

論文97-34D-9-10

# 광소자용 미소렌즈 제작을 위한 GaAs/AlGaAs계 액상식각 및 에피택시

## (LPE Meltback-Etch and Re-epitaxy of GaAs/AlGaAs for Optical Micro-lenses Fabrication)

咸成鎬\*, 權寧世\*\*

(Sung-Ho Hahm and Young-se Kwon)

### 요 약

선택적인 창을 통해 GaAs기판을 액상식각하는 새로운 방식에 대하여 조사하였다. 액상식각에서의 주요한 변수는 불포화정도, 식각시간등이었으며 이들로부터 렌즈를 위한 원통형 및 반구형 식각형태를 얻을수 있었다. 재성장을 통해 GaAs/AlGaAs 이중접합 구조를 형성하여 마이크로렌즈 및 LED를 제작하였다. 이를 통해 액상식각이 LPE를 이용하는 LED 양산공정에 적용할 때 추가의 공정비용없이 광소자의 효율을 개선할 수 있는 유용한 기술임을 입증하였다.

### Abstract

A new etching technique of meltback was investigated for GaAs lensed optical devices with selective windows opening in the LPE(liquid phase epitaxy) system. In the meltback process, the etch depth and the etch shape were controlled by the degree of under-saturation, etch time and other parameters. A GaAs/AlGaAs DH layer was grown on the selectively etched hemispherical well for optical device application such as lensed surface emitting LED. The regrowth process were related with the cooling rate and the well to well spacing. A novel surface emitting LED with hemispherical AlGaAs lens was fabricated using the meltback and regrowth as the key process for AlGaAs lens array. The light emitting efficiency of the LED was upto three times higher than the similar structure LED without lens. The meltback and regrowth technique was applicable to manufacture the optical device in LPE.

### I. 서 론

오늘날 화합물반도체 광소자는 CDP와 DVD를 중심으로 한 정보가전기, LED 등의 디스플레이, 광통

신등에 응용되고 있고, 향후 광전집적회로와 광컴퓨터 등으로 그 응용분야가 더욱 확대될 것이다. 광소자는 빛을 방출하거나 흡수 가지하는 소자로서 박막다이오드(LED), 레이저 다이오드(LD), 광센서, 태양전지 등이며 그 수요는 응용기기의 개발에 부응하여 빠르고, 다양한 소자의 개발을 위한 결정성장과 소자제조 기술의 진보가 계속되고 있다. 최근에는 GaAs와 InP등 일부 가시광 영역과 near IR에 제한되어 있던 광소자의 발광 스펙트럼을 넓히고 고주파, 고전력, 저잡음 등의 장점을 가진 전자 소자와 집적하기 위해 GaN,

\* 正會員, 慶北大學校 센서技術研究所

(School of Electronics and Electrical Engineering, Kyungpook National University)

\* 正會員, 韓國科學技術員 電氣및電子工學科

(Department of Electrical Engineering, KAIST)

接受日字:1997年5月12日, 수정완료일:1997年8月29日

InN 등의 넓은 밴드갭 반도체와 함께 GaSb, InSb 등의 좁은 밴드갭 화합물반도체에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

그러나 LED를 비롯한 발광소자는 개발된지 수십년이 지났으나 손실(loss) 메커니즘이 커서 아직도 그 발광효율이 낮은 형편이다. 손실의 주요인은 발광소자의 재료인 반도체 결정층내에서의 흡수와 Fresnel 손실, 입계각 손실등 크게 세가지로 나눌 수 있다. 이중 입계각 손실은 광소자의 재료와 구조에 따라 정해지는 것으로 GaAs의 경우 photon이 발광 영역으로부터 반도체 표면으로 약  $18^\circ$ 의 입계각을 벗어나게 되면 외부로의 광방출은 억제된다. 따라서 표면방출형 고출력, 고휘도의 LED를 제조하기 위해서는 발광영역 부근에 렌즈를 부착하거나, 재료표면을 화학적 또는 기계적으로 연마하여 반구형 렌즈를 형성시키는데 후자의 경우 45%까지 외부양자효율이 향상되었으나 렌즈를 위한 부대비용이 매우 크다.<sup>[1]</sup>

