

MOCVD에 의한 GaAs/AlGaAs 초격자 및 HEMT 구조의 성장

(Growth of GaAs/AlGaAs Superlattice and HEMT Structures by MOCVD)

金武性*, 金湧*, 嚴慶淑*, 金成一*, 閔碩基*

(Moo Sung Kim, Yong Kim, Kyung Sook Eom, Sung Il Kim, and Suk Ki Min)

要約

MOCVD에 의하여 초격자 및 HEMT 구조를 성장하고 그 특성을 보고한다. GaAs/AlGaAs의 경우, 주기성(periodicity), 계면 급준성, Al 조성 균일성을 경사연마 및 double crystal x-ray 측정에 의하여 확인하였고, 고립 양자우물의 양자효과(quantum size effect)에 의한 PL(photoluminescence) 스펙트럼을 관측하였다. 이 PL FWHM(full width at half maximum)과 우물 두께의 관계로부터 계면 급준성이 1 monolayer fluctuation 정도인 초격자 구조가 성장되었음을 확인하였다.

한편, HEMT 구조의 경우에 헤테로 계면에 형성된 2차원 전자층의 존재를 C-V profile, SdH(shubnikov-de Haas)진동, 저온 Hall 측정을 통하여 확인하였다. 저온 Hall 측정에서 15K에서 sheet carrier density $5.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, mobility $69,000 \text{ cm}^2/\text{v. sec}$, 77K에서 sheet carrier density $6.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, mobility $41,200 \text{ cm}^2/\text{v. sec}$ 이었다. 또한 quantum Hall effect 측정으로부터 잘 형성된 SdH 진동 및 quantized Hall plateau를 관측하였다.

Abstract

We developed the technologies of superlattice and HEMT structures grown by MOCVD, and their characterization. In the case of GaAs/AlGaAs superlattice, the periodicity, interface abruptness and Al compositional uniformity were confirmed through the shallow angle lapping technique and double crystal x-ray measurement. Photoluminescence spectra due to quantum size effect of isolated quantum wells were also observed. The heterojunction abruptness was estimated to be within 1 monolayer fluctuation by the analysis of the relation between PL FWHM (Full Width at Half Maximum) and well width. HEMT structure was successfully grown by MOCVD. The 2 dimensional electron gas formation at heterointerface in HEMT structure were evidenced through the C-V profile, SdH (Shubnikov-de Haas) oscillation and low temperature Hall measurement. Low field mobility were as high as $69,000 \text{ cm}^2/\text{v. sec}$ for a sheet carrier density of $5.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ at 15 K, and $41,200 \text{ cm}^2/\text{v. sec}$ for a sheet carrier density of $6.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ at 77K. In addition, well defined SdH oscillation and quantized Hall plateaus were observed.

*正會員, 韓國科學技術研究院
(Korea Institute of Science and Technology)
接受日字: 1989年 7月 10日

(※ 본 연구사업은 과학기술처 연구비 지원으로 이루어졌음.)

I. 서 론

2000년대의 정보화 사회를 구현하기 위해 고도의 정보처리 기술이 필요하게 되었고 따라서 초고속 대용량 기억장치 및 논리회로 제작의 필요성이 높아지게 되었다. HEMT (high electron mobility transistor) 는 위의 목적에 합당한 기본 소자로서 초고주파용 저잡음 증폭기 등에서의 응용도 기대되고 있다. 1988년 AT&T Bell Lab. 연구진들에 의해 처음 HEMT의 가능성이 제시된 이래^[1] HEMT 소자는 MBE (molecular beam epitaxy) 성장기술의 발전에 힘입어 1980년대 이후 크게 발전하였다. 그러나 MBE는 장비가 매우 고가이고 초고진공하에서 에피성장을 해야하는 등 유지비가 매우 높으며 대량생산에 불리한 점이 있다. 한편 MOCVD (metalorganic chemical vapor deposition)는 대량생산이 가능하고, 저진공 혹은 대기압에서 에피 성장을 할 수 있고, 유지비도 싼 점등 몇 가지 큰장점이 있다.^[2] MOCVD에 의한 HEMT 성장은 1981년 Rockwell의 Coleman 등에 의해 처음 이루어졌으나^[3] 77K에서 전자 이동도가 약 12,000cm²/v. sec로서 크게 주목받지 못하였다. 그후 1986년도 Sony의 Mori 등이 5K에서 약 400,000cm²/v. sec 77K에서 약 150,000cm²/v. sec의 전하이동도를 갖는 HEMT 구조 성장에 성공하였고^[4] 같은 연구진에 의해 최대 transconductance 280 mS/mm, 12 GHz에서 10.8dB 이득과 1.13dB 잡음 특성을 갖는 0.65μm 게이트의 HEMT 소자가 개발되어^[5] MBE로 성장한 HEMT에 필적할 만한 동작 특성을 가지게 되어 MOCVD의 실용 가능성을 확인시켜 주었다. MOCVD의 가장 큰 장점인 대량생산성에 비추어 볼때 MOCVD에 의하여 제작된 HEMT의 상업적 잠재력은 크다 할 수 있다. 이러한 MOCVD 기술은 최근 수년간 급격하게 성장되어 온 것으로 아직 성숙 단계에 이르지 못하고 있다. 국내에서도 화합물 반도체 기술의 중요성이 인식되면서 대학 및 연구소 뿐 아니라 기업체에서도 이 분야에 참여할 것으로 예상된다. 그러나 전반적 기술 축적이나 개발은 크게 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 MOCVD에 의한 신기능 소자제작 기술을 개발하는데 그 목적을 두었다. 본 연구에서는 HEMT 소자의 제조 및 초격자 응용구조의 신기능 소자 개발에 앞서, MOCVD에 의한 초격자 성장 및 기본 HEMT 구조의 에피층 성장과 그들의 특성에 관하여 연구하였다.

II. MOCVD에 의한 초격자 성장

1. MOCVD 성장 장치 및 초격자 성장 방법

본 실험에 사용한 성장장치는 대기압 MOCVD 장

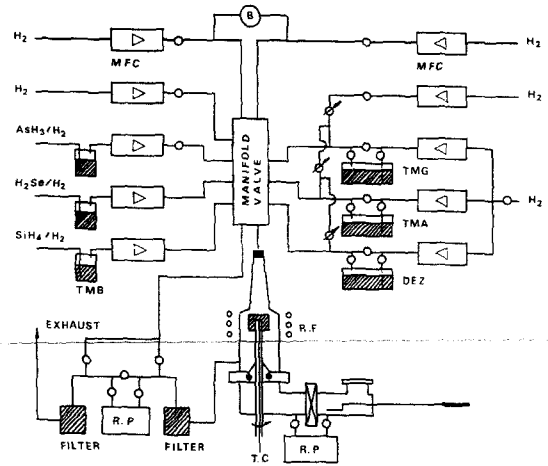


그림 1. MOCVD 장치의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of MOCVD system.

