

論文96-33A-6-13

홀로그래픽 리소그래피에 의한 미세패턴 형성과 MOCVD에 의한 양자세션 어레이의 제작

(Micropattern generation by holographic lithography and fabrication of quantum wire array by MOCVD)

金泰根*, 趙晟佑*, 林賢植**, 金勇**, 金武性**, 朴廷浩*, 閔碩基**

(Tae-Geun Kim, Sung Woo Cho, Hyun Sik Im, Moo-Sung Kim, Jung-Ho Park, and Suk-Ki Min)

요 약

홀로그래픽 리소그래피와 습식에칭을 이용하여 GaAs 기판위에 주기적인 격자패턴을 형성하였다. GaAs 기판위에 약 $0.15\mu\text{m}$ 두께의 감광막을 도포하고 샘플 홀더에 장착한 후 레이저의 도즈량과 노광 시간을 변화시키면서 홀로그래피 간섭 패턴을 형성하였다. 이렇게 형성된 간섭패턴은 4:1(DI-water : developer)로 희석된 현상용액에서 40초간 현상되었고, scanning electron microscope(SEM) 및 atomic force microscope(AFM)로 패턴 형성을 확인하였다. 다음에 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{:H}_2\text{O}_2\text{:H}_2\text{O}(1\text{:}8\text{:}40)$ 의 에칭용액을 이용하여 기판위에 균일한 V-groove 어레이를 형성한 후 MOCVD를 이용하여 GaAs/ $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}(50\text{\AA}/300\text{\AA})$ 구조의 양자우물층을 성장하므로써 V-groove 양자세션(QWRs)이 형성되도록 하였다. 21K의 측정온도에서 6meV의 반치폭을 갖는 날카로운 PL 피크를 얻고, 그것의 강한 온도의존성을 관찰하므로써 양질의 양자세션이 형성되었음을 확인하였다.

Abstract

The use of holographic interference lithography and removal techniques to corrugate GaAs substrate have been studied. The periodic photoresist structure, which serves as a protective mask during etching, is holographically prepared. Subsequently periodic V-grooved pattern is formed on the GaAs substrate by conventional a $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$ wet etching. The linewidth of a GaAs pattern is about $0.4\mu\text{m}$ and the depth is $0.5\mu\text{m}$. A quantum wires(QWRs) array is well formed on the V-grooved substrate by MOCVD(metalorganic chemical vapor deposition) growth of GaAs/ $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}(50\text{\AA}/300\text{\AA})$ quantum wells. The formation of QWR array is confirmed by the temperature dependent photoluminescence(PL) measurement. The intensive PL peak with a FWHM of 6meV at 21K shows the high quality of the QWR array

* 正會員, 高麗大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics Engineering, Korea Univ., Seoul 136-701, Korea)

** 正會員, 韓國科學技術研究員 半導體材料센터

(Semiconductor Materials Research Center, Korea Institute of Science and Technology)

接受日字: 1995年6月2日, 수정완료일: 1996年5月3日

I. 서론

집적회로의 성능과 속도를 향상시키기 위해서는 높은 집적도를 갖는 반도체 소자의 구현이 요구된다. 이러한 요구로 인하여 낮은 차원의 미세 구조 형성과 물성에 관한 연구가 매우 활발하게 진행되어왔다. 그러나 이와 같은 미세 구조는 기존의 광 리소그래피로는 구현하기 어려우며, 따라서 전자선(electron beam) 또는

홀로그래픽 리소그래피(holographic lithography) 기술 등이 요구된다.

