

마이크로렌즈를 이용한 다이오드 레이저의 출력빔 조절 Output beam shaping of diode laser by monolithic integration of microlens

*#장기수^{1,2}, 송영민², 이용탁², 양순철¹, 김효식¹, 김건희¹

*#K. S. Chang(ksc@kbsi.re.kr)^{1,2}, Y. M. Song², Y. T. Lee², S. C. Yang¹, H. S. Kim¹, and G. H. Kim¹

¹ 한국기초과학지원연구원 연구장비개발실, ²광주과학기술원 정보통신공학과,

Key words : Selective oxidation, Microlens, Vertical-cavity surface-emitting laser

1. 서론

수 마이크로부터 수백 마이크로의 직경을 갖는 마이크로렌즈 및 마이크로렌즈 어레이는 광 응용시스템의 소형화, 고집적화, 저가격화 추세에 따라 그 필요성과 응용분야가 급격히 증가하고 있다 [1]. 특히 마이크로렌즈 어레이는 병렬 광통신 시스템에서 광섬유와 광원의 결합효율을 증가시키기 위해 광원에 집적되어 전체적인 패키징 비용을 절감시키고, 광검출기에 집적되어 빛을 광검출기의 활성층에 집광시킴으로써 광검출기의 효율을 증가시키고, 또한 이미징 센서의 상부에 집적되어 광감도를 높여주는 역할을 한다. 반도체 마이크로렌즈는 반도체재료의 높은 굴절율로 인해 큰 개구수 (Numerical Aperture)를 갖는 마이크로렌즈의 제작을 가능하게 할 뿐만 아니라 반도체 광전소자에 모노리식 (monolithic) 집적이 가능하다는 장점으로 인해 현재까지 여러가지 제작 방법들이 개발되어 왔다. 기존의 대표적인 반도체 마이크로렌즈 제조 방법들로 포토레지스트 리플로우 (photoresist reflow) 후 건식식각 (dry etching) [2], focused ion beam milling [3], diffusion limited wet-etching [4] 등의 방법들이 제안되었다. 그러나 이러한 방법들은 광전소자 상에 마이크로렌즈 형성을 위해 추가적인 공정과정들을 필요로 하고 리소그래피 공정 시 반도체레이저와 마이크로렌즈를 정확히 정렬해야 하므로 집적공정이 복잡하고 따라서 제조비용이 비싸지는 단점이 있다.

본 논문에서는 상기한 문제점들을 해결하기 위해 화합물반도체의 선택적 산화를 이용한 새로운 마이크로렌즈 제조방법과 자기정렬(self-aligned) 마이크로렌즈가 집적된 수직공진 표면발광 레이저 (Vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL)의 제조방법을 제안하고 그 실험결과를 기술하고자 한다.

2. 소자 구조 및 제작

알루미늄(Al) 함유율이 높은 $Al_xGa_{1-x}As$ ($x > 0.8$)를 약 $400^\circ C$ 이상 고온의 산화 가열로에 수증기를 공급하여 습식 산화시키면 알루미늄 산화물이 생성된다 [5]. 이때 산화속도는 $Al_xGa_{1-x}As$ 의 조성비(x)가 증가함에 따라 지수적으로 증가하므로 $Al_xGa_{1-x}As$ 에피층의 성장 시 성장방향으로 Al 함유율을 적절히 변화시켜 성장한 후 측면으로부터 습식 산화하면 렌즈모양을 갖는 산화 프로파일 (산화된 $Al_xGa_{1-x}As$ 와 산화되지 않은 $Al_xGa_{1-x}As$ 의 경계면)을 얻을 수 있다. 제안된 아이디어의 실험적 검증을 위해 다음과 같은 실험을 진행하였다. 먼저 Molecular Beam Epitaxy장비를 이용하여 GaAs 기판위에 $Al_xGa_{1-x}As$ 의 조성비(x)를 0.89에서 0.98까지 선형적으로 증가시키면서 $1.27\mu m$ 두께로 성장하고 그위에 $0.1\mu m$ 두께의 GaAs층을 성장하였다. 단, $Al_xGa_{1-x}As$ 층의 성장 시 조성비를 정확히 조절하기 위해 그리고 측면으로부터 산화 시 수직방향의 산화를 억제하여 구면 렌즈모양을 얻기 위해 2 원소 화합물 (GaAs, AlAs)의 두께로 3 원소 화합물 (AlGaAs)의 조성비를 조절하는 디지털 합금 (digital alloy) 방법을 이용하였다. 성장된 에피층 위에 리소그라피 공정을 이용하여 $20\mu m$ 너비의 포토레지스트 stripe 패턴을 형성하고 이를 마스크로 하여 AlGaAs층의 측면이 노출되도록 stripe mesa 구조로 건식 식각하였다. 그

