

# GaAs/AlGaAs HEMT構造의 2DEC 測定

李載珍 · 孟成在 · 朴孝勳 · 金鎮變 · 馬東星

## 〈要約〉

n-GaAs/AlGaAs계의 화합물 반도체 접합에 형성되는 이차원 전자 가스를 캐패시턴스-전압(C-V), 각도 의존 자기저항(SdH), 전자 빔 반사(EBER)등의 측정 방법을 통하여 AlGaAs 조성비(x)는 0.281, 전도대와 가전도대의 밴드 불연속은 각각 밴드 갭( $E_g$ )의 69%와 31%임을 알았고, 여기에 존재하는 이차원 전자가스의 면 농도는  $5.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , 페르미 준위  $E_F$ 는 25meV 임을 알았다. 또한 도핑 된 AlGaAs층에서 흔히 나타나는 Franz-Keldysh진동은 불순물의 활성화도가 작으면 형성되는 전기장의 약화로 나타나지 않는다는 것을 발견하였다.

## I. 서론

고전자 이동 트랜지스터(HEMT=High Elec-

tron Mobility Transistor)는 정보화 시대가 도래하면서 통신이 초고주파화 함에 따라 중요한 전자 소자로 부상 되었다. HEMT소자는 저잡음 특성과 높은 트랜스 콘덕턴스를 가지며 조셉슨 소자에 견줄 만한 빠른 스위칭 속도를 갖는다. 그러므로 HEMT는 저잡음 증폭기<sup>[1-3]</sup>, 기억소자<sup>[4-7]</sup>와 같은 초고속 소자 적용에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다.

HEMT는 일반적으로 밴드 갭이 서로 다른 두 물질의 구조에 변조 도핑 또는 선택 도핑을 하여 제조하는데 GaAs/AlGaAs계에서는 밴드 갭이 큰 AlGaAs층에만 Si을 도핑하고 작은 밴드갭을 갖는 GaAs층에는 도핑하지 않는다. 이러한 구조에서는 물질의 접합 경계에서  $\Delta E_c$ 의 밴드 불연속이 나타나고 이에 기인되어 AlGaAs층의 도너로부터 방출된 전자는 전자 친화력이 큰 GaAs에 모이게 되고 이들이 이차원 전자가스를 형성하게 된다.

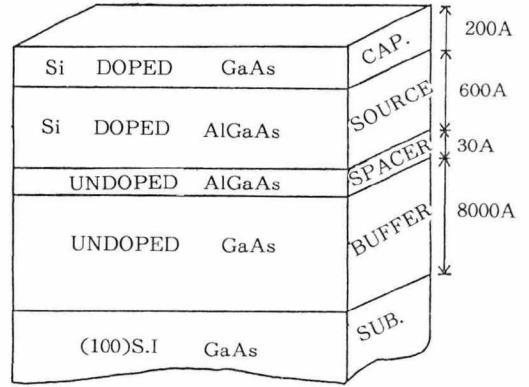
그러므로 이 전자들은 이온화된 불순물로 부터 공간적으로 분리되어 불순물 산란의 영향을 받지않아 이동도가 커지는 특성을 가지게 된다. 따라서 HEMT소자에서 이차원 전자 가스층은 소자 성능 및 특성을 결정하므로 이의 연구는 대단히 중요하다. Dingle<sup>[8]</sup>등은 이러한 이차원 전자 가스를 단일 접합과 변조 도핑한 초격자에서 관찰하여 이미 1978년에 보고한바 있다. 그 후 이차원 전자 가스를 GaAs/AlGaAs이종 접합 경계에서 관찰하기 위해 SdH(Shubnikov-de-Haas)진동으로 알려진 각도 의존 자기 저항<sup>[9]</sup>, 광 루미네스스(PL=Photoluminescence)와 적외선흡수<sup>[10, 11]</sup> 및 C-V<sup>[12, 13]</sup>측정과 같은 여러방법이 시도 되었다.