본 논문에서는 광소자의 효율개선을 위한 마이크로 렌즈를 화합물반도체 액상 결정성장(liquid phase epitaxy) 과정에서의 액상식각 현상을 이용하여 제작할 수 있음을 보였다. 저비용의 원통형, 반구형 렌즈를 제작함에 있어 재현성과 제어성을 높이기 위한 실험적 방법을 조사하였다. 액상 결정성장법에 의한 마이크로 렌즈는 GaAs계 광소자의 제작 과정에서 손쉽게 집적이 가능하며, 사진식각을 통해 렌즈의 크기 등 특징을 조절할 수 있고, 재성장시  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 의 조성을 통해 투과광의 파장을 선택할 수 있는 등 많은 장점을 가지고 있음을 확인하였다.

## II. 액상 식각(Meltback Etching)

화합물반도체 결정 성장에 많이 응용되고 있는 액상 결정 성장은 비교적 높은 온도에서 V족 원소가 과포화된 액체 상태의 III족 금속으로부터 III-V족 화합물을 웨이퍼상에 결정적층하는 방식이다. 이 방식은 기상증착(MOVPE), 분자선증착(MBE)와 함께 화합물반도체 결정 성장에 많이 이용되고 있으며 LED, LD등 광소자의 대부분이 이 방법으로 양산되고 있다. 액상 결정 성장과 반대로 III족 금속이 불포화된 상태에서 III-V족 웨이퍼와 접촉할 때는 오히려 웨이퍼를 식각하게 되는데 이를 액상 식각(meltback etching)이라고 하며 III족의 고온 금속 용액의 불포화에 의해 식각된다는 점에

서 화학적 용액에 의한 식각과는 명확히 구분된다.

GaAs 화합물반도체의 경우 액상 평형(Equilibrium liquidus) 온도  $T_{eq}$ 에서 gallium 용액에 용해되는 arsenic의 농도는 실험적으로

$$C_{As} = 2352.8 \exp(-12404/T_{eq}) \text{ [ cm}^{-3} \text{ ]}$$

으로 주어진다. 이때 불포화의 정도는  $\Delta = T_w - T_{eq}$ 로 정의되며 이때  $T_{eq}$  [K]는 평형상태의 온도,  $T_w$ 는 웨이퍼와 gallium 용액이 접촉(wetting)되는 온도이다.  $\Delta$ 가 양이면 불포화 상태, 음이면 과포화 상태를 의미한다. 불포화의 정도( $\Delta C_{As}$ )는 온도를 일정하게 하였을 때 첨가하는 V족 원소 arsenic의 양에 의해 조절할 수 있고  $\Delta C_{As} = C_{eq} - C_w$ 로 정의된다.  $C_{eq}$ ,  $C_w$ 는 각각  $T_{eq}$ ,  $T_w$ 에서의 arsenic 농도를 의미한다.

따라서 액상 결정 성장 과정에서 다층막을 형성시킬 때 단지 Ga 용액의 포화, 불포화, 과포화 상태를 가변시킴으로서 식각(etch)과 성장(growth)이 모두 가능하게 된다. 이러한 현상을 이용하여 선택적으로 GaAs 웨이퍼를 액상식각한 뒤 LD를 제작하거나, InP계에서도 액상식각을 응용하기 위한 수치적인 분석이 이루어졌다.<sup>[2]</sup>

저자들은 액상식각을 통해 선택 영역만을 식각할 경우 적절한 조건에서 식각면이 원형의 창에서는 반구형이고, Stripe형의 창에서는 원통형으로 형성됨을 발견하여 재성장을 통해 렌즈를 제작할 수 있음을 제안하였고, 이를 응용한 원통형(cylindrical) 발광다이오드를 설계, 제조하여 효율과 근거리 패턴을 개선한 바 있다.<sup>[3]</sup> 본 논문에서는 이러한 가능성으로부터 재연성과 제어성이 우수한 렌즈 형태를 얻어 반구형 LED를 제작하여 광소자 공정에의 응용 가능성을 확인하였다. 그림 1은 용액식각을 이용한 대표적인 두가지 형태의 표면방출형 LED 구조이다.