치로서 그림1은 그 개략도이다. Gallium 원료로는 TMG (trimethylgallium ; (CH₃)₃Ga), Aluminum 원료로는 TMA (trimethylaluminum ; (CH₃)₃Al) 를 사용하였다. 이들 원료는 bubbler에 담겨 항온조에 의하여 TMG는 -15°C, TMA는 20°C가 유지되도록 하였다. 이들 원료는 Palladium alloy diffuser에 의하여 정제되고 MFC (mass flow controller)에 의하여 유량이 조절된 수소에 의하여 bubbling 되어 반응관까지 이송된다. 한편 Arsenic 원료인 AsH₃는 일단 Ga-In-Al TMB (ternary melt bubbler)를 통과하여 H₂O와 O₂가 제거된 다음^[6] MFC에 의하여 유량이 조절되어 반응관까지 이송된다. 반응관에 도착한 III족 (Ga, Al), V족 (As) 원료는 5l/min의 큰 유량으로 흐르는 main 수소에 실려 빠른 속도 (~10 cm/sec. 이상)로 반응관을 통과한다. 반응기체들은 RF generator에 의하여 유도 가열된 susceptor 주위에서 열분해 하여 GaAs 기판위에 에피층으로 성장된다. 이때 성장온도는 750°C였으며 모든 성장층은 doping을 하지 않았다. 고품질 초격자를 성장하기 위해서는 초격자 층에 참여하는 GaAs, AlGaAs, AlAs 층이 고품질이어야 함은 물론이고 각 층사이의 헤테로 경계면은 가능한한 급준하여야 한다. 또한 성장층 두께가 아주 균일 하여야 하며 GaAs/AlGaAs 초격자의 경우 각 AlGaAs층의 Al 조성은 완전히 같아야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위해 다음과 같은 성장조건을 고려하였다.

가. 반응관으로 유입되는 gas의 흐름이 와류가 되지 않고 층상류 (laminarflow)가 되게 하였다. 이 와류 현상은 각 층의 두께 불균일, 특히 AlGaAs 층 성장

시 조성 불균일 원인이 될 수 있으며 헤테로 경계면을 완만하게 만드는 요인이 된다.

이 현상을 막기 위해 RUN/VENT MODE를 채택하였고^[7] 이때 RUN과 VENT 사이의 압력차이를 differential pressure gauge(그림 1에서 B라고 표시한 것)로 감시하여 압력차가 항상 0.1 torr 이하가 되게 하였다. 또한 적절한 반응관 geometry를 채택하여 geometry로 부터 발생할 수 있는 와류를 최대한 억제하였다.^[8]

나. 반응관을 통과하는 gas의 유속을 역류 및 와류현상이 일어나지 않는 범위에서 최대한 빠르게 하였다. 본 실험에서의 유속은 약 15 cm/sec.로서 원료 gas line을 단았을 때 반응관 내부의 잔여원료 gas에 의하여 성장되는 두께는 반응관의 입구부터 susceptor 까지 거리가 15cm 이하이고 본 실험의 성장속도가 통상 3 Å/sec. 정도이므로 3 Å 이하이다.

다. Main 수소 line과 원료 gas를 제어하는 valve 사이의 dead space를 최소화 하기 위해 manifold block valve system을 채택하였다. 이 dead space에 남아있는 잔류 gas가 헤테로 접합면을 완만하게 하는 가장 큰 요인으로 알려져 있다.^[9]

라. Valve on/off를 microprocessor에 의하여 자동으로 제어하였다.

마. 고품질 AlGaAs 성장을 위해 load lock system(그림 1의 반응관 하단부)을 제작, 부착하여 시료 장입시 반응관 내부가 외기와 접촉되는 것을 방지하였다.

이밖에 성장중 유량변화, 성장온도 변화, 항온조 온도변화를 최소가 되게 하였다.

2. 초격자 구조의 단면 관찰

성장한 초격자를 평가하는 가장 일차적인 수단은 초격자 단면을 직접 관찰하는 것이다. 이런 단면 관찰은 TEM(transmission electron microscope)에 의한 관찰, 나아가서는 HRTEM(high resolution TEM)에 의한 원자 격자상의 관찰이 가장 정확한 방법이나 시료 준비가 까다롭고 장비가 고가이다. 본 연구에서는 특별한 장비가 필요없고 ~100 Å 정도의 두께는 쉽게 관찰할 수 있는 경사연마법에 의하여 초격자의 단면을 관찰하였다. 그림2는 경사연마에 의한 초격자 단면관찰법의 원리도이다. 그림과같이 시료 표면으로 부터 θ 각이 되게 연마하면 그 경사진 단면은 $m = 1/\sin\theta$ 만큼 확대되어 보이는 효과가 일어난다. 본 연구에서는 θ 가 34 arcmin. 가 되게 경사연마 하여 100배 확대 효과가 일어나게 하고 clorox로 stain etching 하여 각층의 경계면이 뚜렷해지게 한 다음 Nomarski phase contrast microscope로 단면

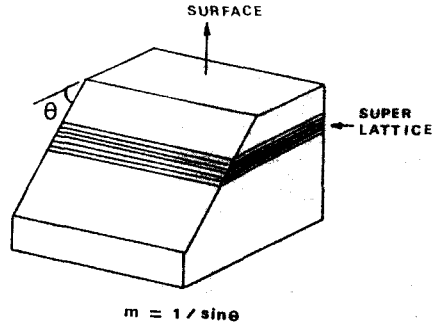


그림 2. 경사 연마에 의한 초격자 단면 관찰법의 원리도

Fig. 2. Schematic illustration of the shallow angle lapping technique for the crosssectional observation of superlattice structure.

을 관찰하였다. 그림3은 $Al_{0.6}Ga_{0.4}As$ 층 360 Å, GaAs 층 640 Å 두께를 가진 총 25주기의 초격자의 단면 사진이다. 경계면이 급준하고 각 GaAs 층과 AlGaAs 층의 두께가 균일함을 알 수 있다. 그림 4는 $Al_{0.6}Ga_{0.4}As$ 층 150 Å, GaAs 층 100 Å 등 총 32주기의 초격자 단면 사진으로 역시 경계면 급준성과 주기 균일성을 확인할 수 있다. 그림 5는 우물 두께가 각각 60 Å, 100 Å, 200 Å 인 IQW(isolated quantum well)의 단면이다. 경사연마의 기술적 문제로 인하여 우물층 두께가 명확히 비교되지 않지만 그 존재는 확인할 수 있다. 이때 장벽층의 Al 조성은 0.3으로 하였고 그 두께를 500 Å로 하여 우물에 갇혀있는 전자의 파동 함수가 고립되게 하였다.