전자선 리소그래피는 submicron 구조를 구현하기 위한 미세 가공 기술 중의 하나로 높은 해상도($1\mu\text{m}$ 미만)를 갖는 장점을 갖지만, 원하는 패턴을 각각 정의해 주어야 하므로 노광 시간이 길어지는 단점을 갖는다. 한편 홀로그래픽 리소그래피는 코히어런트(coherent)한 광의 간섭성을 이용한 기술로, 마스크가 필요없고 노광시간이 짧으며(15초 미만) 등방성으로 대면적에 동시에 미세 패턴을 형성할 수 있다는 점에서 매우 유리하다. 하지만 홀로그래픽 리소그래피로는 전자선 리소그래피와는 달리 선 하나하나를 선택적으로 정의할 수 없기 때문에 high speed를 요구하는 전자소자를 제작할 때는 사용이 곤란하며 광소자, 광집적회로 및 미세패턴을 기본으로한 양자소자 제작등에 제한적으로 사용된다는 단점을 갖는다. 그러나 전반적인 관점에서 홀로그래픽 리소그래피를 이용한 미세 가공 기술은 광자 및 양자공학 분야에서의 그 응용성이 매우 크기 때문에 그 기반 기술을 확보하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 Ar-레이저를 광원으로한 홀로그래픽 리소그래피 시스템을 직접 제작하고 이것을 이용하여 약 $0.2\mu\text{m}$ 의 패턴 간격을 갖는 격자 구조를 형성할 수 있는 미세 가공 기술을 확보하였다.

한편 홀로그래픽 리소그래피를 이용한 소자로써는 conventional 하게는 광 필터(optical filter)^[11], DFB(distributed feedback) 레이저 또는 DBR(distributed bragg reflection)레이저의 광도파로(waveguide)층^[12] 등이 있으며, 본 연구에서 현재 관심을 가지고 연구하고자 하는 것은 그 동안 MOCVD 등의 에피 성장 장비를 이용하여 축적하여온 overgrowth 기술과 습식 또는 건식 에칭등의 미세 가공 기술을 바탕으로 양질의 양자세션(quantum wires) 및 양자점(quantum dots) 구조를 형성하고^[13], 그것을 이용하여 양질의 양자세션 또는 양자점 레이저 및 레이저 어레이의 제작^[14] 또는 양자효과(quantum size effect)를 이용하여 기존의 소자와는 전혀 다른 새로운 소자로의 응용등에 있다.

본 논문의 내용은 다음과 같다. 먼저 Ar 레이저를 광원으로 하는 홀로그래픽 리소그래피 시스템을 제작하였다. SEM(scanning electron microscope) 과 AFM(atomic force microscope) 등을 이용하여 최적의 리소그래피 조건을 얻고, GaAs 기판위로의 패턴

전이를 위한 에칭 기술(습식)을 확보하였다. H_2SO_4 계열의 습식에칭 용액을 이용하여 GaAs 기판에 V-groove 모양의 미세패턴을 형성하고 형성된 패턴위에 MOCVD를 이용하여 GaAs(50\AA)/AlGaAs(300\AA)구조의 양자우물층을 성장하므로써 양질의 양자세션을 제작하였다.^[15,6] 또한 제작된 양자세션의 특성을 평가하기 위하여 PL 측정을 통하여 PL 피크의 반치폭(FWHM)과 온도의존성(temperature dependence)을 관찰하였다.

II. 홀로그래픽 리소그래피 시스템의 제작

홀로그래픽 리소그래피는 코히어런트(coherent)한 성질을 갖는 두 개의 동일한(identical) 광 간의 가간섭성을 이용한 것으로 시스템 제작시 몇 가지 사항들을 주의 해야한다. 그 중 몇 가지만 소개하면 다음과 같다. 첫째로 충분한 가간섭 거리(coherent length, L_{coh})를 확보 하는 것이 매우 중요하다.^[7] 그런데 가간섭 거리는, $L_{\text{coh}} = c\tau_{\text{coh}} = c/2\pi\Delta\nu$ (L_{coh} : coherent length, τ_{coh} : coherent time, $\Delta\nu$: spectral width, c : 3×10^8 m/sec) 의 식으로 표현되므로 충분한 가간섭 거리를 얻기 위해서는 단일 모드(single mode)로 동작하는 레이저 광원의 사용이 매우 중요하다. 둘째로 정확한 간섭 패턴을 얻기 위해서는 사람의 숨소리는 물론 노광시 공기의 흐름등에 의한 진동 까지도 막아 주는 것이 좋다. 본 실험장치에서는 이러한 점을 고려하여 458nm의 파장을 갖고 단일 모드로 동작하는 Ar-레이저를 광원으로 이용하고, 진동을 최소화하기 위하여 시스템 전체를 양질의 제진대(vibration isolator)위에 설치하였다. 그러나 단일 모드 광원과 진동의 문제를 제거하였다 하더라도 시스템 정렬(align)시 각 component 간의, 특히 레이저빔이 편향을 통과할때 빔의 제로 오더(zero order)만 통과하도록 정렬되지 않을 경우, 현상시 감광막이 GaAs 기판의 바닥까지 제거되지 않는다. 그럼 1은 레이저 빔이 완전히 collimation 된 경우와 그렇지 못한 경우의 감광막의 패턴을 비교한 것이다. 그림 1(a)는 collimation 된 경우이고 그림 1(b)는 collimation이 되지 않은 경우이다. 그림 (b)의 경우 (a) 조건에 비하여 도즈량(70mW)과 노광시간(25초) 그리고 현상시간을 세배이상(180초 이상) 해 주었음에도 불구하고 노광된 부분의 감광막이 바닥까지 제거되지 못했음을 알

