[논문] 한국소성가공학회지(2004), 제 13 권 제 3 호
Transactions of Materials Processing Vol. 13, No. 3, (2004)

UV 성형을 통한 마이크로 렌즈 어레이의 제작

김석민* · 임지석* · 강신일** · 전병희***

(2004년 2월 10일 접수)

Fabrication of Microlens Array by UV-molding

S. M. Kim, J. S. Lim, S. I. Kang and B. H. Jeon

Abstract

UV-molded microlens arrays with high replication quality were fabricated using a parametric design method. It is important to maximize the replication quality, because one can obtain the replicated micro-optical components with desired properties by accurate control of the shape. In the present study, nickel mold inserts for microlens arrays with lenses having diameters between 3μm and 230μm were fabricated by electroforming process. An UV-molding system was designed and constructed, a simple technique to avoid micro-air bubbles was first suggested, and the effects of the compression pressure and UV-curing dose on the replication quality of UV-molded microlens arrays with a diameter of 14μm were examined experimentally. Finally, geometrical and optical properties of the replicated microlens arrays were measured and analyzed.

Key Words : UV Molding, Photopolymer, Microlens Array, Replication Quality, Shrinkage

1. 서 론

광 저장장치, 광통신 부품, 디지털 디스플레이 등의 분야에서 높은 광학적·기하학적 물성치를 갖는 마이크로 렌즈 어레이의 수요가 증가하고 있다. 마이크로 렌즈 어레이는 포토레지스트 리플로우[1], droplet 방법[2], 핫 엠보싱[3~4], 마이크로 압축성형[5~6], UV 성형[7~15] 등의 방법으로 제작될 수 있다. 이중 폴리머 마이크로 복제 기술은 높은 품질의 마이크로 렌즈 어레이의 저가·양산이 가능한 매우 중요한 기술 분야라 하겠다. 다양한 폴리머 마이크로 복제 기술 중, UV 성형공정은 자외선에 반응하여 경화하는 포토폴리머를 이용한 상온저압공정으로, 낮은 열팽창 계수, 높은 안정성, 낮은 복굴절 등의 장점을 갖는 성형품의 제작이 가능하여 마이크로 광부품 제작에 적합하며[7,9], 또한 광전자 모듈상에 마이크로 광부품을 집적함에 있어 매우 적합한 공정이다. Tanigami등은 UV성형을 이용하여 높은 열적 안정성과 낮은 수차를 갖는 프레넬 렌즈를 유리기판 상에 성형하는 연구를 진행하였으며[7], Kunnavakkam등은 UV 성형을 이용하여 낮은 비용과 낮은 손실의 마이크로 렌즈 어레이를 제작하였다.[8] Dannberg등은 UV 포토 리소그래피 기술을 통하여 웨이퍼 크기로 VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser)과 같은 하이브리드 미소 광 서브시스템을 제작하였다.[9~10] Nussbaum 등은 PDMS 몰드를 이용한 양각 혹은 음각형상의 마이크로 렌즈 어레이의 저가 제작 방법에 대해 연구를 수행하였다.[11]

UV 성형 공정은 자외선에 반응하여 경화되는포

* 연세대학교 대학원 기계공학과
** 연세대학교 기계공학부
*** 인덕대학 컴퓨터응용기계계열

토폴리머를 이용하므로 중합 공정에서 발생하는 재료의 수축에 의해 성형품의 전사성이 저하되는 현상이 발생한다.[9,16] UV 성형된 마이크로 광 부품에 대하여 원하는 물성치를 얻는 것이 매우 중요하므로 수축에 의한 전사성 저하를 보정하는 방법에 대한 연구가 필요하다. Reduschuck 등은 다양한 조성비의 재료를 사용하여 V-groove를 성형함으로써, 재료에 따른 성형 품질의 영향을 연구하였다.[12] 그러나 UV 성형시 수축에 의한 전사성 저하는 공정 조건의 제어를 통해 보정되는 것이 가장 바람직 하다.

본 연구에서는 UV 성형을 통한 마이크로 렌즈 어레이의 제작을 위해 전주도금을 통해 직경 3μm ~230μm, 피치 5μm~250μm의 마이크로 렌즈 어레이 형상 캐비티(cavity)를 갖는 금속 몰드 인서트를 제작하였다. UV 성형공정을 위해 성형 시스템을 구축하고, UV 성형시 발생하는 미소 기포의 제거 방법을 제안하였다. 또한 직경 14μm의 마이크로 렌즈 어레이의 UV 성형을 통해 공정변수의 전사성에 대한 영향을 분석하였다. 최종적으로 성형된 렌즈의 기하학적 광학적 특성을 분석함으로써 마이크로 렌즈 제작에 있어 본 공정의 적합성을 평가하였다.