다음 포토레지스트를 제거하고 측면이 드러난 AlGaAs층을 $400^\circ C$ 에서 20 분 동안 습식 산화하였다. 산화 후에 샘플을 절단하고 주사전자현미경 (SEM)을 이용하여 oxidation profile을 측정하였다. Fig. 1은 샘플 단면의 SEM 이미지와 oxidation profile을 보여준다. SEM 이미지의 어두운 부분이 산화된 AlGaAs 영역이고 밝은 부분이 산화되지 않은 AlGaAs 영역이다. $1\mu m$ 파장에서 산화되지 않은 AlGaAs의 굴절율은 약 3.0 인데 반해 알루미늄 산화물의 굴절율은 1.7 정도로 작으므로 산화 후 단면이 볼록렌즈 역할을 하게 된다. 제작된 oxide-buried 마이크로렌즈의 곡률반경은 $33\mu m$ 이고 곡률반경으로부터 계산된 초점거리는 $27\mu m$ 이다.

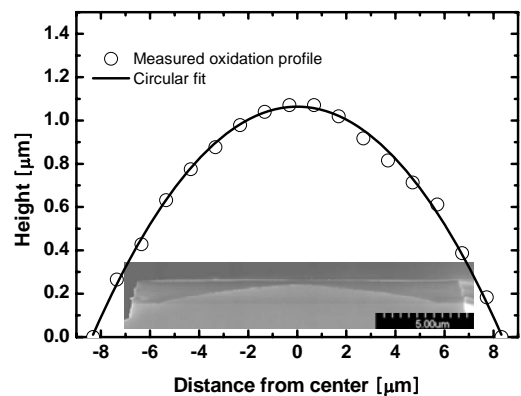


Fig. 1 Oxidation profile of 20- μm -wide stripe mesa with circular fitting. Inset: Cross-sectional SEM image after oxidation.

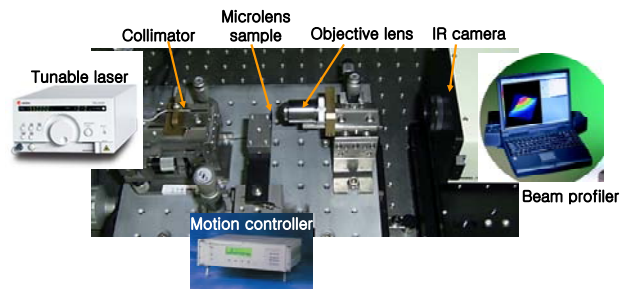


Fig. 2 Microlens focal length and focused spot pattern measurement setup.