수 있다. 반면에 (a)의 경우는 도즈량 30mW, 노광시간 7초 그리고 현상시간 40초에서 노광된 부분의 감광막이 GaAs 기판 위까지 완전히 제거되었다.

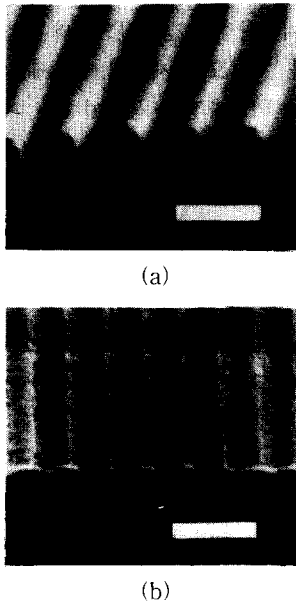


그림 1. 광원이 (a) collimated 된 경우와 (b) collimated 되지 않은 경우의 SEM 사진. Marker 는 1 μ m

Fig. 1. Photoresist pattern when laser beam is (a) collimated and (b) non-collimated. Marker represents 1 μ m.

1. SINGLE MODE SOURCE
2. ANTI-VIBRATION
3. COLLIMATION

$$a = \frac{0.458 \mu\text{m}}{2n\sin\theta}$$

a: Periodicity
 θ : Incident angle

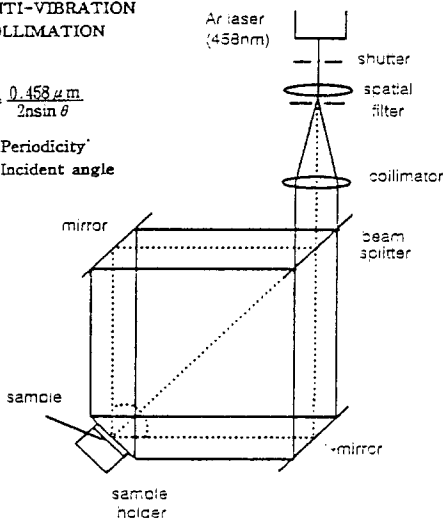


그림 2. 제작된 holographic lithography 시스템의 개략도

Fig. 2. Schematic diagram of the home-made holographic lithography system.

그림 2는 제작된 시스템의 개략도이다. 먼저 공기중의 먼지등과의 산란으로 인하여 오염된 광을 차단하여 양질의 광을 얻고 넓은 영역의 코히어런트한 광을 얻기 위해서 광원 다음단에 배율이 20배인 대물렌즈와 구경 25 μ m의 핀홀(pinhole)로 구성된 beam expander를 연결하였다. 계속해서 공간적으로 코히어런트한 광을 얻기 위해서 다음단에 collimator를 설치하였고 광분리기를 이용하여 동일한 위상을 갖는 두 개의 광을 만들었다. 다음 분리된 두 개의 광을 평면경을 이용하여 시료의 표면의 한 점에 모이도록 평면경의 각도를 조정하였다. 끝으로 홀로그래피 패턴의 방향을 조절할 수 있도록 샘플 홀더는 360 $^\circ$ 회전가능한 rotary 샘플 홀더를 제작하였고 진동에 의한 영향을 최소화하기 위하여 샘플 홀더는 sorption pump에 연결하였다.^[8]