2. 몰드 인서트 제작

UV 성형공정을 이용하여 마이크로 렌즈 어레이를 제작하기 위해 직경 3μm~230μm의 렌즈 형상의 캐비티를 갖는 금속 마이크로 몰드 인서트를 전기주조 방식을 통하여 제작하였다. 전주도금을 위한 기저층(seed layer)으로 니켈을 증착하였고, 니켈 전기주조를 수행 하였다. 일반적으로 상용 되고 있는 니켈 전기 주조 용액을 전해 물질로 사용하였으며, 전기 주조된 니켈 몰드 인서트는 원하는 두께와 평탄도를 얻기 위하여 뒷면 연마 작업(back polishing)을 수행하였다. Table 1은 본 연구에서 사용된 전기주조 공정조건이다. Fig. 1은 전기주조 공정으로 제작된 직경 14μm, 피치 15μm의 렌즈 캐비티를 갖는 니켈 몰드 인서트의 SEM 사진이다.

마스터 렌즈 및 전주도금된 캐비티의 기하학적 특성을 측정하기 위해 Atomic force microscope (PSIA M5), Scanning optical profiler (WYKO NT2000 3D profiler), surface profiler (DEKTAK 6M), SEM, 광학현미경이 사용되었다. Fig. 2는 AFM으로 측정된 직경 14μm, 피치 15μm의 렌즈 캐비티를 갖는니켈 몰드 인서트의 삼차원 형상이며. Fig. 3은 마스터 렌즈와 몰드 캐비티의 단면 형상을 비교한 것이다. 전기주조로 제작된 니켈 몰드 캐비티의 sag height는 중앙부에서 마스터 렌즈와 0.04μm 이하의 편차를 갖고 있으며, 이는 양각 현상과 음각형상을 측정하는 과정에서 오는 AFM의 측정오차로 추정된다.

Table 1 Current electroforming process data for mold insert for microlens array

Parameter		Value
Temperature(℃)		43-45
pH		4-4.2
Current density(mA/cm^2)		10-20
Concentration of electrolytes (g/l)	H_3BO_3	300-450
	$Ni(NH_2SO_3)_2[4H_2O]$	15
	$NiCl_2[6H_2O]$	45

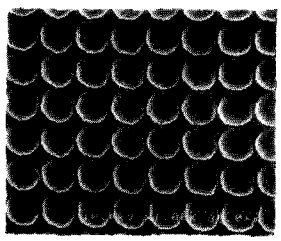


Fig. 1 SEM images of electroformed nickel mold insert; lens diameter: 14μm, pitch: 15μm

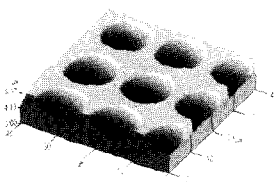


Fig. 2 3-D profiles of mold insert having microlens cavities from AFM data; lens diameter: 14μm, pitch: 15μm

광학 현미경을 통해 측정된 마스터 렌즈와 몰드 캐비티의 직경의 평균값은 각각 14.023μm와 14.018μm 이며, AFM을 통해 측정된 마스터 렌즈

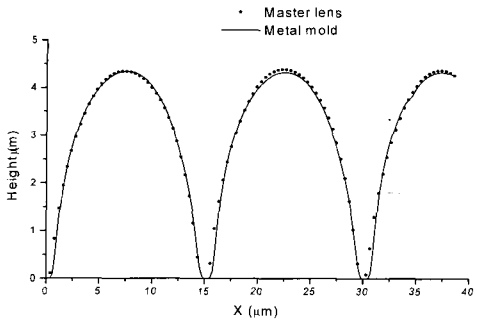


Fig. 3 Comparison of surface profiles of master lens array and corresponding mold cavities; lens diameter: 14μm, pitch: 15μm

와 몰드 캐비티의 sag height의 평균값은 각각 4.358μm와 4.333μm 이다. 각각의 경우 모두 4인치 웨이퍼 내에서 ± 1% 이하의 편차를 갖는다. 이는 본 연구의 전주도금 공정을 통해 4인치 웨이퍼 내에서 안정적인 몰드 제작 공정이 가능함을 의미한다.