3. DCXD에 의한 초격자의 구조평가

경사연마에 의한 초격자 단면관찰은 초격자를 구성하고 있는 AlGaAs 조성이 모두 균일한가 또한 각 GaAs 층과 AlGaAs 층들이 서로 완전히 같은 두께인가를 정량적으로 확인할 수 없지만 DCXD(double crystal x-ray diffractometry) 측정의 의하여 이를 확인할 수 있다. 다층의 GaAs/AlGaAs 초격자 구조를 DCXD로 측정할 경우 x-ray rocking curve 에는 structure factor와 strain의 주기적 변조에 의하여 단층의 AlGaAs 층의 x-ray rocking curve 와는 달리 satellite reflection pattern이 나타난다.^[10] 즉 0 차 satellite reflection을 중심으로 angle이 큰 쪽으로 +1, +2, +3..., 작은 쪽으로 -1, -2, -3...의 등간격 satellite reflection이 나타나며 고차 satellite reflection으로 갈수록 그 intensity는 급격히 감소한다. 이 satellite reflection pattern의 해석으로부터 우선 조

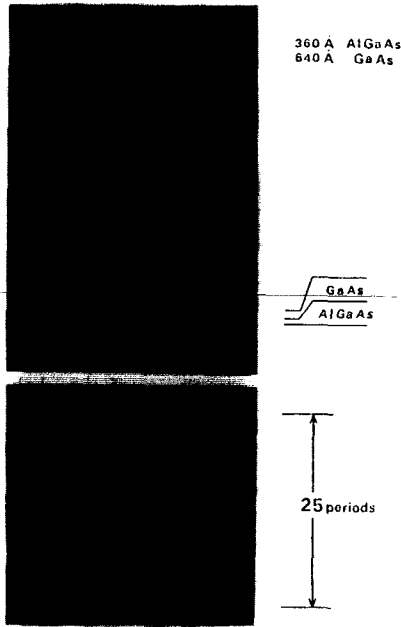


그림 3. 25주기 GaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As 초격자의 경사연마 사진
 Fig. 3. Crossectional microphotograph of the shallow angle lapped GaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As superlattice with 25 periods.

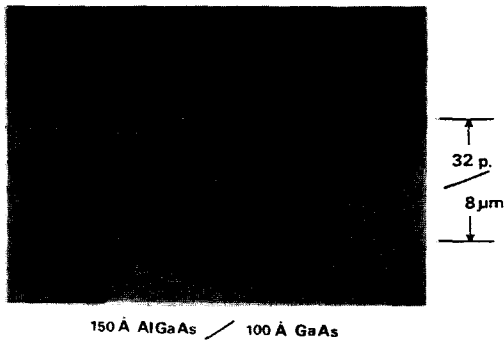


그림 4. 32주기 GaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As 초격자의 경사연마 사진
 Fig. 4. Crossectional microphotograph of the shallow angle lapped GaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As superlattice with 32 periods.

성균일성 및 주기 균일성을 확인할 수 있고 이로부터 초격자의 품질여부를 판별할 수 있으며 AlGaAs 층과 GaAs 층의 두께 및 AlGaAs 층의 Al 조성등

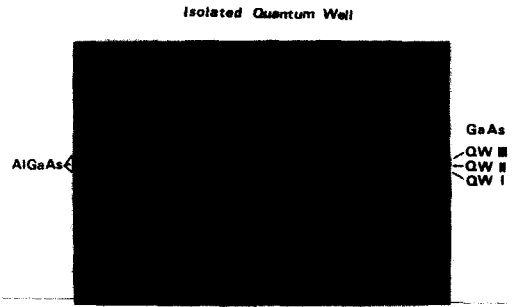


그림 5. 3개의 고립 양자 우물을 가진 구조의 경사연마 사진 (barrier Al 조성 = 0.3)
 Fig. 5. Microphotograph of the shallow angle lapped crossection of a structure with 3 isolated quantum wells.

초격자의 가장 중요한 design parameter를 비파괴적으로 결정할 수 있다.^[11] 본 연구에서는 dislocation free Si(100) 결정을 제 1결정으로하고 이 결정의 (400) 반사면을 이용하여 입사된 x-선을 단색화하여 CuK α 1을 얻어 이를 시편의 (400)면에 반사시켜 x-ray rocking curve를 측정하였다. 즉 본 연구의 DC XD의 geometry는 non-dispersive(+, -)geometry이다.^[12] 그림 6은 32 주기의 GaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As 초격자 구조의 x-ray rocking curve이다. 이 x-ray rocking curve에는 ± 1 satellite reflection이 관측되

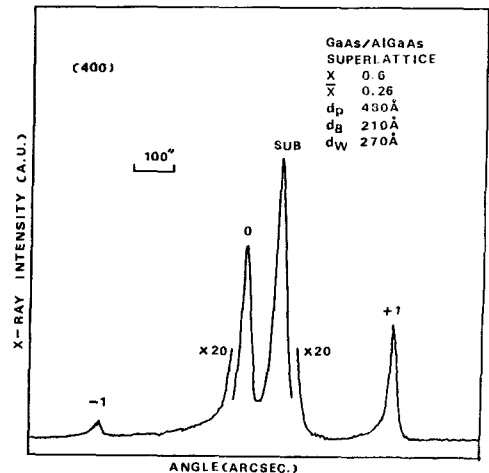


그림 6. 32주기 GaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As 초격자의 x-ray rocking curve
 Fig. 6. x-ray rocking curve of GaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As superlattice with 32 periods.

었다. 이 보다 고차 reflection은 그 intensity가 약해져 측정 한계를 벗어 나기 때문에 측정되지 않는 것이라 생각된다. GaAs 층 (well) 두께를 d_w , AlGaAs 층 (barrier) 두께를 d_b 라 하면 이 satellite reflection의 간격, $\Delta\omega_s$ 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\Delta\omega_s = \lambda \sin\theta_B / d_p \sin 2\theta_B \quad (1)$$

여기서 λ 은 CuK α 1의 파장, θ_B 는 GaAs(400) 반사의 Bragg angle, $d_p (=d_w+d_b)$ 는 한 주기의 두께이다. 따라서 $\Delta\omega_s$ 의 측정으로부터 d_p 를 구할 수 있고 한편 0차 satellite reflection은 초격자의 평균조성 (즉 GaAs 층과 AlGaAs 층이 서로 섞여 alloy가 되었을 때 Al 조성)으로 부터 생기므로 기판의 GaAs peak와의 비교로부터 평균조성 \bar{X} 를 구했을때 \bar{X} 는 다음의 관계가 있다.

$$\bar{X} = X d_b / d_p \quad (2)$$

여기서 X 는 AlGaAs 층의 Al 조성이다. 따라서 X 를 알 경우 (1),(2)로 부터 d_w, d_b 를 결정할 수 있다. 이상의 방법으로 그림 6에 제시한 초격자를 분석하면 d_w, d_b 가 각각 270 Å, 210 Å이 구해진다. 그림 6의 초격자 경우 성장 조건으로부터 $X=0.6$ 을 추정하여 d_w, d_b 를 결정하였는데 실제 AlGaAs 층의 조성은 추정 한 값과 차이가 있을 수 있다. 그림 7은 32주기 GaAs/Al_{0.59}Ga_{0.41}As 초격자의 x-ray rocking curve인데 그림 6과는 달리 초격자를 구성하는 AlGaAs 층과 똑같은 조성을 가진 AlGaAs capping 층을 1 μ m 정도 성장한 것이다. 0, ± 1 , +2 satellite reflection, substrate peak 외에 capping 층의 x-ray peak이 관측된다(그림 7의 CAP라 표시한 peak). 이 capping 층 peak로부터 X 를 결정하면 그림 6의 경우에 발생할 수 있는 오차요인이 없어져^[13] X, d_w, d_b 가 각각 0.59, 270 Å, 400 Å가 구해진다. 이들 성장 두께를 성장시간으로 나누면 성장속도를 정확하게 결정할 수 있다. 초격자의 DCXD 측정은 성장한 초격자의 평가 뿐아니라 각 층의 성장 속도를 정확히 결정할 수 있으므로 초격자 설계에 있어 중요한 도구임을 알 수 있다. 그림 8은 32주기 GaAs/AlAs 초격자 구조의 x-ray rocking curve 이고 0, +1 satellite reflection이 관측 되어 d_w, d_b 가 각각 93 Å, 90 Å이다. 따라서 양자효과를 기대할 수 있는 초격자 구조가 성장 되었음을 알 수 있다.