III. 홀로그래픽 리소그래피

1. 시료준비

TCE-아세톤-메탄올-DI water 순으로 세척된 GaAs 기판위에 약 0.15 μ m 두께의 감광막을 도포하였다. GaAs 기판과의 접착력을 향상시키기 위하여 감광막 도포전에 HMDS (Hexamethyldisilazane) 처리를 하였다. 이때 도포된 감광막이 두꺼울 경우 샘플로 입사된 레이저 빔이 GaAs 기판에서 반사되어 정재파(standing wave)를 형성하기때문에 현상시 undercut 이 발생하는데 이것을 방지하기 위해서는 감광막의 두께를 $\lambda/4$ 의 홀수배 가 되도록 하여주고 가능한 얇게 하였다. 본 실험에서는 이러한 점들을 고려하여 50% 농도로 희석된 감광막(photoresist)을 사용하였고 약 6000 rpm의 회전속도로 30초간 행하였다. 사용된 감광막은 SHIPLEY 사의 S1400-17로 노광범위는 350 - 460nm 정도이다. 감광막의 성분 중 용매(solvent) 성분을 제거하기 위하여 85 $^\circ$ C에서 약 20분간 소프트 베이킹(soft baking)을 하였다. 소프트 베이킹이 끝난 시료들은 감광막의 성질변화를 막기 위하여 시료를 oven내에서 충분히 식힌 후 샘플 홀더에 고정하였다.

2. 노광 및 현상

약 0.15 μ m 두께의 양성 감광막(positive photoresist)이 도포된 GaAs 기판은 rotary 샘플 홀더에 장착되고 레이저의 도즈량(dose)과 노광시간을 변화시키면서 홀로그래피 간섭패턴을 형성하였다. 그림

3(a) 와 (b)는 각각 θ 가 15도와 35도 일때의 photoresist 격자 패턴의 AFM(atomic force microscope) 사진이다.^{19,101} 이때의 리소그래피 조건은 도즈량30mW, 노광시간 7초 그리고 4:1(물:현상액)로 희석된 현상액에서 현상시간 40초였다.

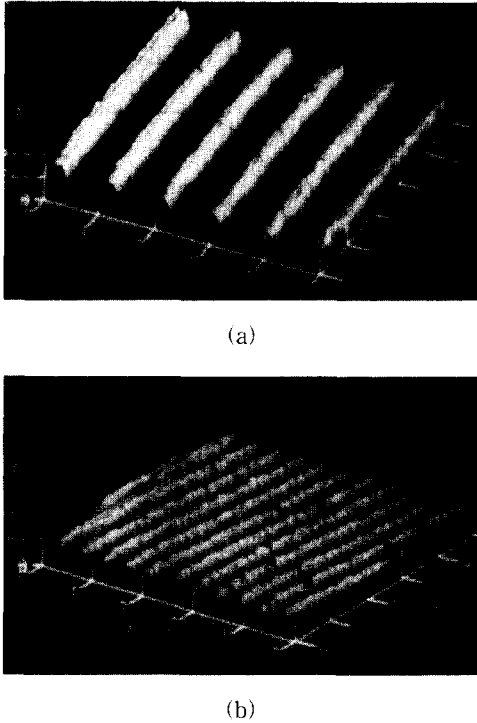


그림 3. 현상된 감광막 패턴의 AFM 사진. 패턴 간격이 각각 (a) 0.5 μ m, (b) 0.23 μ m 일때의 격자구조

Fig. 3. AFM photographs of developed photoresist pattern. (a) and (b) represent stripe structures with a linewidth of 0.5 μ m and 0.23 μ m respectively.

