

광통신 용 VCSEL Array 상에 Microlens Array를 집적하기 위한 UV 성형 공정기술 개발

한정원*, 김석민, 김홍민, 이지승, 임지석(연세대학교 대학원 기계공학과),
강신일(연세대학교 기계공학부)

Development of UV molding Process to Integrate Microlens Array
on VCSEL Array for Optical Communication

Jeongwon Han, Seok-min Kim, Hongmin Kim, Jeesung Lee, Jiseok Lee (Mechanical Engineering Dept.,
Yonsei University), Shinill Kang (School of Mechanical Engineering, Yonsei University)

ABSTRACT

UV molding is a process for integrating micro/nano polymeric optical components on optoelectronic modules. In the present study, a microlens array for vertical cavity surface emitting laser(VCSEL) to fiber coupling was designed, integrated and tested. At the design stage, design variables were optimized to maximize the coupling efficiency, and tolerance analysis was carried out. At the integration stage, the UV transparent mold was fabricated and the microlens array on VCSEL array was integrated by UV molding process. Finally the coupling efficiency of VCSEL to fiber was measured and analyzed.

Key Words : Optical Communication, VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser), Optical fiber, Fiber Coupling, Microlens Array, UV molding

1. 서론

점차 디지털화, 정보화 되는 사회 속에서 개인이 이용하는 정보량이 급속도로 증가함에 따라 광통신(optical communication), 광정보 저장(optical data storage) 장치 및 디지털 디스플레이(digital display) 등의 산업분야에서 광부품의 시장 규모가 빠른 속도로 증대되고 있다. 또한 최근에는 전자 모듈(electronic module)과 마이크로 광부품(micro optical component)이 집적된 광전자 모듈(optoelectronic module)에 대한 수요가 늘어나고 있다. 이러한 광전자 모듈의 광효율 향상 및 고해상도 실현을 위하여 마이크로 렌즈 어레이(microlens array)가 핵심부품으로 자리잡고 있다. 광전자 모듈상에 마이크로 렌즈 어레이를 집적하는 방법으로는 그림 1에 제시된 바와 같이 (a) 이미 제작된 단품 마이크로 렌즈 어레이를 별도의 커넥팅 구조물을 사용하여 전자 모듈과 연결하는 방법[1,2], (b) 포토 레지스트 리플로우

방법[3], (c) micro drop let을 이용한 방법[4], (d) 마이크로 UV 성형 공정을 이용한 방법 등이 있다. 이러한 방법 중 마이크로 UV 성형 공정은 전자 모듈상에 마이크로 광부품을 직접 복제하여 집적하는 방법으로 마이크로 광전자 모듈을 낮은 가격에 양산하는 것이 가능하다. 또한 광학적 align을 수행함으로써 높은 정렬도의 실현이 가능하며 마이크로 UV 성형 공정은 광전자 모듈상에 마이크로 광부품을 집적하는 가장 적합한 방법이라 할 수 있다.

본 연구에서는 최근 광통신 분야에서 레이저 소스(laser source)로 사용되고 있는 수직 발광 레이저(VCSEL)와 광섬유 간의 커플링(coupling)을 위한 마이크로 렌즈 어레이를 마이크로 UV 성형 공정을 이용하여 VCSEL array 상에 집적하였다. 이를 위해 각각 설계변수를 커플링 효율이 최대가 되도록 최적화하였으며 아울러 공차설계를 수행하였다. 최종적으로 VCSEL 상에 집적된 렌즈의 광섬유 커플링 효율을 측정할 수 있는 시스템을 구축하고, 이를 통

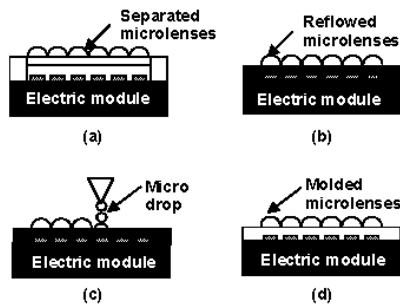


Fig. 1 Various integration methods of microlenses for optoelectronic module; (a) Align and assemble method, (b) Reflow method (c) Micro drop method (d) UV molding method

해 마이크로 렌즈의 커플링 효과를 측정, 분석 하였다.