본 논문에서는 MBE(Molecular Beam Epitaxy)로 GaAs/AlGaAs계의 HEMT 구조를 성장하여 이 구조의 이종 접합경계에 존재하는 이차원 전자 가스를 C-V, SdH 및 최근에 새로이 제안된 EBER(Electron Beam Electro-Reflectance)<sup>[13]</sup>방법을 이용하여 측정하고 이로부터 경계면에서 두 물질의 밴드 불연속 차를 알아보고, 불연속 차에 기인되어 나타난 포텐셜우물의 농도 분포 및 면 농도, 농도 차에 따른 페르미 준위를 계산하였다. 또한 EBER스펙트럼에서 Franz-Keldysh진동에 대해 해석하고자 한다.

## II. 실험

n-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs HEMT구조는 MBE에 의해 <그림 1>과 같이 성장시켰다. 반절연성(100) GaAs 기판에 8,000Å의 도핑하지 않은 GaAs 완층층을 형성하고 30Å의 도핑하지 않은 Al<sub>0.28</sub>Ga<sub>0.72</sub>As 600Å층을 성장하면서 실리콘 불순물을 2x10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>도핑 시켰다. AlGaAs층의 조성비는 PL측정에서 얻은 결과로부터 알루미늄 셀의 온도를 제어하므로서 얻은 것이다.

n-Al<sub>0.28</sub>Ga<sub>0.72</sub>As층 위에는 소자 제작시 저항성 접촉과 AlGaAs층의 산화를 방지하기 위해 약 200Å의 GaAs층을 역시 2x10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>으로 실리콘



<그림 1> MBE장비를 이용하여 제작한 GaAs/AlGaAs계 HEMT구조 시편

을 도핑하였다.

C-V측정을 하기 위하여 준비된 시료의 GaAs 캡 층을 습식 리세스 에칭에 의하여 제거하고 n-Al<sub>0.28</sub>Ga<sub>0.72</sub>As층에 알루미늄을 2,000Å, 1mm직경으로 증착하여 쇼트키다이오드를 형성한 후 역 바이어스 전압을 가하였다. 저항성 접촉은 AuGe/Ni/Au를 2,000Å/700Å/1,500Å의 두께로 증착 한 후 480°C에서 5분간 질소 분위기에서 열처리 하였다.

SdH효과는 4mm×4mm정방형 모양의 시료에 van der Pauw형태의 전극을 형성하여 1.5K에서 측정하였다. 저항성 접촉은 In으로 붙인후 질소 분위기 하에서 480°C에서 5분간 열처리 하였다. 제작된 시료는 베이크 라이트 블록으로 된 시료 부착대에 붙이고 초전도 솔레노이드 자석으로 된 액체 헬륨 저온 용기에 넣어 전류에 의해 이차원 전자 가스에 수직한 방향으로 자기장을 0-10T까지 변화시키면서 측정하였다.

EBER은 시료의 온도 변화없이 실온에서 측정하였으며 사용한 전자의 빔전류는 음극선 루미네스스가 시료로부터 방출되는 것을 막기 위해 0.5-5.0uA사이를 유지하도록 하였고 광원은 Xe아크 램프로 3,000A-17,000A까지 파장을 변화시켰다. 광원으로부터 나온 빛은 6-60Å의 분해능을 갖는 촛점거리 0.25m의 분광기를 통하여 직경 0.4mm의 크기로 집속시켜 시료에 입사시켰다. 반사광의 검출은 3,000-11,000Å까지

의 파장은 Si검출기로, 11,000-17,000Å은 InGaAs로 구성된 이중 검출기를 이용하였다.