IV. 습식 에칭에 의한 V-groove 형성 및 MOCVD에 의한 양자세선(Quantum Wires) 제작

GaAs 기판위로의 미세패턴 전이를 위하여 습식에칭을 하였다. H₂SO₄: H₂O₂: H₂O(1:8:40) 에칭용액을 이용하였고 균일한 식각을 위하여 magnetic bar를 이용하여 stirring 해주었다.그리고 에칭속도와 에칭단면의 모양을 고려하여 0℃와 20℃에서 각각 에칭조건을 얻었다. 그림 4(a)는 0℃에서 35초간 에칭하였을때의 SEM 단면사진이다. 노광시 간섭무늬의 방향을 <01 $\bar{1}$ >

로 정의하였기 때문에 결정축 효과(crystallographic effect)에 의하여 V-groove 모양의 패턴이 얻어졌다.^[11]

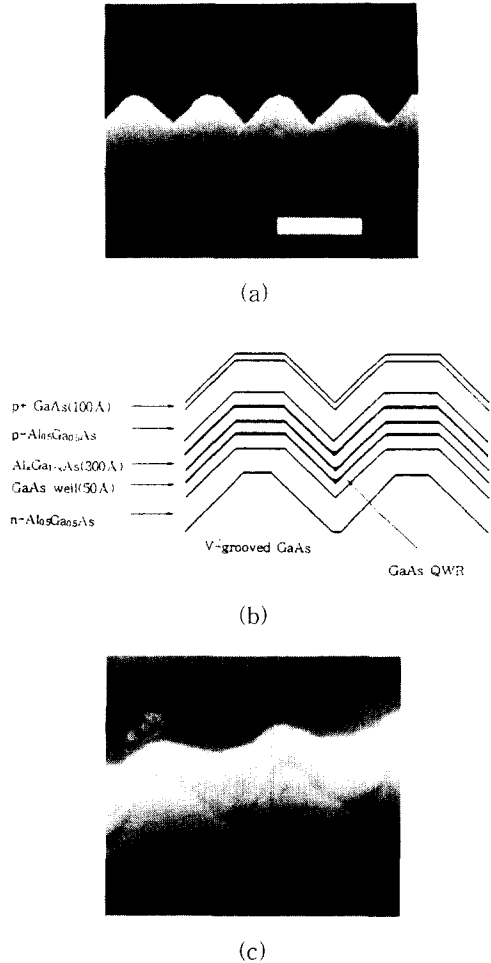


그림 4. (a) 0℃에서 35초간 에칭된 GaAs 단면 SEM 사진 (b) 그림 4(a) 위에 제작된 양자세선의 모식도 (c) 제작된 양자세선의 SEM 사진, marker는 1 μ m임

Fig. 4. The cross-section of an etched GaAs substrate and QWR array fabricated by MOCVD. (a) SEM photograph of the etched facet, (b) schematic diagram and (c)SEM photograph of QWR array. Marker represents 1 μ m.

이때 얻어진 패턴간격은 약 0.4 μ m이고 깊이는 0.5 μ m 였다. 이상에서 준비된 V grooved GaAs 기판은 TCE-아세톤-메탄올-DI water 순으로 세척되고 MOCVD 성장관 내에 장착되었다. 성장온도를 약 750℃로 하고 다음의 조건으로 양자세선 구조를 제작 하

었다. V-grooved GaAs 기판위에 구속층(confining layer)으로 약 1500Å 두께의 $Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ 층을 성장하고 그 위에 50Å/300Å 두께의 GaAs/AlGaAs 층을 세층 올려 주었다. 다음 1500Å 두께의 $Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ 층을 기르고 100Å 두께의 cap layer를 성장하였다. 자세한 MOCVD 성장 방법은 이미 발표된 바 있다.¹¹²¹ 성장된 양자세션 구조는 SEM 사진을 통해 개략적으로 확인하였다. 그림 4(b)는 설계된 양자세션 구조의 모식도이고 그림 4(c)는 제작된 양자세션의 SEM 단면 사진이다. V groove의 홈 부분에 초승달 모양의 양자세션이 형성되어 있음을 알 수 있다.

V. Photoluminescence(PL) 측정

제작된 양자세션의 특성을 평가하기 위하여 PL(photoluminescence)의 측정을 하였다. 그림 5는 저온(21K)에서 측정된 양자우물(QWs) 및 양자세션(QWRs)의 PL 피크의 비교와 측정온도에 따른 PL 강도(intensity)의 변화를 나타낸다.