3. 측정 결과

Oxide-buried 마이크로렌즈의 집광 특성을 알아보기 위해 stripe mesa와 같은 산화 조건으로 $20\mu m$ 직경의 원형 마이크로렌즈를 제작하고 초점거리와 focused spot 패턴을 측정하였다. Fig. 2는 마이크로렌즈의 집광 특성 측정 셋업을 보여준다. 측정셋업은 단일모드 광섬유에 연결된 파장가변 레이저, fiber-pigtailed collimator, 60 배율 대물렌즈, CCD 카메라, 레이저 빔 프로파일러, 초정밀 motion controller와 motorized translation stage로 구성되어 있다. 마이크로렌즈의 초점거리 측정을 위해 먼저 마이크로렌즈의 이미지가 CCD 카메라에 의해 가장 선명하게 보이는 곳에 마이크로

렌즈를 위치시킨 다음 마이크로렌즈를 광축을 따라 collimator 를 향해 이동시키면서 레이저빔의 모양을 측정하여 spot 크기가 최소가 되는 위치까지 이동시킨다. 이때 이동거리가 측정하고자 하는 마이크로렌즈의 초점거리가 된다. Fig. 3 은 렌즈 표면으로부터 28 μm 초점거리에서 측정된 마이크로렌즈를 통과한 레이저 빔의 광도분포를 보여준다. 측정된 focused spot 직경은 4 μm 로 oxide-buried 마이크로렌즈가 강한 집광특성을 갖고 있음을 알 수 있다.

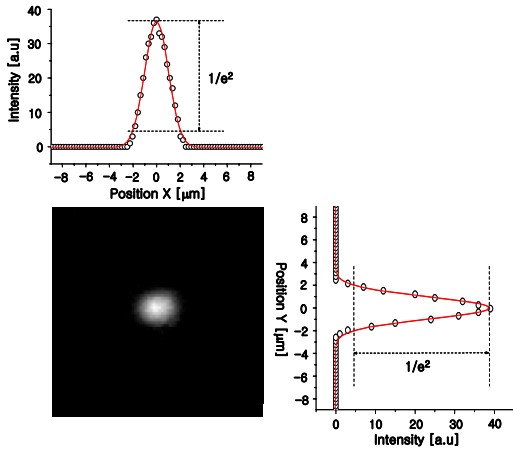


Fig. 3 Intensity profile of laser beam at the focal plane of microlens

화합물반도체의 선택적 산화를 이용한 마이크로렌즈 제조방법의 가장 큰 장점중의 하나는 fig. 4 와 같이 산화막 전류제한 구조를 갖는 수직공진 표면발광 레이저의 광출력면에 한번의 산화공정으로 산화막 구경과 마이크로렌즈를 동시에 형성함으로써 자기정렬 마이크로렌즈를 부가적인 공정과정 없이 제작할 수 있다는 것이다. 제안된 아이디어의 실험적 검증에 위해 다음과 같은 실험을 진행하였다. 먼저 980nm VCSEL 에피층 위에 1.3 μm 두께의 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 층의 조성비(x)를 0.8 에서 0.96 까지 디지털 합금방법으로 선형적으로 증가시키면서 성장하고 $\lambda/4$ 두께의 GaAs 층을 성장한다. 성장 후 마이크로렌즈가 집적된 VCSEL 제작을 위해 통상적인 VCSEL 제작공정을 이용하였다. Fig. 5 는 VCSEL 제작공정 완료 후 1:5 KOH:H₂O 용액을 이용해 마이크로렌즈를 덮고있는 Al-oxide를 선택적으로 제거한 후 공초점 현미경을 이용하여 측정된 마이크로렌즈가 집적된 VCSEL의 표면 프로파일이다. 제작된 마이크로렌즈는 구면 렌즈 형태를 갖고 있으며 곡률반경은 27 μm 이다. 광선 추적 시뮬레이션을 이용한 oxide-buried 마이크로렌즈와 oxide-removed 마이크로렌즈의 초점거리는 각각 23, 14 μm 이다. 마이크로렌즈의 집광특성을 측정하기 위해 마이크로렌즈가 없는 기준 VCSEL, oxide-buried 마이크로렌즈와 oxide-removed 마이크로렌즈가 집적된 VCSEL을 각각 제작하고 fig. 6 과 같이 마이크로렌즈 표면으로부터 거리에 따른 레이저 빔의 모양을 측정하였다. 마이크로렌즈가 없는 VCSEL로부터 나오는 레이저 빔은 지속적으로 발산하는 반면 마이크로렌즈가 집적된 VCSEL로부터 나오는 빔은 작은 spot으로 강하게 집광됨을 알 수 있다. Oxide-removed 마이크로렌즈가 집적된 VCSEL의 경우 15 μm 의 초점거리에서 빔 반경 ($1/e^2$)이 3.5 μm 이고 oxide-buried 마이크로렌즈가 집적된 VCSEL의 경우 25 μm 의 초점거리에서 빔 반경이 3.7 μm 로서 시뮬레이션 결과와 10% 오차 이내로 일치한다.