### III. 결과 및 논의

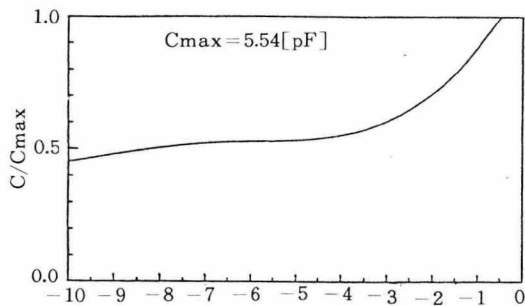
#### 1. C-V 측정

C-V 방법은 인가한 역 바이어스에 의해 변화하는 캐패시턴스 차를 이용하여 반도체 내에 존재하는 전하 분포를 아는 데 중요한 방법으로 이용되어 왔다.<sup>[14]</sup> 이 방법은 공간 전하 영역에서 그 깊이를 결정하는 변수가 많아 불순물의 분포 깊이는 아주 정확하지 않으나 분포의 경향은 실제에 가깝게 측정할 수 있다. 실리콘을 도핑한 Al<sub>0.28</sub>Ga<sub>0.72</sub>As/GaAs의 이중 접합 구조에서 C-V를 측정한 결과가 <그림 2>이다. 이 그림으로 부터 인가한 바이어스에 대해 1/C<sup>2</sup>에 의한 깊이 분포를 그린 것이 <그림 3>이다.

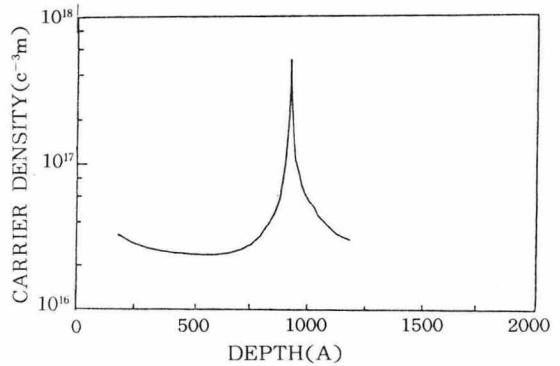
일반적으로 AlGaAs층이 모두 공핍되고 전자가 모두 2DEG에 속박된 이상적인 경우에서 밴드 불연속과 도너 농도는 Joyce-Dixon 근사<sup>[15]</sup>에 의해 다음식으로 주어 진다.

$$\Delta E_C = E_{F0} + \xi + \frac{q^2 n_{2DEG}}{2\epsilon_1 N_D} + \frac{q^2 n_{2DEG}}{\epsilon_1} W_s \dots\dots\dots(1)$$

$$N_D = N_C \exp\left[-\frac{\xi}{kT} \left(1 + g \exp\left(\frac{E_C - E_P - \xi}{kT}\right)\right)\right] \dots\dots(2)$$



<그림 2> Al을 게이트 금속으로 하여 GaAs/AlGaAs계 HEMT구조에서 측정한 C-V 특성



<그림 3> GaAs/AlGaAs계 HEMT구조의 접합 경계에 형성된 이차원 전자가스(2DEG)의 깊이에 따른 농도 분포(C-V 측정)

여기에서  $\Delta E_C$ 는 밴드 불일치,  $E = E_{F0} - E_C(z = 0)$ ,  $q$ 는 전자 전하량  $\xi$ 는 전도 대  $E_C$ 와 페르미 준위 사이의 거리,  $n_{2DEG}$ 는 2DEG의 면농도,  $N_D$ 는 AlGaAs층의 도핑 농도,  $\epsilon_1$ 은 AlGaAs층의 유전율,  $W_s$ 는 스페이서의 폭,  $g$ 는 도너 준위의 기저 상태 축퇴이며  $N_C$ 는 전도대의 바닥 상태에서 유효 상태 밀도이다.

전도대가 축퇴되어 있지 않다고 가정하면<sup>[16]</sup>

$$E_C - E_F = -kT \ln[n(x)/N_C(x)] \dots\dots\dots(3)$$

로 주어지고

$$\hat{x} = \left[ \int_0^\infty \Delta n(x) x dx \right] / \left[ \int_0^\infty \Delta n(x) dx \right] \dots\dots(4)$$

이므로  $\Delta n(x)$ 의 평균 거리가 이중 중첩 구조에 존재 한다면 전자 분포는  $x = \hat{x}$ 에서 크게 나타난다.  $n(x)$ 가 실제 캐리어 농도이고  $\hat{n}(x)$ 가 측정치이면

$$\int_0^\infty n(x) dx = \int_0^\infty \hat{n}(x) dx \dots\dots\dots(5)$$

이다. 중성화 조건으로 부터  $\delta_i$ 는

$$\delta_i = -\int_0^\infty [N_d(x) - \hat{n}(x)] dx \dots\dots\dots(6)$$

이고 도너 도핑 깊이 분포  $N_d(x)$ 를 안다고 가정하면  $n(x)$ 에서 경계 전하 밀도를 결정 할 수 있다.