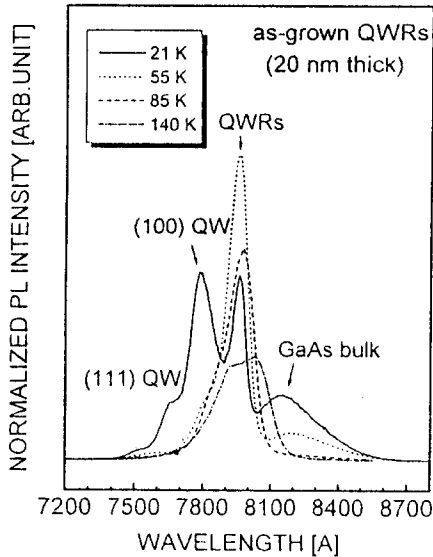


그림 5. 양자세션 및 측면양자우물에서 여기된 캐리어들에 의한 PL 강도의 온도 의존성
Fig. 5. PL spectra of QW and QWR array at various temperatures.

21K에서 측정된 양자세션의 PL 피크는 측면 양자우물에서 여기된 PL 피크에 비해 날카롭고 비교적 강한 피크를 보이는데, 이것은 V-groove 위에 형성된 양자세

션 어레이가 상당히 균일하고 잘 confine되어 있음을 의미한다. 한편 측정온도가 증가함에 따라 양자우물의 PL 강도는 선형적으로 감소하는데 비하여 양자세션의 PL 피크는 일정온도(55K)까지 강도가 증가한 후 감소하는 현상을 보인다.

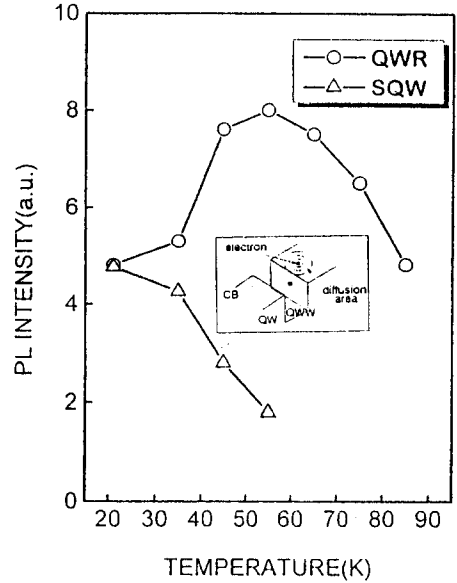


그림 6. 온도변화에 따른 QWs 과 QWRs의 PL intensity 비교. 삽입된 그림은 그림 5와 6의 물리적인 현상을 설명하고 있음

Fig. 6. Temperature dependence of QWR array and side QW PL peak intensities measured from the PL spectra. The inset explains the phenomena above.

그림 6은 그림 5의 결과를 도시한 것이다. 이러한 현상이 발생하는 물리적인 배경은 다음과 같다. 그림 4(b)에서 볼 수 있듯이 V-grooved 기판위에 형성된 양자세션은 측면 양자우물층(side quantum well)보다 다소 두껍게 형성되며 따라서 양자세션이 양자우물층보다 낮은 에너지 준위를 갖게된다. 한편 샘플의 온도가 증가하면 측면 양자우물층에서 여기된 캐리어들이 재결합할때까지의 움직일 수 있는 영역(diffusion area)이 증가하게 된다. 따라서 그림 6의 삽입도에서 알 수 있듯이 양자우물에서 여기된 캐리어들이 재결합하기 전에 양자세션의 에너지준위로 떨어지는 현상이 발생한다. 이것은 양자세션으로 캐리어들을 공급하는 효과(carrier injection 효과)을 야기시켜 PL 피크를 증가시킨다. 그러나 일정온도 이상에서는 양자세션 내의 열

적산란효과(thermal scattering effect)가 측면양자우물로 부터의 캐리어 주입효과보다 커져 비복사 재결합 중심이 증가하여 다시 PL 피크를 감소시킨다. 이러한 PL 측정 결과들로 부터 양질의 양자세션이 성공적으로 제작되었음을 확인할 수 있었다.