## III. 액상식각 형태 제어 (Meltback etch shape control)

### 1. 식각 속도

먼저 액상식각 시간에 따른 식각 깊이를 정량적으로 분석하기 위해 GaAs 웨이퍼를 스퍼터링에 의해 고온에서도 안정한  $\text{SiO}_2$  박막을 입히고 10 ~ 200  $\mu\text{m}$  직경의 원형창(window)을 사진식각 방식으로 연 뒤

LPE chamber내에서 온도와 시간, 불포화 조건에서 식각을 함으로서 렌즈로 활용할 수 있는 식각 형태를 찾았다. 이때 열린 창의 지름은 사진식각 과정에서 온도등의 조건에 따라 5%내외의 오차를 가진다.

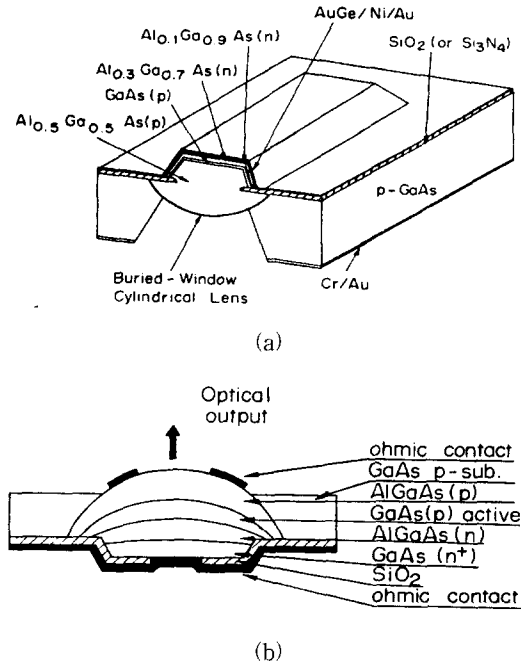


그림 1. 렌즈가 있는 LED구조 (a) 원통형LED (b) 반구형LED  
Fig. 1. Schematic structure of lensed LED. (a) cylindrical (b) hemispherical LED

제어하기가 가장 용이하면서도 중요한 변수인 시간에 따른 식각 깊이를 일정한 지름의 창에 대해 실험하여 식각속도를 측정하였다. 이때 완전한 불포화 gallium의 경우 식각깊이를 제어하기도 어렵거니와 렌즈 형태를 얻기 위한 재현성보다는 불규칙한 면을 형성한다고 알려져 있다.<sup>[4]</sup> 따라서 본 논문에서는 V족의 arsenic 이나 III족의 알루미늄을 사용하여 불포화 정도를 조절하는 것을 시도하였는데 이는 GaAs계 광소자를 위해 식각후 재성장될 렌즈영역이 AlGaAs층이므로 재성장층의 불순물로 작용하지 않고 3원계의 알루미늄 mole 조성비를 달성하는 데도 도움이 될 것으로 판단된다.

식각실험 과정은 gallium 등의 재료를 흑연 보트에 올리고 원형의 창이 형성된 웨이퍼를 흑연 boat 및 slider에 올려 인입한 다음 수소분위기에서 880℃서 균질화 한 뒤 온도를 낮추어 780℃에서 접촉시켜

(super-cooling) 식각하였다. Al/Ga의 무게비가 0, 1.4, 2.8 mg/g인 경우에 대하여 식각속도를 제어할 수 있도록 하였다.

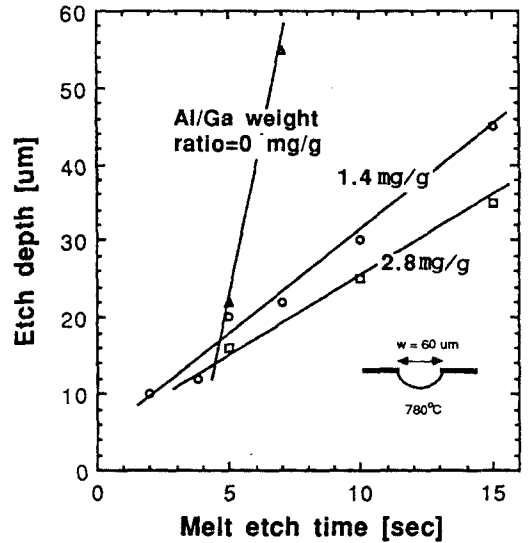


그림 2. Al에 의해 Ga의 불포화정도를 변화시켰을 때 식각시간에 따른 식각깊이  
Fig. 2. Meltback etch depth versus meltback time for different aluminum weight per gallium.