3. UV 성형 공정

3.1. UV 성형 시스템 설계/제작

UV 성형 공정은 UV에 반응하여 경화되는 액체 상태의 포토폴리머(photopolymer)를 미세패턴을 가진 몰드 인서트에 도포하고, 유리 등의 자외선을 투과 하는 기판으로 덮은 후, 적절한 압력과 자외선을 조사해줌으로써 포토폴리머를 경화시켜 성형품을 얻어내는 공정이다. 본 연구에서 사용된 UV 성형 시스템은 Fig. 4와 같이 설계/제작 되었다. UV 성형 시스템은 자외선 램프, 반사갓, 셔터, 자외선 투과기판, 가압 시스템으로 구성된다. 80 W/cm^{2}의 광도를 갖는 265~420nm의 넓은 파장대의 자외선을 방사하는 메탈 할라이드 램프를 사용함으로써 다양한 재료에 대한 실험이 가능하도록 하였으며, 반사갓을 이용하여 자외선이 재료에 수직으로 도달하도록 하였다. 또한 셔터를 이용하여 광량 조절이 가능하게 하였으며, 최대 200 kPa의 가압이 가능한 유압식 가압 시스템을 설치하였다.

3.2. 미세기포의 제거

포토폴리머와 몰드 인서트 사이에서 자주 발생되는 포토폴리머의 미세 기포는 제작된 UV 성형품의 다양한 결함으로 나타난다. 미세 기포을 제거하는 방법으로는 일반적으로는 진공 상태에서 성형 하는 방식이 사용되었으나, 이는 공정 시간이 늘리고 고가의 진공 장비가 필요하다는 단점이 있다. 본 연구에서는 진공을 대신하여 몰드에 포토폴리머를 도포한 후 약 40°C로 가열하는 방법을 사용하였다. 열을 가해줌으로써, 포토폴리머의 점성이 감소되며, 미세 기포의 열역학적 운동성이 증가하여 미세 기포가 스스로 몰드 캐비티 내에서 빠져 나올 수 있게 하였다. Fig. 5는 미세 기포가 제거 되기 전의 직경 230μm, 피치 250μm의 마이크로 렌즈와 가열을 통해 미세 기포를 제거 시킨 뒤 성형된 마이크로 렌즈를 보여준다.

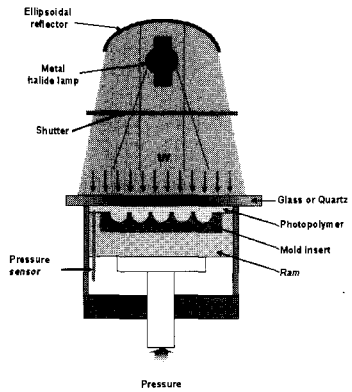
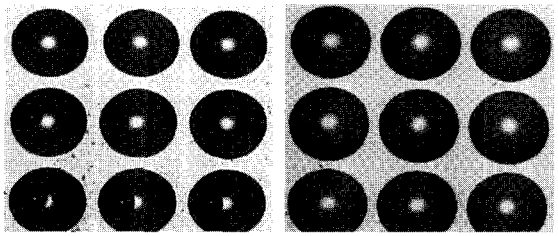


Fig. 4 Schematic of the UV-molding system



(a) **(b)**

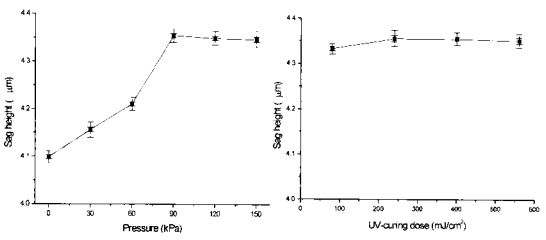
Fig. 5 The images of (a) microlens with micro-air bubbles and (b) microlens after removal of micro-air bubbles (lens diameter: 230μm, pitch: 250μm)