VI. 결 론

코히어런트한 광의 간섭성을 이용하여 미세패턴을 형성할 수 있는 Ar 레이저 홀로그래픽 리소그래피 시스템을 제작하였다. 0.15 μ m 두께의 양성 감광막을 GaAs기판 위에 도포하고 레이저의 도즈량과 노광 시간을 변화시키면서 홀로그래피 패턴을 형성하였다. 이렇게 형성된 간섭패턴은 4:1(DI-water : developer)로 희석된 현상용액에서 30 ~ 60초간 현상하였다. 습식에칭을 이용하여 실제 GaAs 기판에 패턴을 전이하였다. 에칭용액으로 H₂SO₄:H₂O₂:H₂O (1:8:40)를 이용하였다. 그 결과 균일하게 V-groove가 새겨진 GaAs 기판을 얻었다. 이때의 패턴간격은 약 0.5 μ m 정도였고 그 위에 MOCVD 방법으로 GaAs/Al_{0.5}Ga_{0.5}As(50Å/300Å) 구조의 양자우물을 세 층 성장하여 양자세션 구조를 형성하였다. 끝으로 PL 측정을 통해 양자세션이 효과적으로 제작되었음을 확인하였다.

* 본 연구는 K2000 프로그램 (2V00031 및 2V00091)의 연구비 지원으로 이루어졌으며, SEM 측정을 도와주신 김 재경 선생님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] A. Yariv and M. Nakamura, IEEE J.

Quantum Electron. **QE-13**, 233 (1977).
 [2] M. Nakamura, K. Aiki, J. Umeda, A. Yariv, H.W. Yen, and T. Morikawa, Appl. Phys. Lett. **25**, 487 (1974).
 [3] Y. Arakawa and A. Yariv IEEE J. Quantum Electrom. **QE-22**, 1887 (1986).
 [4] S. Simhony, E. Kapon, E. Colas, D.M. Hwang, N.G. Stoffel and P. Worland, Appl. Lett. **59**, 2225 (1991).
 [5] E. Kapon, K. Kash, E.M. Clausen, Jr., D.M. Hwang, and E. Colas, Appl. Phys. Lett. **60**, 477 (1992).
 [6] W. Hornischer, P. Grambow, T. Demel, E. Bauser, D. Heitmann and K. von Klitzing, Appl. Phys. Lett. **60**, 2998 (1992).
 [7] Peter W. Milonni, and Joseph H. Eberly, "LASERS" (JOHN WIELY & SONS, 1991), p.540.
 [8] Willie W. NG, Chi-Shain Hong, and A. Yariv, IEEE Transactions on Electron Devices, vol., **ED-25**, No. 10, 1193 (1988).
 [9] John A. Lebens, Charles S. Tsai, and Kerry J. Wahala, Appl. Phys. Lett., **56(26)**, 2642 (1990).
 [10] Takashi Fukui, Seigo Ando and Hisao Saito, Extended Abstracts of 22nd (International) Conference on Solid State Devices and Materials, Sendai, Japan, 1990, p.753.
 [11] Won-Tien Tsang and Shyh Wang, Appl. Phys. Lett. **28**, 44 (1976).
 [12] M. S. Lee, Y. Kim, M. S. Kim, S. I. Kim, S. K. Min, and S. Nahm, Appl. Phys. Lett. **63**, 3053 (1994).

저 자 소 개

金 泰 根(正會員) 第 31卷 A編 第 9號 參照
 현재 고려대학교 전자공학과
 林 賢 植(正會員) 현재 한국과학기술연구원 반도체 재료센터
 金 武 性(正會員) 第 31卷 A編 第 9號 參照
 현재 한국과학기술연구원 반도체 재료센터
 閔 碩 基(正會員) 第 31卷 A編 第 9號 參照
 현재 고려대학교 전자공학과

趙 晟 佑(正會員) 현재 고려대학교 전자공학과
 金 勇(正會員) 현재 한국과학기술연구원 반도체 재료센터
 朴 廷 浩(正會員) 第 31卷 A編 第 9號 參照
 현재 고려대학교 전자공학과