2. VCSEL용 렌즈 어레이의 설계

VCSEL용 렌즈는 VCSEL에서 발진된 빛을 다른 파이버 혹은 수광 소자로 전달해 주는 역할을 한다. 그림 2는 본 연구를 통해 설계되고 제작될 마이크로 렌즈 어레이의 기본 개념도이다. 렌즈 설계에 있어서 기본적으로 고려해야 하 변수는 렌즈의 재료, 곡률 반경, 두께 등이며, 본 연구에서 설계되는 VCSEL용 마이크로 렌즈 어레이의 경우는 발광 소자에서 렌즈까지의 거리, 렌즈에서 광섬유까지의 거리이다. 설계의 제한 조건으로는 VCSEL에서 발광된 빛의 퍼짐각(Divergence angle), 광섬유의 고유 NA(numerical aperture), 광섬유내의 코어직경 등으로 요약할 수 있다. 본 연구에 사용된 렌즈 재료는 아크릴레이트(Acrylate) 계열의 UV 경화 폴리머로서 굴절율은 $1.53@\lambda=850\text{nm}$ 이다. 그림 3은 본 연구에 사용된 850nm 의 발진 파장을 갖는 VCSEL의 현미경 사진이며 발광부의 직경은 $18\mu\text{m}$ 이다. 설계에 사용된 광섬유의 코어직경은 $50\mu\text{m}\pm 0.5\mu\text{m}@850\text{nm}$ 이며, 광섬유의 고유 NA는 0.13이다.

VCSEL과 광섬유의 커넥터로 사용되는 렌즈의 커플링 효율은 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta = 10 \log \left(\frac{I_o}{I_i} \right) \quad (1)$$

여기서 I_i 는 발광 소자인 VCSEL에서 발광된 빛의 총 에너지를 나타내며, I_o 는 광섬유로 수광되는 빛의 총 에너지를 나타낸다. 반면 I_i 는 설계 변수에 대해 독립적이며, I_o 는 설계 변수에 대한 함수이다. 따라서 본 연구를 통해 설계하려는 렌즈의 커플링 효율은 x_1 을 VCSEL에서 렌즈까지의 거리, x_2 를 렌즈에서 광섬유까지의 거리, R 을 렌즈의 곡률 반경, D 를 렌즈의 직경으로 표시하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

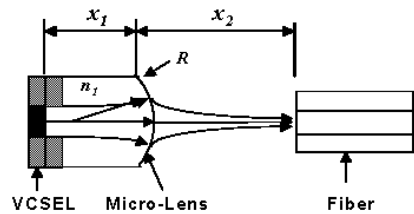


Fig. 2 Design concept of microlens for VCSEL to optical fiber coupling

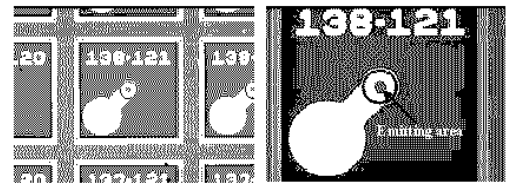


Fig. 3 Microscope images of VCSEL array

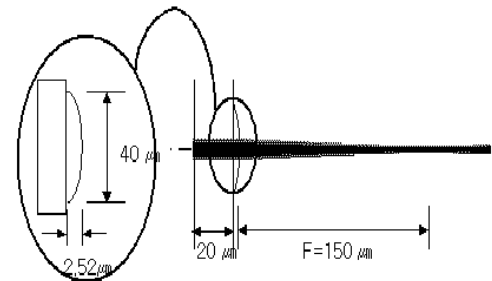


Fig. 4 Optimal design of microlens for VCSEL to optical fiber coupling

$$\eta(x_1, x_2, R, D) = 10 \log \left\{ \frac{I_o(x_1, x_2, R, D)}{I_i} \right\} \quad (2)$$

여기서 본 연구에서는 삽입 손실을 최소화하는 렌즈 어레이의 설계를 위해 목적함수로 식 (2)를 선택하고, 적절한 구속조건과 제작의 용이성을 고려하여 최적의 렌즈를 설계하였다.

설계된 렌즈의 직경은 $40\mu\text{m}$, substrate 두께는 $20\mu\text{m}$, sag height는 $2.52\mu\text{m}$, 초점 거리는 $150\mu\text{m}$ 이며 이때의 커플링 효율은 -1.106dB 이다. 그림 4는 최적 설계된 렌즈의 설계치를 보여준다. 그림 4의 최적 설계된 렌즈는 렌즈의 제작, 조립 등의 공정을 거치면서 커플링 효율이 감소하게 된다.

3. UV molding 공정을 이용한 마이크로 렌즈 어레이의 제작

3.1 성형 System 설계 및 구축

UV molding 공정은 전자소자 상에 광소자를 성형함과 동시에 부분적으로 패터닝을 진행하는 방법이다. 따라서 UV molding system은 기본적인 UV light source와 콜리메이팅 광학계가 요구된다. 또한

mold와 전자소자와의 align을 위해 align system이 필요하며, UV molding 시 발생하는 수축에 의한 전사성 저하를 해결하기 위한 가압공정을 수행할 수 있는 가압부가 요구된다.[5] 그림 5는 본연구에서 구축한 UV molding system의 사진이다. A부는 폴리메이팅 된 자외선을 조사할 수 있는 exposing unit 이며 B와 C는 초정밀 align을 가능케 하는 현미경 및 stage 부이며, D부는 가압을 가능하게 하는 hydraulic unit 이다.