3.3. 전사성 향상을 위한 공정 제어

UV 성형 공정에서 발생하는 전사성 감소의 주된 원인은 광경화 반응 과정 동안에 야기되는 수축이다. UV성형공정으로 제작된 성형품의 전사성

은 UV 경화 포토폴리머 재료 및 경화 온도, 시간, 조사되는 자외선의 강도 및 파장, 인가 압력 등의 공정 조건에 의해 영향을 받는다.[12,16] 본 연구에서는 조사되는 자외선의 광량 및 인가 압력을 주요 공정 변수로 설정하고, 직경 14μm, 피치 15μm의 마이크로 렌즈 어레이를 성형하여 전사성에 대한 공정변수의 영향을 분석하였다. 전사성을 정량화 하기 위하여 AFM을 이용하여 렌즈의 sag height를 측정하여 초기 설계값과 비교하는 방법을 사용하였다. Fig. 6(a)는 400mJ/cm^{2}의 광량에서 인가 압력이 sag height에 미치는 영향을 나타낸다. 인가 압력이 증가 하면 sag height가 증가하여 디자인 렌즈의 sag height (4.358μm)에 근접하게 된다. 이는 인가 압력이 90kPa, 혹은 그 이상일 경우 렌즈 형상에서 발생하는 자외선 성형 수지의 수축이 인가 압력에 의해 보상 되기 때문이다. 그러나 과도한 인가 압력은 마이크로 크랙 등의 내부 결함을 야기할 수 있으므로 적절한 압력의 선택이 중요하다. Fig. 6(b)는 90kPa의 고정 인가압력에서, 자외선의 광량 변화가 성형된 렌즈의sag height에 미치는 영향을 나타낸다. 그래프를 통해 성형시의 자외선 광량의 변화는 sag height에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다. Fig. 7은 인가압력을 각각 90kPa과 0kPa으로 하였을 때 디자인 렌즈 어레이와 각각의 공정에서 성형된 렌즈 어레이의 표면 형상을 비교한 것이다.

90kPa의 인가압력의 유무에 따른 디자인 렌즈와 성형된 렌즈의 sag height의 편차는 각각 0.01μm 와 0.26μm 이다. 이는 인가압력을 가하지 않은 상태에서 14㎛의 마이크로 렌즈 성형 공정에서의 수축률은 약5.9%이나, 가압공정을 통해 수



(a) (b)

Fig. 6 Sag height of the replica for increasing values of (a) compression pressure with UV-curing dose fixed at 400 mJ/cm^2 and (b) UV-curing dose with compression pressure fixed at 90kPa

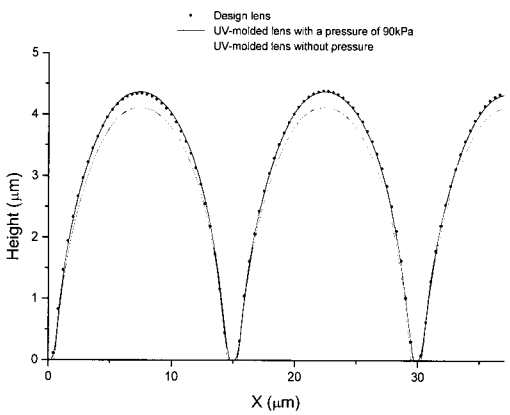


Fig. 7 Comparison between surface profiles of design lens array and those of molded lens arrays with or without application of a pressure of 90kPa; lens diameter: 14μm, pitch: 15μm

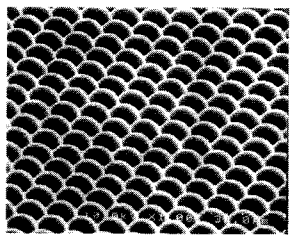


Fig. 8 SEM image of UV-molded microlens array with a lens diameter of 14 μm, pitch of 15μm

축율을 오차범위인 0.3% 이내로 보정할 수 있음을 보여준다. 본 실험은 4 인치 크기의 성형 시편을 이용하여 진행되었으며 시편 내에서의 편차 및 반복성형에 따른 편차는 약 0.02μm 이다. Fig. 8은 최적의 공정 조건(인가압력: 90kPa, UV 광량: 400 mJ/cm^2) 에서 제작된 직경 14μm, 피치 15μm의 마이크로 렌즈 어레이의 SEM 이미지이다.