4. PL 측정에 의한 평가

성장한 IQW 구조의 PL (photoluminescence) 스펙트럼을 측정하였다. 그림 9는 그림 5의 경사 연마사

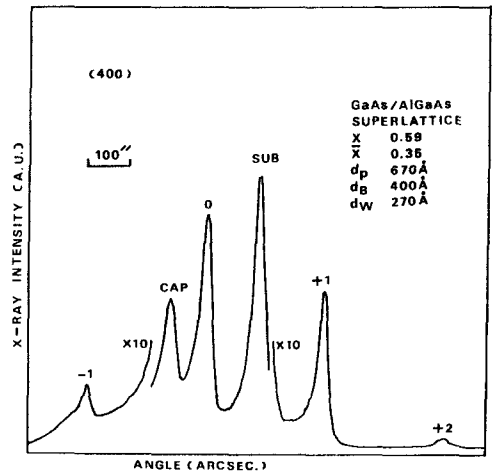


그림 7. 32주기 GaAs/Al_{0.59}Ga_{0.41}As 초격자의 x-ray rocking curve

Fig. 7. x-ray rocking curve of GaAs/Al_{0.59}Ga_{0.41}As superlattice with 32 periods.

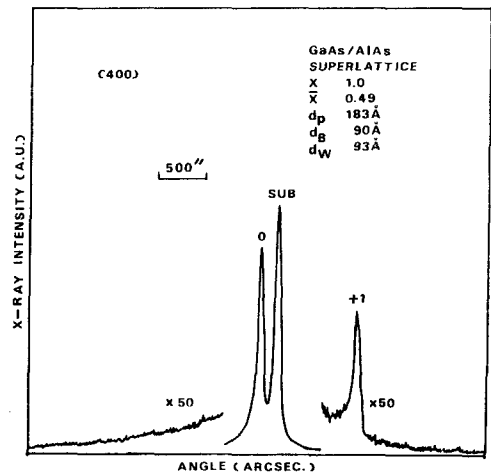


그림 8. 32주기 GaAs/AlAs 초격자의 X-ray rocking curve.

Fig. 8. x-ray rocking curve of GaAs/AlAs superlattice with 32 periods.

진으로 부터 제시한바 있는 IQW 구조의 PL 스펙트럼이다. 20K에서 He-Ne laser로 광여기 하였고 우물층의 두께는 60 Å, 100 Å, 200 Å으로 하였으며 장벽 200 Å으로 하였으며 장벽층은 500 Å 두께로 하였다. 이때 GaAs 우물층과 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 장벽층과의 band discontinuity 때문에 GaAs 층의 전도대와

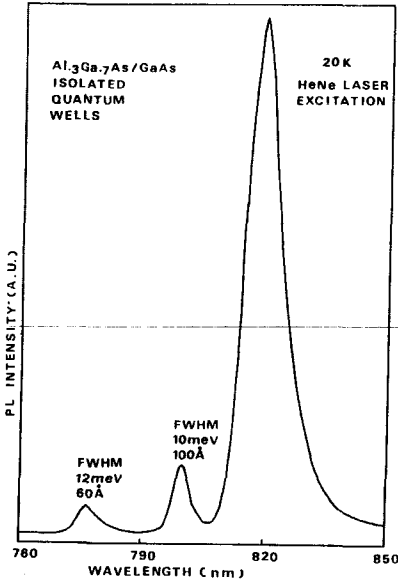


그림 9. GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 고립 양자우물의 PL 스펙트럼

Fig. 9. PL spectrum of isolated GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As quantum wells.

가전자대쪽 모두에 퍼텐셜 우물이 생긴다. 우물의 두께가 전자와 양공의 DeBroglie 파장보다 작을때 퍼텐셜 우물에 갇혀있는 전자와 양공의 에너지 상태는 양자화 된다.^[14] 우물의 두께가 클수록 전자와 양공의 바닥상태 에너지는 낮아지므로 그림 9의 구조의 IQW에서는 모든 우물의 바닥상태에 있는 전자와 양공의 재결합으로부터 발생하는 PL스펙트럼을 측정할 수 있다. 그림 9의 PL 스펙트럼에서 큰 강도로 검출된 GaAs peak보다 낮은 파장(고 에너지)쪽에 두개의 peak를 검출하였다. PL은 우물층의 바닥 상태에 있는 전자와 양공의 재결합에 의하여 발생하므로 발광파장은

$$h\nu = E_g(\text{GaAs}) + E_e + E_{hh} - E_{exc} \quad (3)$$

로 주어지고 여기서 $h\nu$ 는 PL 발광파장, $E_g(\text{GaAs})$ 는 GaAs 에너지 갭, E_e 와 E_{hh} 는 우물층에 있는 전자와 무거운 양공(heavy hole)의 바닥 상태에너지이고 E_{exc} 는 전자와 무거운 양공의 exciton binding energy이다. 측정된 PL 결과를 해석하기 위해 다음과 같은 점을 고려하였다. $E_g(\text{GaAs})$ 를 비롯한 장벽층과 우물층의 전자와 무거운 양공의 유효 질량은 Casey와 Panish의 값을 도입하였고^[15] E_e 와 E_{hh} 는 사각형 퍼텐셜 우물(square potential well)을 가정하고 경

계조건을 고려하여 계산하였다.^[16] E_{hh} 의 계산은 Luttinger Hamiltonian으로 계산하는 것이 정확하나^[16] 무거운 양공의 유효 질량만 고려하여 E_e 계산과 같은 방법으로 하였다. 한편, E_{exc} 는 Dingle의 9meV를 일률적으로 취하였고^[17] 현재 많은 논란이 되고 있는 band offset parameter (Q)는 Dingle의 $Q=0.85$ ^[17]를 채택하지 않고 현재 대체로 받아들여지고 있는 $Q=0.6$ ^[18]을 도입하였다. 이상을 고려한후 PL 결과를 해석한 결과 각각의 quantum peak의 우물두께는 61 Å, 100 Å로 산출되었다. 따라서 200 Å의 PL peak는 GaAs peak와 구분이 되지않는 것으로 생각된다. 한편 MOCVD에 의한 양자우물 구조 성장시의 성장 재현성 여부를 검색하기 위하여 같은 성장조건으로 성장한 두개의 다른 IQW구조의 PL 스펙트럼을 측정하여 그림10에 제시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 RUN NO1에서는 21 Å, 40 Å, 52 Å의 우물로 부터 나오는 PL peak가 검출되었고 RUN NO2에서는 26 Å, 42 Å, 57 Å의 PL peak가 검출되어 그 차이는 최대 6 Å(약 2 monolayer)이다. 이는 효율 가치가 있는 양자 우물 소자를 재현성 있게 성장할 수 있음을 의미한다. 그림11은 그림 9, 10의 PL peak의 FWHM (full width at half maximum)을 측정하여 우물 두께에 대하여 나타낸 것이다. 또한 비교를 위