한편

$$\Delta\phi = (\delta_1 - \delta_2) + \Delta E_c/q \dots\dots\dots(7)$$

이고, 두가지 물질에 대하여

$$\delta_1 - \delta_2 = \frac{kT}{q} \ln \left[ \left( \frac{n(2) m_n^*(2)}{n(1) m_n^*(1)} \right)^{3/2} \right] \dots\dots\dots(8)$$

의 관계가 있으므로  $Nd(x)$ 는 알고 있고  $n(x)$ 를 측정하면 (6)식과 (7)식으로 부터 표면 전하 밀도와 전도대의 불일치  $\Delta E_c$ 를 결정할 수 있다. 이로부터 <그림 3>의 측정값을 이용하면  $\Delta E_c$ 는 0.305eV 이고 표면 전하 밀도는  $4 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$  이 된다.

2. Shubnikov-de-Haas효과 측정

n-AlGaAs/GaAs이종 접합 구조에서 미소한 콘덕션을 측정하는 가장 좋은 방법은 자기장 속에서 자기 저항을 직접 측정하는 것이다. 그림 4는 1.5K에서 시료의 transverse 자기 저항을 측정한 결과이다. 자기장을 이차원 전자 가스 층에 수직하게 인가하였을 때 자기장의 변화에 따라 진동하는 전압 곡선을 보여 주고 있다. 2차원계에서 전자의 밀도는  $2qB/h$ 의 Landau 준위를 채우게 되므로 접합면에 형성된 전자의 에너지 준위는 단지 외부에서 인가한 자기장의 함수로만 주어진다. 이때  $h/q$ 는 양자 선속이고  $4.14 \times 10^{-15} \text{Tm}^2$ 의 값을 가진다.

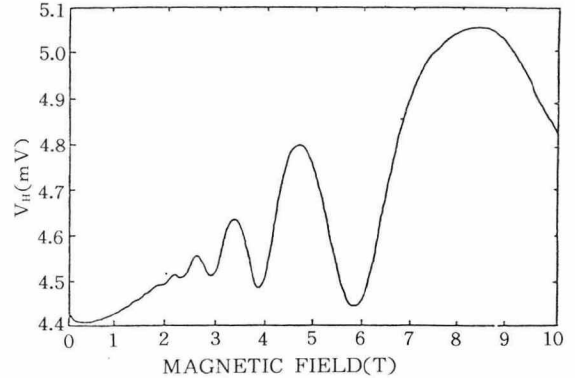
따라서 자기장의 변화에 따른 이차원전자 가스의 진동으로부터 관계식<sup>[9, 17]</sup>

$$n_{2\text{DEG}} = \frac{q}{\pi\hbar} \frac{\Delta P}{\Delta H^{-1}} \dots\dots\dots(9)$$

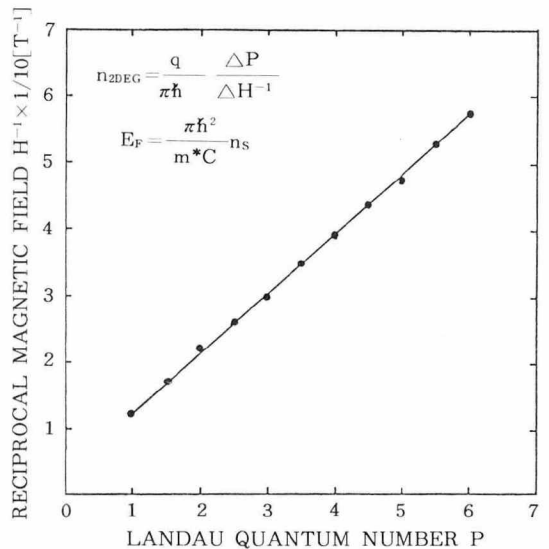
을 이용하면  $n_{2\text{DEG}}$ 를 계산할 수 있다. <그림 5>는 <그림 4>로 부터 Landau준위와 자기장의 역수 관계를 나타낸 것으로 <그림 5>의 직선으로부터 구한 기울기를 식(9)에 대입하면  $n_{2\text{DEG}} = 5.4 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 임을 알 수 있다.

