Wang, C., Chan, Y and Lam, Y., "Fabrication of diffractive optical elements with arbitrary surface-relief profile by direct laser writing," *Opt. Eng.*,

- Vol .41, No.6, pp.1240-1245, 2002.
8. Salgueiro, J. R., Roman, J. F. and Vicente, Moreno., "System for laser writing to lithography masks for integrated optics," *Opt. Eng.*, Vol. 37, No 4, pp.1115-1123, 1998.
 9. Chraters, R. and Luther-Davis, B., *SPIE Proc.* Vol. 4279, pp. 101, 1988.
 10. Eldada, L., Xu, C., Stengle, K. M. T., Shacklette, L. W., and Yardly, J. T., "Laser-Fabrication Low Loss Single-Mode Raised-Rib Waveguiding Device In Polymer," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 14, pp.1704, 1996.
 11. Fardad, A., Andrews, M., Milova, G., Malek-Tabrizi, A. and Najafi, I., " Fabrication of ridge waveguides: a new solgel route," *Appl. Opt.*, Vol. 37, pp. 2429, 1998.
 12. Franke, H., "Optical recording of refractive-index patterns in doped poly-(methyl methacrylate) films," *Appl. Opt.*, Vol. 23, pp. 2729, 1985.
 13. Okamoto, N. and Tashiro, S., *Opt. Commum.*, Vol. 66, pp. 93, 1998.
 14. www.zenphotonics.com