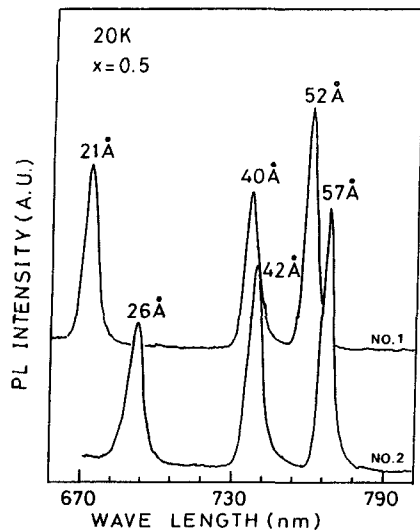


그림10. GaAs/Al_{0.5}Ga_{0.5}As 고립 양자우물의 PL 스펙트럼

Fig. 10. PL spectrum of isolated GaAs/Al_{0.5}Ga_{0.5}As quantum wells.

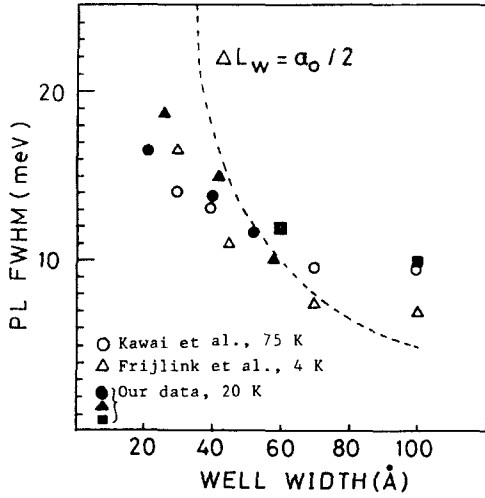


그림11. PL FWHM과 우물 두께와의 관계
Fig. 11. Relation between PL FWHM and well width.

해 75K에서 측정된 Kawai 등⁽¹⁹⁾의 결과와 4 K에서 측정된 Frijlink 등⁽²⁰⁾의 결과도 함께 나타내었다. 이들의 IQW 구조는 모두 MOCVD법으로 성장한 것으로 이들의 PL FWHM의 결과는 본 연구의 결과와 비슷하다. 따라서 그들의 IQW와 견줄만한 헤테로 계면 급준성을 가진 IQW 구조가 성장되었음을 확인하였다. 그림11의 점선은 헤테로 계면에 monolayer fluctuation(=2.83Å)이 존재할 경우 예측되는 PL FWHM을 OK에서 계산한 결과이다.⁽²¹⁾ 본 실험의 결과를 이 이론치와 비교하여 볼때 헤테로 계면에 1 monolayer 정도의 fluctuation이 있는 것으로 생각된다. 이 결과로 미루어 볼때 계면 급준성이 가장 중요한 HEMT 구조의 성장도 가능할 것으로 생각된다. 그림12는 그림 8에 제시한 GaAs/AlAs 초격자의 PL스펙트럼이다. PL FWHM이 21meV로 다소 넓은 편이나 MQW (multi quantum Well) laser diode의 성장가능성을 알 수 있다.

II. MOCVD에 의한 HEMT구조의 성장 및 특성평가

1. MOCVD에 의한 HEMT 구조의 성장

HEMT구조 성장을 위한 대기압 MOCVD 장치 및 angstrom 단위의 박막성장을 위해 주의되는 사항은 I 장에서 이미 논의한 바 있다. HEMT구조성장 조건은 초격자 성장조건과 유사하다. 성장온도는 700

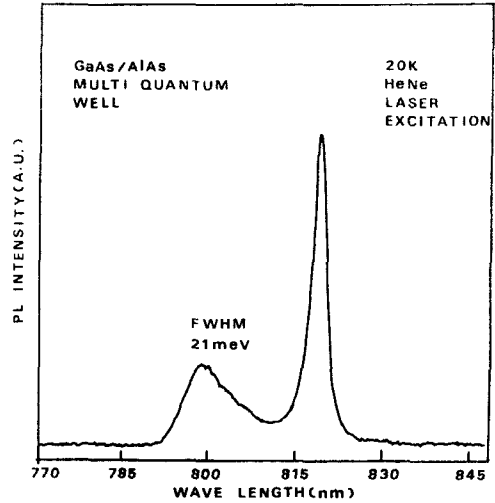


그림12. GaAs/AlAs 다중 양자우물의 PL 스펙트럼
Fig. 12. PL spectrum of GaAs/AlAs multiquantum well.

℃, carrier 수소 총유량 5ℓ/min. V/III(AsH₃/(TMG+TMA))비는 40으로 하였다. 성장된 단일 헤테로 계면의 HEMT의 단면 구조는 그림13과 같다. Cr doping한 반절연기판 위에 undoped GaAs buffer 층을 1 μm 정도 먼저 성장한 다음 spacer 층으로 undoped Al_{0.3}Ga_{0.7}As 층을 100 Å 두께로 성장하였다. 다음으로 대략 1×10¹⁸ cm⁻³ doping 농도를 갖는 Si-doped Al_{0.3}Ga_{0.7}As 층을 300 Å 정도 성장하였다. 이때 Si doping은 SiH₄ gas에 의하여 하였다. 실제 HEMT 구조 성장시 ohmic을 위해 Si-doped GaAs 층을 다시 성장하여야 하나 Hall 측정시 Si-doped GaAs 층의 전도로 부터 오는 혼란을 피하고 GaAs/AlGaAs 계면의 2 차원 전자층 만을 연구하기 위해 대부분 Si-doped GaAs capping 층을 성장하지 않았다. 특히 undoped GaAs buffer 층을 성장하고 undoped AlGaAs 성장을 시작할때, 즉 2 차원 전자층 계면을 형성할때 pressure surge가 없도록 유의하였다.