4. 결론

본 연구에서는 화합물반도체의 선택적 산화를 이용한 마이크로렌즈와 자기정렬 마이크로렌즈가 집적된 VCSEL 제조방법을 개발 하였다. 이 방법은 제작 공정이 간단하여 저가의 고성능 광원 제작을 가능하게 하고 레이저 빔 조절

을 위한 외부렌즈의 필요성을 제거하여 광통신, 광배선, 광센서 등 반도체레이저 응용 시스템의 패키징 비용을 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

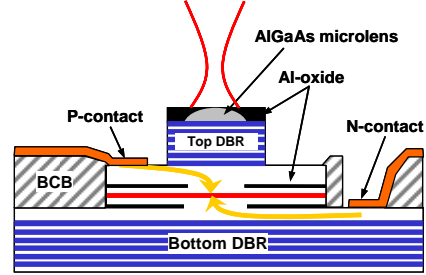


Fig. 4 Schematic diagram of oxide-buried microlens-integrated VCSEL

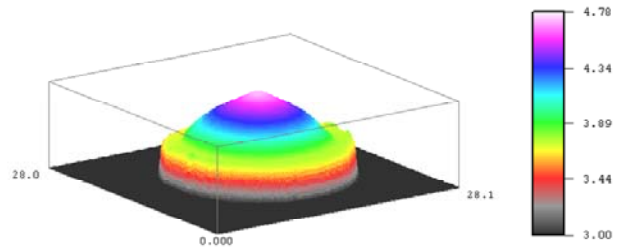


Fig. 5 A 3-D surface profile of the oxide-removed microlens-integrated VCSEL.

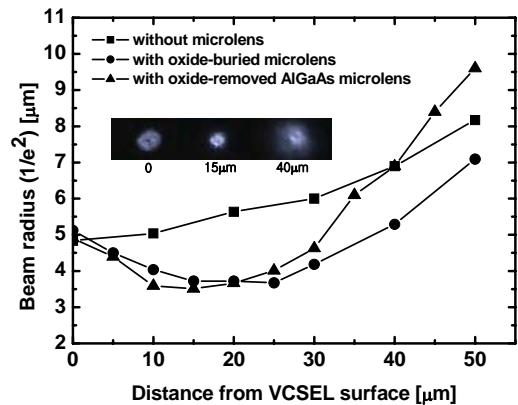


Fig. 6 Measured beam radius versus distance from the surfaces of VCSELs. Inset: Output beam images at different distances from the surfaces of oxide-removed microlens-integrated VCSEL

참고문헌

1. H. P. Herzig, "Micro-Optics: Element, System and Application," New York:Taylor and Francis, 1997.
2. E. M. Strzelecka et al., "Fabrication of refractive microlenses in semiconductors by mask shape transfer in reactive ion etching," Microelectron. Eng., vol. 35, pp. 385-388, 1997.
3. Y. Fu, "Integration of microdiffractive lens with continuous relief with vertical-cavity surface-emitting lasers using focused ion beam direct milling," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 13, pp. 424-426, 2001.
4. S. H. Park et al., "Microlensed vertical-cavity surface-emitting laser for stable single fundamental mode operation," Appl. Phys. Lett., vol. 80, pp. 183-185, 2002.
5. K. D. Choquette et al., "Advances in selective wet oxidation of AlGaAs alloys," IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., vol. 3, pp. 916-926, 1997.