그림 2는 상기조건에서 식각창의 폭이 60 μm일때 시간에 따른 식각깊이를 나타내었다. 이로부터 Al을 첨가함에 따라 불포화 정도가 낮아지고 식각율은 작아져 Al량에 의한 식각속도 제어가 가능함을 알수 있었다. 이때 Al/Ga비가 낮은 것부터 15 μm/sec, 3.2 μm/sec, 2.4 μm/sec으로 나타나다 매우 빠르 식각속도는 LPE장비의 성격상 식각시간을 정확히 제어하는데 어려움이 있으나 성장층을 자동이동하는 시스템을 사용한다면 제어가 용이할 것으로 판단된다. 이때 창의 폭이 70 μm 이상으로 큰 경우는 불포화정도에 따른 식각깊이에 큰 변화가 없음을 확인하였다. 상기 세가지 실험결과와 광소자 응용시 Al의 조성비를 고려하여 Al/Ga무게비를 1.4mg을 중심으로 실험하였다.

2. 식각형태

식각형태는 식각시간과 밀접한 관련을 갖고 있으며, 이상적인 렌즈형태를 얻기 위해서는 반구형의 등방성 식각형태를 제어할수 있어야 한다. 액상식각의 특징은 식각시간이 비교적 짧을 때 중심부에서의 식각은 원형

이러기보다는 평탄한 형태이며, 식각깊이는 창의 폭에 따라 거의 변하지 않는다. 그러나, 시간이 지남에 따라 식각형태는 원형으로 바뀌고 식각깊이도 열려진 창의 폭에 따라 달라진다.

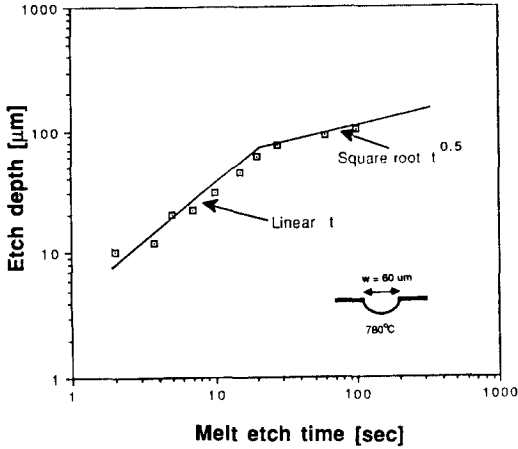


그림 3. 로그그래프로 나타낸 식각깊이와 식각시간의 관계 (Al/Ga비 1.4에 대하여)

Fig. 3. Logarithmic plot of meltback etch depth versus meltback time. (for Al/Ga ratio 1.4 mg/g)

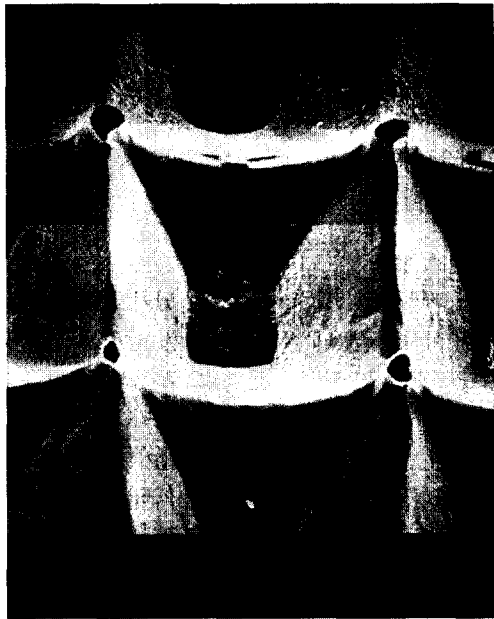


그림 4. 40분동안 액상식각했을 때의 식각형태 (원형 마스크, Al=0g)

Fig. 4. SEM photomicrograph of the 40 minute meltback etched region. (circular mask, no aluminum)