4. 형상특성 및 광특성 분석

4.1 기하학적 특성

본 연구에서 제안된 가압 공정을 이용한 마이크로 렌즈 어레이의 UV 성형 공정을 통해 직경 3~230μm, 피치 5~250μm의 마이크로 렌즈 어레이를 제작하였다. 이중 최적의 공정조건에서 제작된 직경 14μm 피치 15μm를 갖는 렌즈 어레이의 기하학적 특성을 측정하여 Table 2에 정리하였다. Table을 통해 UV 성형된 렌즈 어레이의 직경 및

sag height, 곡률반경, 피치 값과 마스터 렌즈에서의 각각의 값간의 편차는 1% 이하임을 알 수 있다. 또한 마스터 렌즈와 UV성형된 렌즈간의 오차는 동일 몰드내의 캐비티 간의 오차보다 작아 실제로 성형공정에서 오는 전사성 저하는 거의 없다고 보여진다. 표면 거칠기의 측정 표본은 시스템 자체의 오차를 포함하지 않도록 무작위로 선정되었으며 각각의 렌즈 중심부에서 2μm x 2μm의 면적을 선정하여 측정을 진행하였다. Table 2의 측정결과를 살펴보면 금속 몰드의 표면 거칠기가 마스터 렌즈의 그것보다 약간 증가함을 알 수 있으나, 이는 전도층 증착공정과 전기주조의 공정의 제어를 통해 향상될 수 있으리라 판단된다. 한편 본 연구를 통해 성형된 렌즈의 표면 거칠기(RMS)는 2.59nm이며 이는 일반적으로 마이크로 렌즈 어레이가 사용되는 디지털 디스플레이, 정보저장장치, 광통신부품등에서 이용되는 파장대인 405~850nm에서 전혀 문제가 되지 않는 수준이다.

4.2 광학적 특성

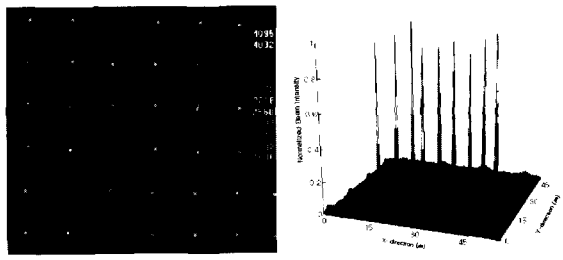
제작된 마이크로 렌즈의 초점에서의 빔프로파일을 측정하기 위해 현미경과 665nm 레이저를 이용한 CCD 시스템으로 구성된 빔 프로파일러를 구축하고 초점에서의 빔 프로파일을 측정하였다. Fig. 9는 지름 14μm, 피치 15μm, 곡률반경 9.74μm를 갖는 UV 성형 렌즈의 측정 결과를 보여준다. 결과로부터 최고 광도의 $1/e^2$ 지점에서의 빔의 직경이 1.44μm 임을 알 수 있다. 지름 14μm의 렌즈의 초점거리는 18μm로 측정되었고, 이는 계산된 값(굴절률: 1.5305, 곡률반경: 9.74μm, 초점거리 18.36μm) 대비 1μm 이하의 오차를 보인다. 또한 각 spot 간의 피치는15μm으로 균일하게 측정되었으며 각각의 렌즈에 의한 spot의 광도 역시 매우 균일함을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

높은 전사성과 광특성을 갖는 마이크로 렌즈어레이를 UV 성형을 통해 제작하기 위해 전주도금 방법을 이용하여 직경 3~230μm의 마이크로 렌즈 어레이 몰드 인서트를 제작하였다. UV 성형을 위해 압력과 광량의 제어가 가능한 UV 성형 장비를 설계 구축하였으며, 몰드와 재료에 경화전 열을 가하는 방법을 이용하여 UV 성형시 주로 발생하는 미세 기포 결함을 제거하였다. 또한 UV 성형 공정변수인 인가 압력과 UV광량에 따른 성형품의 성형 품질에 대한 영향을 정량화 하고 이를 분석하였다. 본 연구에서 지름 14μm의 마이크로 렌즈 성형시 발생하는 5.9% 수축률을 90kPa의 인가압력을 통해 0.3% 이하로 개선하였으며, 최종적으로 성형된 마이크로 렌즈의 성형 품질과 광특성을 4인치 크기에서 측정하고 분석하여 웨이퍼 스케일의 공정이 가능함을 확인하였다. 본 연구의 마이크로 렌즈 성형공정을 실제 응용 제품에의 적용에 관한 연구가 현재 진행중에 있다.