3.2 성형 공정

VCSEL array 상에 설계된 형상의 마이크로 렌즈 어레이를 성형하기 위해 먼저 최종 마이크로 렌즈 형상과 동일한 마스터 렌즈와 이를 이용한 UV 투과형 몰드를 제작하였다. 그림 6(a)는 반도체 공정을 통해 제작된 마스터 렌즈 어레이의 SEM 사진이며 그림 6(b)는 UV 투과형 몰드의 SEM 사진이다. 그림 7은 AFM을 이용하여 측정된 마스터 렌즈와 UV 투과형 몰드의 3D profile 이다.

그림 8은 마스터 렌즈와 UV 투과형 몰드의 렌즈 케비티 단면 프로파일의 비교이다. 측정결과 마스터 렌즈의 직경은 $40\mu\text{m}$, sag height는 $2.52\mu\text{m}$, pitch는 $330\mu\text{m}$ 이며 이는 설계치와 동일한 수치이다. UV 투과형 몰드의 측정값 역시 마스터 렌즈와 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 제작된 UV 투과형 몰드를 이용하여 VCSEL array chip 상에 UV molding을 수행하였다. 사용된 재료는 아크릴레이트 계열의 UV 경화 폴리머로 재료의 점도는 400cps 이며, 2000mJ 의 광량과 90kPa 의 가압조건에서 성형공정이 수행되었다.

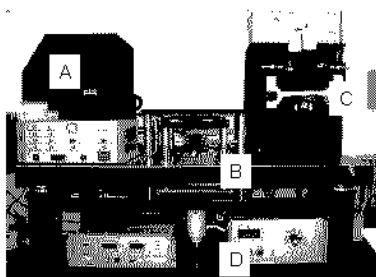


Fig. 5 Picture of monolithic lithography integration system

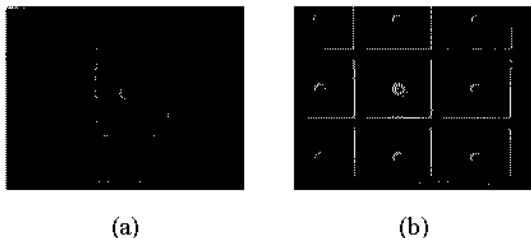


Fig. 6 SEM images of (a) master lens and (b) UV transparent mold

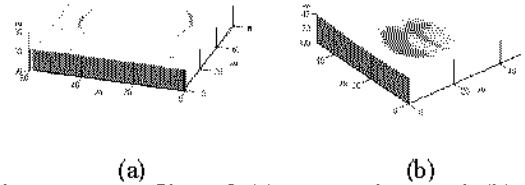


Fig. 7 3D profiles of (a) master lens and (b) UV transparent mold obtained from AFM data

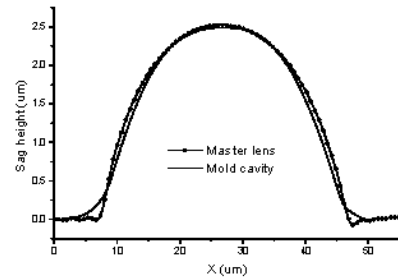


Fig. 8 Comparison between surface profile of master lens and reversed surface profile of UV-transparent mold cavity

그림 9는 VCSEL상에 제작된 마이크로 렌즈 어레이의 현미경 사진과 SEM 사진이며 그림 10은 AFM을 이용하여 측정된 성형 렌즈의 surface profile과 master lens profile을 비교한 것이다. 성형된 렌즈의 직경은 $40\mu\text{m}$ 이며, sag height는 $2.50\mu\text{m}$, pitch는 $330\mu\text{m}$ 이다. 그림 10을 통해 master lens profile과 성형품의 오차는 $0.05\mu\text{m}$ 이하임을 확인할 수 있으며 성형 렌즈의 표면거칠기(Rrms)는 1.24nm 로 매우 우수함을 확인하였다.