그림 3은 식각시간과 깊이를 로그함수로 나타낸 것인데 이를 통해 20초이상 식각할 경우 그 깊이가 시간에 제곱근에 비례함을 알 수 있다. 이는 식각깊이가 시간에 따라 표면반응제한(Surface kinetics limited) 과정에서 확산제한(Diffusion limited) 과정으로 천이하는 경향이 있음을 확인해주는 것이다.<sup>13)</sup> 불포화정도가 크고, 넓은 창을 갖고 있을 때 식각시간이 길 경우에는 식각형태와 식각속도가 달라 식각의 기구(mechanism)이 다른 것을 시사해 주고 있다. 그림 4는 원형의 식각창으로 40분 동안의 식각한 경우 식각형태가 창의 형태나 크기와 상관없이 {111} 결정면들에 의해 역피라미드 모양과 웨이퍼의 표면과 동일한 (100) 면이 나타났다. 이는 매우 빠른 식각속도를 감안할 때 식각된 GaAs에 의해 불포화상태가 포화상태로 천이되어 나타나는 예외적인 현상으로 포화 이후에는 시간이 지나더라도 더 이상 식각이 일어나지 않고 그 형태에 유지되는 것으로 보인다. 이런 형태의 식각형태도 수광소자에 응용이 가능할 것으로 보인다.

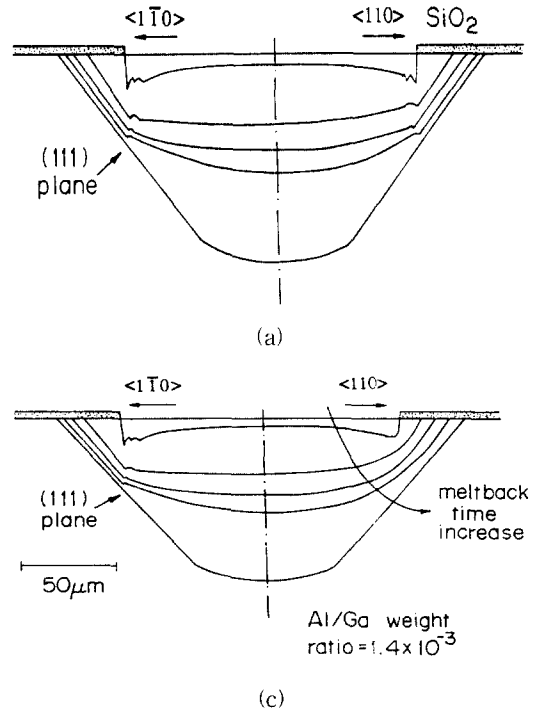


그림 5. 시간에 따른 식각형태 변화 (a) Al이 없을 경우 (b) Al/Ga=1.4 mg/g

Fig. 5. Time evolitional etch shape of meltback. (a) no aluminum (b) Al/Ga=1.4 mg/g

실제 실험에서는 10초내외의 식각시간에서도 {111}

면들이 그림 6의 렌즈 모양처럼 나타나며 시간에 따라 용액식각의 결과를 관찰한 결과 창 의 직경에 따라 차이가 있지만 일반적으로 그림 5와 같은 식각형태를 확인하였다. 이러한 비등방성은  $\text{SiO}_2$  창 의 아래에서 과포화 gallium이 원활히 웨이퍼 위쪽의 gallium으로 As을 확산되지 않기 때문으로 생각할수 있으며 이를 방지하기 위해서는 식각과정에서 불포화도를 계속 유지할수 있도록 온도를 일정한 기울기로 증가시키는 것이 필요할 것으로 예상된다.



그림 6. 성장중 갈륨이 포획된 액상식각후 성장의 단면  
Fig. 6. Typical cross-section of the meltback and regrowth @  $t_m=5\text{sec}$ ,  $t_g=80\text{ min}$ .

#### IV. 재결정 성장 (Regrowth)

광소자에 응용하기 위한 마이크로 렌즈의 제작은 앞에서 액상식각 방법으로서 식각된 영역에 다시 GaAs 또는 AlGaAs계 반도체 결정성장을 실현함으로써 가능하게 된다. 재결정 성장을 통한 원통형 발광 다이오드가 보고된 바 있으나<sup>[3]</sup> 식각후 재성장 과정에 대한 정량적, 정성적 분석을 통해 표면방출형 광소자에 렌즈를 집적한 반구형 발광다이오드를 제작하고자 공정의 재현성이 필요하다. 재성장은 LPE, MBE, VPE 등에 의한 선택적 결정 성장(Selective Epitaxy)이 적용 가능하지만, 식각후 재성장이 한 챔버내에서 가능한 LPE방법에 대하여 실험적검토를 수행하였다.