Table 2 Data of geometrical properties of lens arrays with diameter of 14μm and pitch of 15μm

Parameter		Values		
		Master lens	Mold insert	Molded lens
Base diameter (mean, μm)		14.043	14.081	14.085
Lens sag (mean, μm)		4.35	4.33	4.34
Radius of curvature (mean, μm)		9.72	9.77	9.74
Pitch (mean, μm)		15.037	15.097	14.998
Surface Roughness (nm)	Rp-v	10.0	21.9	25.0
	Rrms	1.20	2.05	2.59
	Ra	0.929	1.40	1.87



(a) (b)

Fig. 9 Focused light spot and intensity profile of UV-molded microlens array; lens diameter: 14μm, pitch: 15μm, radius of curvature:9.74μm

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고

있는 고기능 초미세 광· 열유체 마이크로부품 기술 개발 사업의 세부과제로서 수행 중이며 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

참 고 문 헌

(1) Z. Popovic, R. Sprague and G. Neville Connell., 1988, "Technique for monolithic fabrication of microlens arrays", Appl. Opt., Vol. 27(7), pp. 1281~1297.

(2) E. Park, M. Kim and Y. Kwon., 1999, "Microlens for Efficient Coupling Between LED and Optical Fiber", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 11(4), pp. 439~441.

(3) L. Lee, M. Madou, K. Koelling, S. Daunert, S. Lai, C. Koh, Y. Juang, Y. Lu and L. Yu, 2001, "Design and Fabrication of CD-Like Microfluidic Platforms for Diagnostics: polymer-Based Microfabrication", Biomedial Microdevices, Vol. 3(4), pp. 339~351.

(4) M. Gale., 1997, "Replication techniques for diffractive optical elements", Microelectronic Engineering, Vol. 34, pp. 321~339.

(5) S. Moon, S. Kang and J. Bu, 2002, "Fabrication of polymeric microlens of hemispherical shape using micromolding", Optical Engineering, Vol. 41(9), pp. 2267~2270.

(6) S. Moon, N. Lee and S. Kang, 2003, "Fabrication of Microlens Array using Micro-compression Molding with Electroformed Mold Insert", Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 13, pp. 98~103.

(7) N. Tanigami, S. Ogata, S. Aoyama, T. Yamashita and K. Imanaka, 1989, "Low Waveforont Aberration and High-Temperature Stability Molded Micro Fresnel Lens", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 1(11), pp. 384~385.

(8) M. Kunnavakkam, F. Houlihan, M. Schlax, J. Liddle, P. Kolodner, O. Nalamasu and J. Rogers, 2003, "Low-cost, low-loss microlens arrays fabricated by soft-lithography replication process", Applied Physics Letters, Vol. 82(8), pp. 1152~1154.

(9) P. Dannberg, G. Mann, L. Wagner and A. Brauer, 2000, "Polymer UV-moulding for micro-optical systems and O/E-integration", Micromaching Technology for Micro-Optics, Proc. SPIE Vol. 4179, pp. 137~145.

(10) P. Dannberg, R. Bierbaum, L. Erdmann and A. Brauer, 1999, "Wafer scale integration of micro-optic and optoelectronic elements by polymer UV reaction molding", Photonics Packaging and Integration, Proc. SPIE, Vol. 3631, pp. 244~251.

(11) P. Nussbaum, I. Philipoussis, A. Husser and H. Herzig, 1998, "Simple technique for replication of micro-optical elements", Opt. Eng., Vol. 37(6), pp. 1804~1808.

(12) St. Rudschuck, D. Hirsch, K. Zimmer, K. Otte, A. Braun, R. Mehnert and F. Bigl, 2000, "Replication of 3D-micro- and nanostructures using different UV-curable polymers", Microelectronic Engineerin -g, Vol. 53, pp. 557~560.

(13) U. Zeitner and P. Dannberg, 2001, "Double-side hybrid microoptical elements combining functions of multistage optical systems," Lithographic and Micromachining Techniques for Optical Component Fabrication, Proc. SPIE, Vol. 4440, pp. 44~50.

(14) A. Braun, K. Zimmer, B. Hosselbarth, J. Meinhardt, F. Bigl and R. Mehnert, 1998, "Excimer laser micromachining and replication of 3D optical surfaces", Applied Surface Science, Vol. 127-129, pp. 911~914.

(15) N. Dumbravescu and M. Ilie, 1999, "Replication of diffractive gratings using embossing into UV-cured photo-polymers", Micromachine Technology for Diffractive and Holographic Optics, Proc. SPIE, Vol. 3879, pp. 206~213.

(16) K. Baikerikar and A. Scranton, 2001, "Photopolymerizable liquid encapsulants for microelectronic devices", Polymer, Vol. 42, pp. 431~441.