2. Hall 측정에 의한 HEMT의 수송현상 연구

HEMT구조는 이온화 된 impurity와 원래 impurity로부터 분리된 전자가 공간적으로 분리되어 있어 channel에 있는 2 차원 전자가 느끼는 coulomb 포텐셜에 의한 산란 효과는 현저히 감소한다. 이 이온화 된 impurity에 의한 산란은 77K 이하의 저온에서 그 영향이 지대하므로 이온화 된 impurity에 의한 산란이 배제된 HEMT 구조는 저온에서 극히 높은 전자

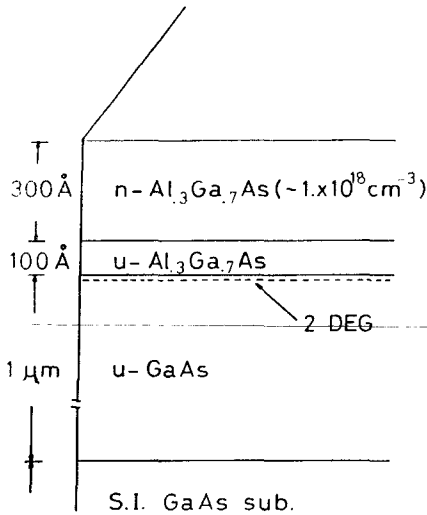


그림 13. 성장된 단일 헤테로 계면 HEMT의 개략적 단면 구조
 Fig. 13. Schematic crosssection of HEMT with single heterointerface.

이동도를 갖게 된다.^[22] 이 특징은 HEMT의 가장 중요한 특징이므로 Hall 측정에 의하여 온도변화에 따른 이동도와 sheet electron 농도의 변화를 연구하는 것이, 다시 말해서 온도변화에 따른 수송현상 연구가 선행되어야 한다. HEMT 구조의 저온 Hall 측정을 van der Pauw 방법에 의하여 하였다. Air product He closed circulation 저온 장치의 cold finger에 시료를 부착하여 온도 15K~300K 범위에서 온도를 변화시켜 가면서 Hall 이동도, sheet electron density, Hall 계수, resistivity 등을 결정하였다. 그림 14는 시료 AL189의 Hall 측정 결과이다. 저온으로 갈수록 이동도의 증가현상을 알 수 있고 이는 이온화 impurity 산란이 배제된 2차원 전자층의 고유의 현상이다. 따라서 2차원 전자층의 존재를 확인할 수 있다. 15K에서 이동도는 69,000cm²/v.sec, 77K에서는 41,200cm²/v.sec, 상온에서는 4,700cm²/v.sec였고 이때 sheet electron density는 각각 5.5×10¹¹cm⁻², 6.6×10¹¹cm⁻², 1.×10¹²cm⁻²였다. 상온에서 저온으로 갈수록 sheet electron density가 서서히 감소하는 경향을 보이는데 이는 DX center라 부르는 AlGaAs층에 있는 deep center가 저온으로 갈수록 “freeze out” 되기 때문이다.^[23]

3. C-V 측정에 의한 2차원 전자층 측정

헤테로 계면에 형성된 2차원 전자층의 존재를 확인하기 위해 Si doping 한 n-Al_{0.3}Ga_{0.7}As 층

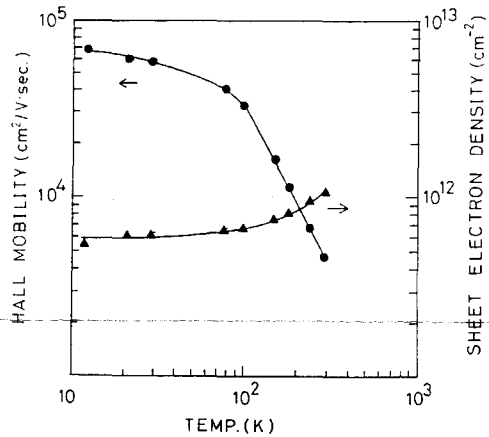


그림 14. Hall mobility와 sheet electron 농도의 온도의존성
 Fig. 14. Temperature dependence of Hall mobility and sheet electron density.

위에 직경 0.3mmφ의 Au를 진공증착하여 Schottky diode를 형성하여 C-V 측정을 하였다. 측정된 C-V 결과를 depletion 근사를 가정하여 depletion depth와 carrier 농도에 대하여 다시 계산하여 그림 15에 제시하였다. Depletion depth 400Å 정도 깊이에서 carrier 농도의 spike를 관찰할 수 있는데 이 spike는 2차원 전자층의 농축 현상에서 얻어진 것으로 대략 spike 높이는 1.8×10¹⁸cm⁻³이다. 이 2차원 전자층의 깊이와 농도는 원래 했던 400 Å, 1×10¹⁸cm⁻³에 거의 근접한다. 한편 spike의 carrier 농도가 1/10 만큼 줄어드는 곳의 폭은 대략 110 Å 정도로서 Watanabe 등이 MBE로 성장한 HEMT의 C-V 측정으로 보고한 폭 90Å에 거의 근접한다!^[24] 따라서 2차원 전자층의 존재를 확인하였다.

4. SdH 진동과 quantum Hall 효과 측정

강자장, 극저온에서 2차원 전자의 에너지 상태는 양자화 되어 Landau level을 형성하고 이 Landau level의 형성으로 인하여 SdH 진동 및 quantum Hall plateau의 형성 등의 양자효과가 일어난다. HEMT의 SdH 진동 및 quantum Hall 효과 측정을 하였다. 시료의 구조는 van der Pauw 구조이며 측정 온도는 액체 He을 이용하여 4.2K, 15K에서 측정하였고 전류는 10μA을 인가하여 측정하였다. 자장은 초전도 자석을 이용. 0-12T 구간에서 transverse magnetoresistance와 longitudinal magnetoresistance를 측정하였다. 그림 16은 4.2K에서 측정된 longitudinal

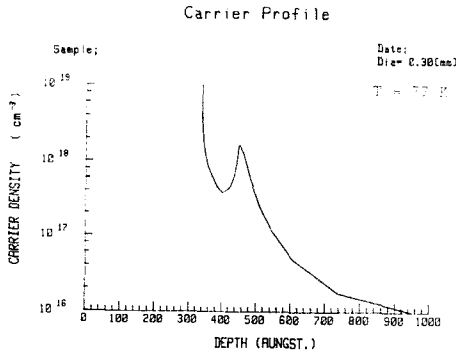


그림15. 77K에서 C-V로 측정된 HEMT 구조의 carrier 농도의 depth profile
 Fig. 15. C-V depth profile of HEMT structure measured at 77K.

magnetoresistance와 transverse magnetoresistance이다. Longitudinal magnetoresistance의 진동 즉 SdH(Shubnikov-de Haas) 진동을 볼 수 있다. 이 진동의 주기는 2차원 전자층의 농도와 다음의 관계가 있으므로^[25]

$$N_s = 2eh(\Delta(1/B))^{-1} \quad (4)$$

이식으로 부터 2차원 전자층의 농도를 정확히 결정할 수 있다. 여기서 h는 Planck 상수, B는 magnetic field 강도이다. 그림16의 결과로 부터 결정한 N_s 값은 $4.4 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 로서 15K Hall 측정에 의하여 결정한 값이 $5.5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 였으므로 더 저온으로 갈수록 carrier freezing이 계속 됨을 알 수 있다. 한편 그림의 transverse magnetoresistance의 quantum Hall plateau를 관측할 수 있다.^[6] 자장에 관한 Hall 저항 (즉 transverse magnetoresistance : ρ_{xy})은 다음과 같은 고전적인 표현을 가진다.