##### 1. 재성장 과정

평면 웨이퍼인 경우 arsenic의 확산제한 모델이 성장율의 계산에 적용될 수 있지만 특정 지수의 면에서는 선택적인 결정성장의 해석이 간단하지 않다. 선택

적 결정성장 기구에 대한 설명으로서 Herring은 서로 다른 면에 대한 표면 에너지 차를 이론적으로 조사하여 낮은 밀리지수면의 표면 에너지가 낮다는 것을 확인하였다.<sup>[5]</sup> 액상식각후 결정성장면은 표면이 반구형으로 형성되어 있어 거의 모든 밀리지수 면이 드러나게 되고 반구를 채워 결정층이 어느 정도 성장되면 낮은 지수의 안정한 면이 비로소 나타나게 된다. 따라서 재성장 초기에 역반구형 구조를 따라 등방적으로 성장이 이루어지고, 식각된 영역이 모두 채워지면 결정구조를 반영하여 성장이 이루어 지는 것이 바람직하다. 그러나 이때는 지수면이 거의 모든 방향에 걸쳐 위치하므로 arsenic농도가 높은 창(window)의 입구에서 성장면이 형성될 경우, 이 부분이 빨리 성장되어 창의 입구부분이 좁아지게 되므로 식각된 영역이 완벽하게 성장되지 않는 문제가 발생한다. (그림 6) 깊게 식각된 웨이퍼상에 재성장을 시킬 경우 gallium용액이 재성장된 결정층에 싸여 포획되는 이 현상은 국부적으로 arsenic의 농도가 높기 때문에 생기는 것으로 렌즈 형성시 흡수나 산란을 일으켜 광소자에의 응용에 있어서는 치명적인 악영향을 미치게된다. 따라서 이를 제거하기 위해서 arsenic의 과포화 농도를 조절하는 방법과 cooling rate을 변화시켜 gallium 포획을 없애는 방법을 고려할수 있다.

한편 식각 및 재성장을 위하여 열린 창간의 간격이 멀어짐에 따라서 포획되는 gallium량이 줄어드는 것이 실험적으로 관측되었는데 이는 국부적인 과포화를 비교적 완화해 주기 때문으로 보인다.

##### 2. 렌즈 형성

앞서 재성장된 AlGaAs층만을 남기고 웨이퍼를 뒷면부터 식각해 뱀으로써 미소렌즈를 얻을 수 있다. 웨이퍼와 렌즈부분만을 선택적으로 식각하기 위한  $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2$  용액은 조성비에 따라 GaAs 와 Al-GaAs 의 식각율의 차이가 커서 웨이퍼만의 선택적식각이 가능하다. 그림 7에 여러 용액식각의 조건에 의해 최종적으로 나타나는 미소렌즈의 형태를 나타내었다. 그림에서 공통적으로 {111} 면들이 나타나고 있는데 이는 창의 아래쪽, 측면에서 과포화된 상태의 gallium이 원활히 웨이퍼 위쪽의 gallium에 As을 전달하지 못하기 때문에 생기는 것으로 보여진다. 그림 8의 (a)는 식각과정중의 원통형 렌즈의 웨이퍼 단면이며 (b)는 제작된 AlGaAs반구형 렌즈 어레이의 단면

이다. 이러한 마이크로 렌즈는 각각의 직경이 10~200  $\mu\text{m}$  내외에 걸쳐 다양한 크기의 렌즈를 사진식각에 의해 제작가능하다.