또한

$$E_F = \frac{\hbar q}{m^*} \frac{\Delta p}{\Delta H^{-1}} \dots\dots\dots(10)$$



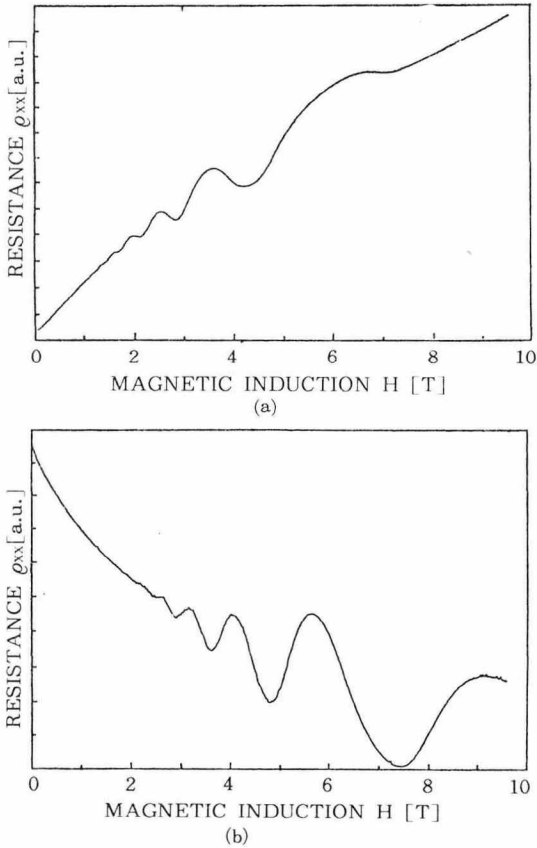
<그림 4> GaAs/AlGaAs계 HEMT구조에 형성된 이차원 전자가스의 자기장 변화에 따른 진동 특성



<그림 5> 이차원 전자가스의 자기장 변화에 따른 진동으로부터 얻은 Landau준위에 대한 자기장의 역수 관계

의 관계로부터  $E_F = 25 \text{meV}$ 를 얻을 수 있다. <그림 6>은 같은 시료에 대하여 1.5K에서 전류의 방향을 다르게 하여 자기장의 변화에 따라 transverse 자기 저항을 얻은 것이다. 이 경우 진동이 매우 약하게 되는 데 전체적인  $\rho_{xx}$ 값은 증가하게 된다. 이것은 시도한 바와 같이 parallel 콘덕턴스의 영향을 받기 때문이다. 즉 <그림 6-a>는 parallel 콘덕턴스가 없는 경우이고, <그림 6-b>는 strong parallel 콘덕턴스를 갖기 때문에

나타난 결과이다. 일반적으로 parallel콘덕턴스는 n-AlGaAs층이 충분히 공핍되지 않았다는 것을 의미하여 이중접합의 계면 경계에서 2DEG가 또 다른 이차적인 parallel한 전도 채널을 가지고 있다는 실험적 증거가 된다.



〈그림 6〉 이차원 전자가스의 Parallel conductance

3. 전자 빔에 의한 전자 반사측정

서로 다른 물질로 이루어진 HEMT구조에서 도핑된 AlGaAs은 이온화된 도너의 강한 전기장에 의해 진공과의 경계에서 강한 밴드의 휨을 나타내고 표면 밴드 휨에 의한 고전계는 AlGaAs 밴드 갭,  $E_0$ , 에너지 보다 높은 에너지에서 유전체 함수로 Franz-Keldysh(F-K)진동으로 나타난다. 그러므로 F-K진동은 도핑한 AlGaAs층