$$\rho_{xy} = B/N_s e, \quad (5)$$

한편 n Landau level까지 전자가 채워져 있을때 각 Landau level의 density of states는 eB/h 이므로 윗 식은

$$\begin{aligned} \rho_{xy} &= B/[e(neB/h)] \\ &= h/ne^2 \quad n=1, 2, 3, \\ &= 25818.8/n \quad (\text{ohm}). \end{aligned} \quad (6)$$

이 된다. 따라서 plateau가 생기는 곳은

$$\begin{aligned} h/2e^2 &= 12909.4 \quad \text{ohm}, \quad n=2 \\ h/3e^2 &= 8606.3 \quad \text{ohm}, \quad n=3 \\ h/4e^2 &= 6454.7 \quad \text{ohm}, \quad n=4 \end{aligned} \quad (7)$$

로 되므로 각 해당하는 Landau level filling number를 결정할 수 있다. 그림16에 Landau filling number n에 해당하는 h/ne^2 을 결정하여 표시하였다. 그림 17은 그림16의 4.2K에서 측정된 시료를 1.5K에서 측정된 것이다. 4.2K에서 잘 구분되지 않는 Landau filling number 3의 Hall plateau도 잘 구분된다. Longitudinal magnetoresistance의 SdH 진동으로 sheet electron density를 결정한 결과 $4.4 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 가 얻어져 4.2K에서 얻은 값과 같았다. 따라서 잘 정의된 2차원 전자층이 존재함을 확인하였다. 또한 Hall plateau가 일어나는 자장영역에서 ρ_{xx} 가 0에 가까운 값을 갖는 것으로 보아 parallel conductance 현상 또한 일어나지 않은 것으로 생각된다. 이는 AlGaAs영역이 완전히 depletion 됐음을 의미한다.^[27]

IV. 결 론

본연구에서는 MOCVD 기술에 의한 초격자 성장 및 특성평가 기술을 개발하였고 또한 HEMT 구조의 성장 및 특성 평가를 수행하였다. 초격자의 경우 GaAs/AlGaAs, GaAs/AlAs 다층 초격자를 성장하여 경사면마법에 의한 단면 관찰, DCXD 측정을 통하여 주기 균일성, 계면 급준성 및 Al 조성 균일성을 확

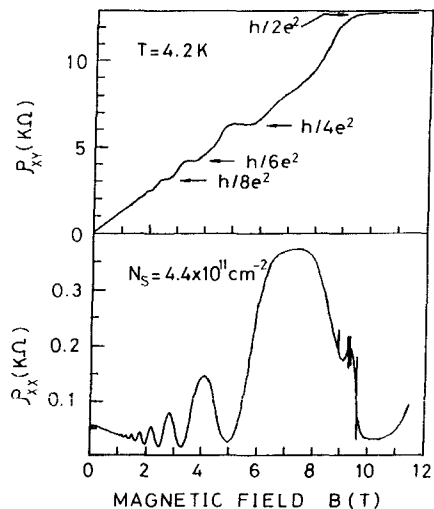


그림16. 4.2K에서 측정된 HEMT 구조의 자장 변화에 따른 transverse magneto resistance (ρ_{xy})와 longitudinal magnetoresistance (ρ_{xx})
 Fig. 16. Transverse magnetoresistance (ρ_{xx}) and longitudinal magnetoresistance (ρ_{xy}) of HEMT structure measured at 4.2K.

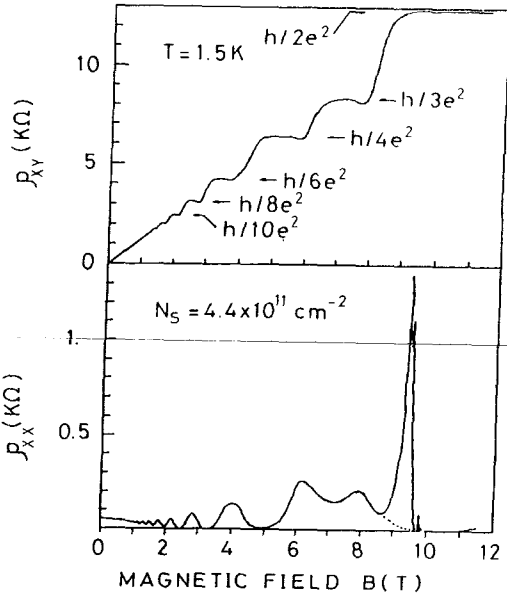


그림 17. 1.5K에서 측정된 HEMT 구조의 자장 변화에 따른 transverse magnetoresistance (ρ_{xy})와 longitudinal magnetoresistance (ρ_{xx})
 Fig. 17. Transverse magnetoresistance (ρ_{xy}) and longitudinal magnetoresistance (ρ_{xx}) of HEMT structure measured at 1.5K.

인하였다. 한편 고립된 양자우물 구조를 성장하고 이들 양자효과(quantum size effect)로 부터 발생하는 PL스펙트럼을 관측하였다. PL스펙트럼의 반치폭과 우물 두께의 관계로부터 헤테로 접합면에 대략 단원자층의 fluctuation이 있는 매우 좋은 결과를 얻었다. MOCVD에 의한 HEMT 성장의 경우 그 헤테로 계면에 형성된 2차원 전자층의 특성을 C-V, SdH 진동 측정, 저온 Hall 효과 측정을 통하여 조사 하였다. 15K에서 Hall 이동도가 69,000cm²/v·sec, sheet carrier 농도가 5.5×10¹¹cm⁻²이고, 77K에서 Hall 이동도가 41,200cm²/v·sec, carrier 농도가 6.6×10¹¹cm⁻²/v·sec 이었다. C-V profile 에서는 400 Å 정도의 깊이에서 carrier 농도의 spike 구조를 관찰할수 있었고, SdH 및 quantum Hall 효과 측정으로 부터는 2차원 전자층의 SdH 진동 및 quantized Hall plateau를 분명하게 관찰할 수 있었다. 이상의 결과로부터 2차원 전자층의 존재를 명확하게 입증할 수 있었고, 실제로 HEMT소자 제작을 위한 기본 기술이 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구사업은 과학기술처 연구비 지원으로 이루

어 졌으며 본 연구가 성공적으로 수행되도록 협조하여 주신 과기처 관계관과 과기원 및 관련 연구기관 여러분께 깊은 감사의 뜻을 전합니다. 또한 quantum Hall effect 측정을 해준 표준연구소 양자물리 연구실 유경화 박사님께도 깊은 감사를 드립니다.