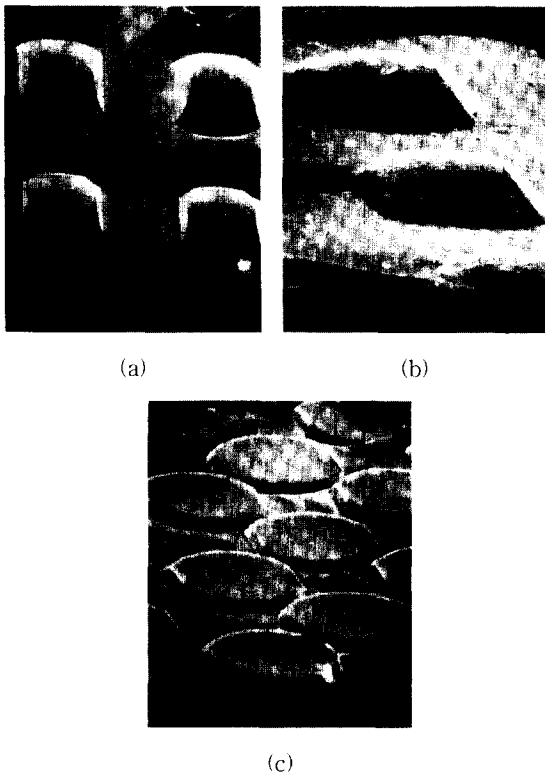


그림 7. 서로 다른 조건에서 제작된 렌즈의 형태  
Fig. 7. Micro-lens schemes for different condition.

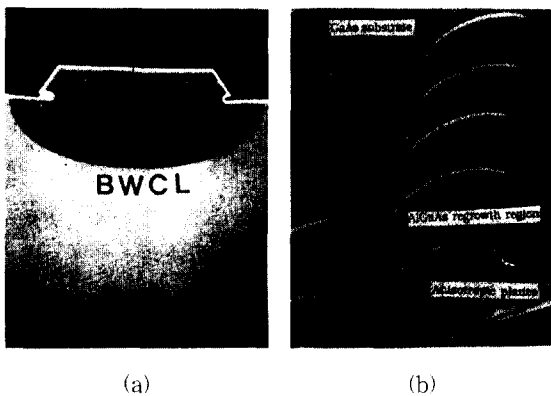


그림 8. 재성장후 단면과(a) 제작이 완료된 미소렌즈 어레이(b)  
Fig. 8. Crosssectional view of the regrown layer. (a) and the fabricated lens array (b)

액상식각에 의한 본 렌즈의 응용 분야로는 반구형의 경우 광집적회로(optical IC)를 위한 초소형 렌즈어레이

이, 원통형의 경우 GaAs 레이저와의 집적을 통한 특성 개선등이며 현재까지 95%이상의 LED양산에 활용되고 있는 액상결정성장 방법에서는 빛을 방출하는 active 영역을 다층 결정성장에 의해 용이하게 형성하므로써 이 렌즈를 LED에 수직으로 집적할 경우 효율 및 근거리 field pattern 개선등이 가능할 것이다. 이를 검증하기 위해 용액식각후 재성장층을 통해 그림 1의 (b)와 같은 LED구조를 그림 9와 같은 공정으로 제작하였다. LED는 용액식각후 재결정과정에서 렌즈면을 Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 내외의 조성비를 갖도록 Double-hetero구조를 채택하였다. 제작된 LED는 그림 9에서 보여주는 바와 같이 동일한 조건에서 제작한 렌즈가 없는 LED와 비교할 때 약 2.5배 내지 3배의 효율개선을 나타내었다.

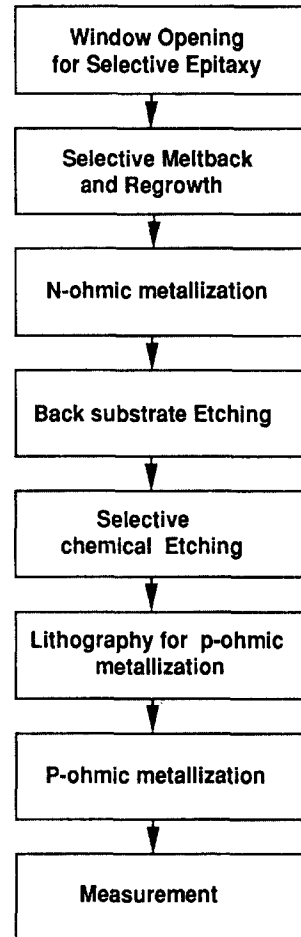


그림 9. 렌즈가 집적된 LED의 제작공정  
Fig. 9. Fabrication process flow of a lensed LED.

이를 통해 용액식각의 양산성이 확보될 경우 렌즈제작을 위한 추가의 공정없이 값싼 LED의 생산이 가능할 것으로 판단된다.