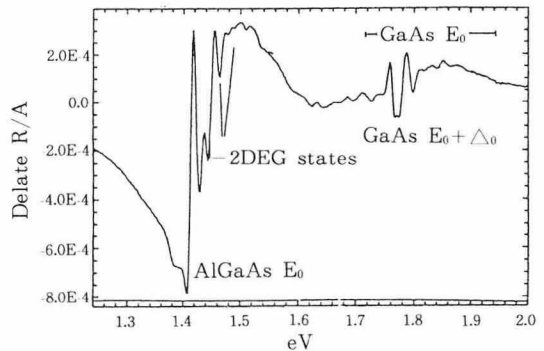
의 활성화와 AlGaAs층의 결정성을 확인할 수 있는 방법이 된다.<sup>[18]</sup> 일반적으로 F-K진동은 경계면의 이차원 전자가스층내에 존재하는 자유 캐리어의 농도에 따라 나타나고 전기장이 GaAs층까지 침투하면 F-K진동은 broad하게 나타난다.

또 PL과 마찬가지로 고품질의 도핑하지 않은 GaAs에서는 300K에서 1.424eV의 강한 엑시톤의 천이를 관측할 수 있다.

또 AlGaAs와 GaAs이중접합 경계에 형성되는 삼각형 장벽은 1차원적 전자 상태를 포함하며 2차원적으로 자유로운 2DEG는 GaAs  $E_0$ 의 에너지에 가전자대로 부터 전자를 흡수하게 된다. 이러한 천이는 sequential하게 일어나므로, 에너지 주기는 작으나 F-K진동의 형태로 나타난다.<sup>[12]</sup>

〈그림 7〉은 AlGaAs/GaAs계 HEMT구조에 대하여 300K에서 EBER을 측정한 스펙트럼이다. 횡축은 반사광의 파장에 따른 에너지이며 종축은 저에너지 전자 빔이 조사될 때 입사광에 따른 반사도의 변화를 기록한 것이다.

그림에 나타난 바와 같이 AlGaAs  $E_0$ 밴드갭은 1.77eV에서 나타내고 있고 이에 대응하는 x값을 계산하면 0.281임을 알 수 있다. 이 값을 PL로 제어한 성장 조건과 잘 일치한다는 것을 알 수 있다. 그러나 1.77eV 이상에서 예상된 F-K진동은 나타나지 않았다. 일반적으로 HEMT



〈그림 7〉 GaAs/AlGaAs계 HEMT구조에 전자 빔을 조사하면서 입사광의 에너지에 따른 반사도를 측정된 EBER스펙트럼

구조에서는 AlGaAs층의 도핑이  $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  정도이므로  $n^+ - \text{GaAs}(\text{cap})/\text{AlGaAs}$ 의 경계에서 강한 밴드 휨을 나타내고 이 밴드 휨은 큰 전기장을 형성하게 되어 AlGaAs  $E_0$ 보다 큰 에너지 영역에서 F-K진동으로 나타난다<sup>[9]</sup>. 이 F-K진동은 AlGaAs층의 자유 캐리어와 관계가 되어 있고 캐리어는 도핑의 정도, 결정성 및 어닐링 조건에 따라 다르게 나타난다. 한편, C-V의 결과와 SdH의 결과에서 나타난 바와 같이 도핑한 불순물 농도  $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 에 대하여 이차원 전자가스의 면농도는  $5.4 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 을 나타내었고 이들이 자기장의 변화에 대하여 삼각형 양자 우물내의 불연속 에너지 준위에 따라 진동을 하였다. 이로부터 AlGaAs층의 Si불순물의 활성화는 약 27%이었다.

따라서 F-K진동이 없다는 것은 AlGaAs층에 도핑한 불순물이 충분히 활성화 되지 않아서 캐리어의 수가 작아서 상대적으로 AlGaAs층의 전기장을 약화시켰다는 것을 알 수 있다. 이는 MBE에 의해 AlGaAs층에 Si을 고농도로 도핑할 때 불순물인 Si과 Si이 서로 공유 결합하여 순 캐리어의 수가 감소한다는 결과와도 상통한다.