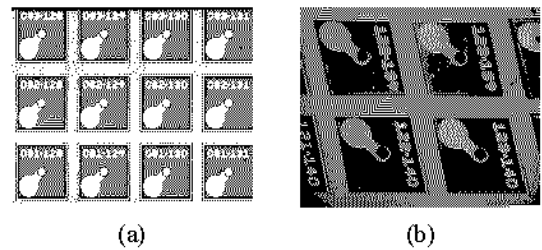


Fig. 9 (a) microscope image and (b) SEM image of integrated microlens array on VCSEL array

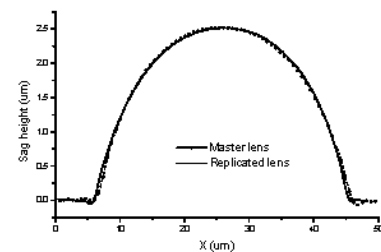


Fig. 10 Comparison between surface profiles of master lens and replicated lens

4. Coupling efficiency 측정

VCSEL 상에 제작된 마이크로 렌즈의 커플링 효율을 측정하기 위해 자체 제작한 테스트 보드상에 VCSEL을 와이어본딩 하였다. Power supply를 이용하여 VCSEL에 1.8V의 전압에서 10mA의 전류를 인가하였으며 이때의 output power는 4mW 이다. 본 연구에서는 커플링 효율 측정을 위해 그림 11과 같이 power supply와 VCSEL이 장착되어 있는 test board, 광섬유, 테스트 보드 및 광섬유의 정렬을 위한 3축 스테이지, 광섬유에 삽입된 광량을 측정할 수 있는 파워미터로 구성되는 커플링 효율 측정 시스템을 구축하였다. 표 1은 구축한 측정 시스템으로 측정한 결과이며 커플링 효율은 설계치와 마찬가지로 -3dB 이하임을 확인하여 본 공정의 유용성을 검증하였다.

5. 결론

본 연구에서는 UV molding 공정을 이용하여 VCSEL array 상에 광섬유 커플링용 마이크로 렌즈 어레이를 설계, 성형, 평가하였다. 이를 위해 다양한 설계 변수를 커플링 효율과 제작 가능성을 고려하여 최적 설계하였으며 광섬유의 align 오차를 고려한 공차설계를 진행하였다. UV molding 공정을 위해 마스터 렌즈와 UV 투과형 몰드를 제작하여 VCSEL array 상에 마이크로 렌즈 어레이를 집적하였다. AFM을 이용한 형상측정을 통해 설계된 렌즈와 마스터 렌즈, 몰드 케비티, 최종 성형 렌즈의 surface profile을 설계치와 비교하였다. 최종적으로 VCSEL 상에 제작된 마이크로 렌즈를 이용한 VCSEL과 광섬유의 커플링 효율을 측정하기 위해 VCSEL이 구동할 수 있도록 테스트 보드를 제작하여 소자를 와이어본딩 한 후 측정 시스템을 통해 커플링 효율을 측정하고 설계치와 비교함으로써 본 공정의 유용성을 검증하였다. 현재 본 UV molding 공정을 이용한 다양한 광전자 모듈의 제작에 관한 연구가 진행 중이다.

후기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기 연구센터(과제번호: Grant R11-1997042-12003-0)의 지원을 받아 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다

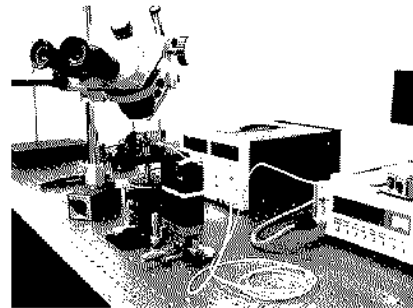


Fig. 11 Measurement system of VCSEL to fiber coupling efficiency

Sample No.	Insertion loss (dB)	Sample No.	Insertion loss (dB)
1	-1.61	11	-1.81
2	-2.33	12	-2.62
3	-2.70	13	-2.40
4	-2.04	14	-1.40
5	-1.40	15	-2.04
6	-1.81	16	-1.66
7	-1.93	17	-1.11
8	-2.58	18	-1.76
9	-1.66	19	-1.98
10	-1.32	20	-2.60

Table 1 Measurement results of VCSEL to fiber coupling efficiency

참고문헌

1. S. Kang, "Fabrication Technology for Micro-optics - micromolding", MOC'03, pp. 106-109, 2003.
2. .S. Moon, N. Lee, and S. Kang, "Fabrication of Microlens Array using Micro-compression Molding with Electroformed Mold Insert", Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 13, pp. 98-103, 2002.
3. Z.D. Popovic, R.A. Sprague, and G.A. Neville Connell, "Technique for Monolithic Fabrication of Microlens Array, Applied Optics, Vol. 27, pp. 1281-1284, 1988.
4. D.L. MacFarlane, V. Narayan, J.A. Tatum, W.R. Cox, T. Chen, and D.J. Hayes, "Microjet Fabrication of Microlens Arrays", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 6, pp. 1112-1114, 1994.
5. S. Kim, D. Kim, S. Kang, "Replication of Micro-optical Components by Ultraviolet-molding Process" Journal of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems, Vol. 2, pp. 356-359, 2003