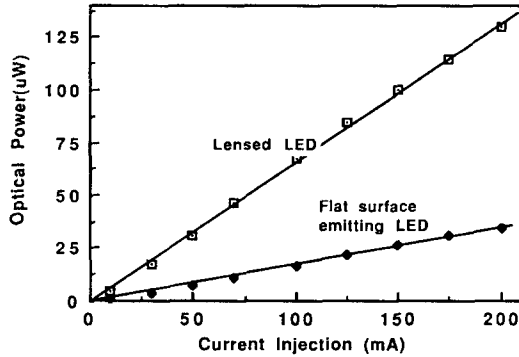


그림 10. 평면형과 렌즈집적형의 표면방출 LED에 대한 광출력 특성곡선

Fig. 10. Light output characteristics of the lensed and flat surface emitting LED's.

## V. 결론

액상 결정성장 과정의 불포화 정도를 변화시켜 액상식각과 재성장을 함으로서 광소자에 응용 가능한 10 ~ 100  $\mu\text{m}$ 내외의 미소 렌즈를 제작하였다. 용액식각 과정에서 Gallium 용액에 aluminum 등을 첨가해 불포화 정도를 조절하고, 식각 시간을 통해 깊이 방향과 측면 방향의 식각비를 조절함으로써 이상적인 반구형 식각 형태를 얻을 수 있었다. 또한 식각시간에 따라 측면과 수직간 식각비는 1에 가까워져 렌즈 구조형성이 용이하였다. 한편 불포화 정도에 대해서는 식각 깊이가 그 제곱근에 근사로 비례하며 이때 창이 크면 불포화 정도에 따른 식각 깊이에의 변화가 적음을 확인하였다. 관찰 결과 표면 에너지의 관점에서 방향에 따라 면의 형성 과정이 시간에 따라 변하면서 gallium 포획 현상이 나타났으며 이러한 비이상적인 효과는 cooling방법을 변화시킴으로서 제어할 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 미소렌즈는 광소자에 집적할 경우 광범위한 응용이 가능할 것이다.

앞으로의 연구방향으로는 첫째 안정된 렌즈제작을 위해 공정의 재현성을 높이기 위한 방법이 개발하기 위해 성장기구에 대한 수치적인 분석이 실험과 비교되어야 한다. 둘째 타 화합물반도체의 결정성장에도 유사하게 응용될수 있는 방법이므로 GaP, InP LPE에서 유사한 실험이 가능하므로 LED이외의 수광소자나 광학용 렌즈에의 응용이 기대된다. 특히 최근 청색발광으로 각광을 받고 있는 GaN와 같이 화학식각이 어려운 화합물반도체에 용액식각의 응용을 검토하고 있다.

## 참고 문헌

- [1] K.Kurata, Y.Ono, K.Ito, M.Mori and H.Sano, "An experimental study on Improvement of performance for hemispherically shaped High power IRED's with  $Ga_{1-x}Al_xAs$  Grown Junctions," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-28, no. 4, p. 374~379, 1981
- [2] K. Kishino, S. Kinoshita, S. Konno and T. Tako, "Selective Meltbacked Substrate Inner-Stripe AlGaAs/GaAs Lasers operated under room temperature CW condition," *Jpn. I. of Appl. Phys.*, v. 22, no. 7, pL473, 1983
- [3] T.K.Yoo, S.H.Hahm and Y.S.Kwon, "Surface Emitting AlGaAs/GaAs DH LED with buried window cylindrical lens," *Jpn.J. of Appl. Phys.*, v. 27, no. 12, pL2357~L2360, 1988
- [4] U.König and K.Gillessen, "Processing of Electronic Materials" Engineering Foundation, NY, p376, 1987
- [5] C.Herring, "Some Theorems on the Free energies of Crystal Surfaces," *Phys. Rev.*, v. 82, no. 1, pp. 87-93, 1951

저 자 소 개



咸 成 鎭(正會員)

1962년 8월 22일생. 1985년 경북대학교 전자공학과(학사). 1987년 한국과학기술원 석사. 1991년 한국과학기술원 박사. 1991년 9월 ~ 1992년 2월 한국과학기술원 위촉연구원. 1992년 3월 ~ 1996년 2월 통상산업부 사무관. 1996년 3월 ~ 1997년 8월 경북대학교 전자전기공학부 조교수(국책). 1997년 8월 ~ 현재 경북대학교 센서기술연구소 전임강사

權 寧 世(正會員) 第 23권 第 6號, 第 25卷 第 3號 參照