한편 GaAs층은 1.424eV에서 PL과 마찬가지로 강한 엑시톤 천이를 보인다. 또한 GaAs  $E_0$  위의 에너지 영역에서 이차원 전자가스에 관련된 천이를 보이고 있다. 고순도 GaAs의 밴드 갭 에너지인 1.42eV에서 급격한 천이는 AlGaAs층 아래의 도핑하지 않은 GaAs로부터 기인하여 나타난 것이다. 왜냐하면 이 엑시톤 피크는 오로지 도핑하지 않은 순수한 GaAs에서만 나타나기 때문이다. 또한 1.424eV이상의 천이는 이차원 전자가스에 의해 기인되어 나타난 것이다. 이 천이 에너지는 AlGaAs층에 도핑을 하지 않으면 나타나지 않기 때문이다.

#### IV. 결 론

GaAs/AlGaAs계 HEMT구조를 MBE로 성장하여 경계면에 존재하는 이차원 전자 가스를 측

정하기 위하여 C-V, SdH 및 EBER측정 실험을 하였다. AlGaAs 및 GaAs의 결정성은 EBER스펙트럼으로부터 각각 300K에서 1.77eV, 1.42eV의 밴드 갭 에너지를 보이므로 매우 좋은 결정성을 가진 에피층임을 알았고, AlGaAs층의  $x$  값은 0.281임을 확인하였다. 전도대와 가전자대의 에너지 불연속  $\Delta E_c$ 와  $\Delta E_v$ 는 각각 밴드 불연속  $\Delta E_g$ 의 69와 31%를 C-V로 부터 측정하였으며, SdH효과 측정으로 부터 2차원 전자가스의 면농도는  $5.4 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ ,  $E_F$ 는 25mV임을 알았다. 한편 HEMT구조의 AlGaAs층에 도핑된 실리콘은 단지 27%만이 이온화하여 이차원 가스층을 형성하였고 이로 인하여 EBER측정에서 F-K진동이 나타나지 않았다는 것을 알 수 있었다.

#### 〈參 考 文 獻〉

1. E.Sovero, A.K. Gupta, J.A.Higgins, and W.A. Hill, "35GHz Performance of Single Crystal Quadrupole Power Heterojunction HEMT's", *IEEE Trans, Elec. Dev.* ED-33, 1434, 1986.
2. K.Hikósaka, Y. Hirachi, M. Abe. "Micro-wave Power Double Heterojunction HEMT's" *IEEE Trans. Elect, Dev.* ED-33, 601, 1986.
3. H.Hida, K.Ohara, "A New-low Noise AlGaAs/GaAs 2DEG FET with a Surface Undoped Layer", *IEEE. Trans, Elec. Dev.* ED-33. 601,1986.
4. N.T.Sah, S.S.Pei, C.W.Tu, and R.C. Tibero, "Gate Length Dependence of the Speed of SSI Circuits Using Submicrometer Selectively Doped Heterostructure Transistor Technology", *IEEE, Trans. Elec. Dev.* ED-33, 543, 1986
5. Y.Awano, M.Kosugi, T.Mimura, and M. Abe, "Performance of a Quarter-micrometer-gate Ballistic Electron HEMT",