參考文獻

- [1] H.L. Stomer, A.C. Gossard, W. Wiegmann and M.D. Sturge, "Two-dimensional electron gas at a semiconductor-semiconductor interface," Solid State Commun., vol. 29, p. 705, 1979.
- [2] 김무성, "MOCVD," 전자공학 회지, vol. 14, p. 15, 1987.
- [3] J.J. Coleman, P.D. Dapkus, D.E. Thompson and D.R. Clarke, "The growth and characterization of metalorganic chemical vapor deposition (MO-CVD) quantum well transport structures," J. Crystal Growth, vol. 55, p. 207, 1981.
- [4] Y. Mori, F. Nakamura and N. Watanabe, "High electron mobility in the selectively doped hetero structures grown by normal pressure metalorganic chemical vapor deposition," J. Appl. Phys., vol. 60, p. 334, 1986.
- [5] H. Takakuwa et al., "Low-noise microwave HEMT using MOCVD," IEEE, vol. ED-33, no. 5, 1986.
- [6] M.S. Kim, S-K. Min and J.S. Chun, "The gettering effects of Ga-In-Al ternary melt bubbler on growth rate and solid composition of MOCVD AlGaAs," J. Crystal Growth, vol. 74, p. 21, 1986.
- [7] S. Ochi, N. Hayafuji, Y. Kajikawa, K. Mizuguchi and T. Murotani, "Growth of GaAs/AlGaAs quantum well structures using a large-scale MOCVD reactor," J. Crystal Growth, vol. 77, p. 553, 1986.
- [8] K. Matsumoto, K. Itoh, T. Tabuchi and R. Tsunoda, "Flow patterns in various vertical reactors and MOVPE growth," J. Crystal Growth, vol. 77, p. 151, 1986.
- [9] J.S. Roberts and N.J. Mason, "Factors influencing doping control and abrupt metallurgical transitions," J. Crystal Growth, vol. 68, p. 422, 1984.
- [10] A. Segmuller, P. Krishna and L. Esaki, "X-ray diffraction of a one-dimensional GaAs-AlAs superlattice," J. Appl. Cryst., vol. 10, p. 1, 1977.

- [11] L. Taper and K. Ploog, "Improved assessment of structural properties of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ heterostructures and superlattices by double-crystal x-ray diffraction," *Phys. Rev.*, vol. 33, p. 5565, 1986.
- [12] H-S. Kim, Y. Kim, M.S. Kim and S-K. Min, "Structural properties of GaAs grown on (100) Si substrates by MOCVD," *J. Crystal Growth*, vol. 92, p. 507, 1988.
- [13] R. Azoulay, B. Jusserand, G. Le Roux, P. Ossart and L. Dugrand, "MOCVD growth and characterization by raman scattering, x-ray diffraction and Auger spectroscopy of short period GaAs/AlAs and GaAs/ $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ superlattices," *J. Crystal Growth*, vol. 77, p. 546, 1986.
- [14] L. Esaki and R. Tsu, "Superlattice and negative conductivity in semiconductors," *IBM Res. Note*, RC-2418, 1969.
- [15] H.C. Casey, Jr. and M.B. Panish, *Heterostructure Lasers Part A : Fundamental Principles* Academic, New York, 1978.
- [16] C. Weisbuch, *Semiconductors and Semimetals* vol. 24, Academic Press, London, p. 11, 1987.
- [17] R. Dingle, W. Wiegman and C.H. Henry, "Quantum states of confined carriers in very thin $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ heterostructures," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 33, p. 827, 1974.
- [18] R.C. Miller, D.A. Kleinman and A.C. Gossard, "Energy gap discontinuities and effective masses for GaAs- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ quantum wells," *Phys. Rev.*, vol. B29, p. 7085, 1984.
- [19] H. Kawai, K. Kaneko and N. Watanabe, "Photoluminescence of AlGaAs/GaAs quantum wells grown by metalorganic chemical vapor deposition," *J. Appl. Phys.*, vol. 56, p. 463, 1984.
- [20] P.M. Frijlink and J. Maluenda, "MOVPE growth of $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}-\text{GaAs}$ quantum well heterostructures," *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.*, vol. 21, p. L 574, 1982.
- [21] H. Sakaki, M. Tanaka, and J. Yoshino, "One atomic layer heterointerface fluctuations in GaAs-AlAs quantum well structures and its suppression by the insertion of smoothing period in molecular beam epitaxy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 24, L417, 1985.
- [22] H. Morkoc, *The technology and physics of molecular beam epitaxy*, Plenum Press, New York, chap. 7, 1985.
- [23] Y. Kim, M.S. Kim, S-K. Min, "Anomalous conduction band density of states in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alloys," *Solid State Commun.*, vol. 68, p. 295, 1988.
- [24] M.O. Watanabe, J. Yoshida, T. Nakanishi, M. Kawano and K. Kamei, "C-V profiling studies on selectively doped GaAs/n-AlGaAs heterostructures," *Inst. Phys. Conf. Ser.*, no. 79, p. 559, 1985.
- [25] H.L. Stomer, "Heterojunctions and semiconductor superlattices," Part III, p. 50, Springer-Verlag, Berlin, 1985.
- [26] K.V. Klitzing, G. Dorda, and M. Pepper, "New method for high-accuracy determination of the fine-structure constants based on quantized Hall resistance," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 38, p. 552, 1981.
- [27] E.F. Schubert et al, "Selectively doped n- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ heterostructure with high-mobility two dimensional electron gas for field effect transistor," *Appl. Phys.*, vol. A33, p. 3, 1984.

著者紹介



金 武 性(正會員)

1956年 4月 26日生. 1980年 2月 서울대학교 금속공학과 졸업. 1986年 2月 한국과학기술원 재료공학과 박사학위. 1983年 이후 KIST 재직 중. 현재 반도체 재료연구실 선임 연구원. 주관심분야는

화합물 반도체 에피성장 및 물성평가 등임.



金 成 一(正會員)

1961年 3月 14日生. 1983年 2月 전남대학교 공과대학 제어계측공학과 졸업. 1986年 한국과학기술원 물리학과 석사. 현재 KIST 반도체 재료연구실 연구원. 주관심분야는 반도체 레이저와 화합물

반도체 에피성장 및 물성평가



金 湧(正會員)

1961年 4月 9日生. 1983年 2月 서울대학교 물리학과 졸업. 1985年 2月 한국과학기술원 물리학과 석사. 1987年 2月~한국과학기술원 물리학과 박사과정. 1985年 이후 현재 KIST 반도체 재료 연구

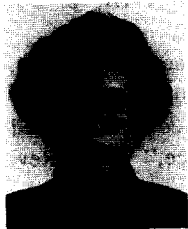
실 연구원. 주관심분야는 화합물 반도체 에피성장 및 물성평가 등임.



閔 碩 基(正會員)

1938年 12月 14日生. 1964年 2月 고려대학교 물리학과 졸업. 1966年 고려대학교 대학원 고체 물리학 이학 석사. 1968年 고려대학교 물리학과 조교. 1969年~1970年 고려대학교 물리학과 강사. 19

89年 OSAKA 대학 전자공학과 공학박사. 현재 KIST 반도체 재료 연구실장. 주관심분야는 Si, GaAs 단결정 성장기술, MOCVD, VPE 에피성장, 반도체 내의 Deep level 연구 등임.



嚴 慶 淑(正會員)

1984年 2月 한양대학교 재료공학과 석사. 1985年 이후 현재 KIST 반도체 재료연구실 연구원. 주관심분야는 반도체 레이저 다이오드와 HEMT, MESFET 제조 및 특성 평가 등임.