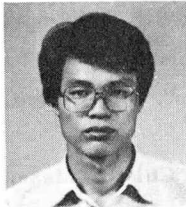
- IEEE, Elec. Dev. Lett.* EDL-8, 451, 1987.
6. S. Notomi, Y. Awano, M. Kosugi, T. Nagata, K. Kosemura, M. Ono, N. Kobayashi, H. Ishiwari, K. Odni, T. Mimura, and M. Abe, "A High Speed 1K x 4bit Static RAM Using 0.5 $\mu$ m Gate HEMT". *IEEE, GaAs symposium*, 177, 1987.
  7. M. Abe, T. Mimura, S. Notomi, K. Kondo, and M. Kobayashi, "Ultra High Speed High Electron Mobility Transistor Large Scale Integration Technology", *J. Vac. Technol.* 5, 1387, 1987.
  8. R. Dingle, H.L. Stomer, A. G. Gossard, and W. Wiegmann, "Electron Mobilities in Modulation Doped Semiconductor Heterojunction Superlattice", *Appl. Phys. Lett.* 33, 665, 1978.
  9. H.L. Stomer, A.C. Gossard, W. Wiegmann, and M.D. Sturge, "Two Dimensional Electron Gas at a Semiconductor-semiconductor Interface", *Sol. Stat. Comm.* 29, 705, 1979.
  10. R. Dingle, A.C. Gossard, and W. Wiegmann, "Direct Observation of Superlattice Formation in a Semiconductor Heterostructure", *Phys. Rev. Lett.* 34, 1327, 1975.
  11. R. Dingle, W. Wiegmann, and C. H. Henry. "Quantum States of Confined Carriers in Very Thin AlGaAs-GaAs-AlGaAs Heterostructure", *Phys. Rev. Lett.* 33, 827, 1974.
  12. M.H. Herman, I.D. Ward, S.E. Buttrill, Jr., and G.L. Francke, "Characterization of III-V Semiconductor Structures Using Electron Beam Electroreflectance Spectroscopy", *Mat. Sci. Res.* vol. 144, 1988.
  13. D.V. Lang, A.Y. Cho, A.C. Gossard, M. Ilegem, W. Wiegmann, "Study on Electron Traps in n-GaAs Grown by Molecular Beam Epitaxy", *J. Appl. Phys.* 47, 2558, 1976.
  14. E.F. Schbert, K. Ploog, H. Dambkes, and K. Heim, "Selectively Doped n-AlGaAs/GaAs Heterostructures with High-mobility Two Dimensional Electron Gas for Field Effect Transistors", *Appl. Phys.* A, 33, 63, 1984.
  15. H. Kroemer and Wu-Yi Chien, "Measurement of Isotope Heterojunction Barriers by C-V Profiling", *Appl. Phys. Lett.* 36, 295, 1980.
  16. M.O. Watanabe, J. Yoshida, M. Mashita, T. Nakanishi, and A. Hojo, "Band Discontinuity for GaAs/AlGaAs Heterojunction Determined by C-V profiling Technique", *J. Appl. Phys.* 57, (12), 15, 5340, 1985.
  17. H.L. Stormer, "Novel Physics in Two Dimensions with Modulation-doped Heterostructures" *Surf. Sci.* 142, 130, 184.
  18. N. Bottaka, D.K. Gaskill, R.S. Sillmon, R. Henry, and R. Glosser, "Modulation Spectroscopy as a Tool for Electronic Material Characterization", *J. Elec. Mat.* 17 (2), 161, 1988.
  19. D.E. Aspnes, "Third-derivative Modulation Spectroscopy with Low Field Electro-reflectance", *Surf. Sci.* 37, 418, 1973.



**李 載 珍(Lee, Jae Jin)**  
 1987 : 동국대학교 물리학과  
 이학박사  
 1987~현재 : 한국전자통신연구소 신소재  
 재료연구실 선임연구원



**金 鎭 燮(Kim, Jin Sup)**  
 1985. 8 : 경북대학교 전자  
 공학과 공학박사  
 1985. 9~1987. 2 : 한국전자통신연구소  
 선임연구원  
 1987. 3~현재 : 한국전자통신연구소  
 신소재재료연구실장



**孟 成 在(Maeng, Sung Jae)**  
 1984 : 서울대학교 무기재료  
 공학과 학사  
 1986 : 한국과학기술원 재료  
 공학과 석사  
 1986. 2~현재 : 한국전자통신연구소 신  
 소재재료연구실 연구원



**馬 東 星(Ma, Dong Sung)**  
 1964. 2 : 서울대학교 화학과 졸업  
 1975. 2 : 미국 The Catholic Univ.  
 of America 물리화학과  
 졸업(석사)  
 1977. 2 : 미국 The Catholic Univ.  
 of America 물리화학과  
 졸업(박사)  
 1977~1979 : 미국 The Catholic Univ. of America(Research  
 Associate)  
 1980~1982 : 미국 Cornell대학(Sesearch Associate)  
 1982~1984 : 미국 Rensselaer Polytechnic Institute(Research  
 Associate)  
 1984~1985 : 경북대학교 전자공학과 초빙교수  
 1985~현재 : 한국전자통신연구소 화합물반도체연구부 연구위원

\*朴 孝 勳 전자통신 제11권 4호 p. 97참조