

# Semi-Insulating GaAs의 재료특성과 응용

姜 光 男

(韓國科學技術院 半導體材料研究室)

■ 차

례 ■

- |                                |                   |
|--------------------------------|-------------------|
| 1. 머릿 말                        | 4. FA-PME Effect  |
| 2. SI GaAs 단결정의 제조와 Deep Level | 5. SI GaAs 기관의 응용 |
| 3. SI GaAs의 전기적특성              | 6. 맺는 말           |

## 1 머릿 말

최근 눈부신 발전을 거듭하는 반도체산업은 실리콘계 소자 분야에만 국한된 것이 아니라 III-V 화합물 반도체 특히 GaAs 의 재료 및 소자 분야에서도 급격한 발전이 이루어 지고 있다. GaAs 는 실리콘에서 얻을 수 없는 여러 재료 특성-발광현상, 높은 mobility 등-을 보여 LED, laser diode, microwave 소자 및 고속논리회로등에 크게 응용되고 있다. 특히 단결정 제조 분야에서의 LEC (liquid-encapsulated czochralsky) 방법에 의한 고순도 원형 단결정의 제조는 지금껏 주로 이용되고 있는 HB (horizontal Bridgman) 방법에 의한 "D" 형 기관이 갖는 여러 난점을 해소하고 전도매체의 농도가 GaAs 의 intrinsic 농도에 가까운  $10^{17} \text{cm}^{-3}$  (비저항  $\rho \approx 10^8 \text{ohm-cm}$ ) 의 반결연성 (semi-insulating, SI) 기관의 대량생산을 가능케 하여 직접 이온주입에 의한 각종 논리회로의 제조연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>1)</sup> 또한 GaAs 내의 높은 전자 mobility ( $\mu_n \approx 8,500 \text{cm}^2/\text{v.s}$ ,  $T = 300 \text{K}$ : 참고 Si에서  $\mu_n \approx 1500 \text{cm}^2/\text{v.s}$ )를 이용, 고집적화에 따른 gate 수의 증가에 대비한 access 시간을 최소화하려는 노력에 따라 HEMT (high electron mobility transistor)의 제조기술 연구가 미국, 일본, 프랑스등에서 활발히 진행되고 있다.<sup>2)</sup>

SI GaAs 는 위와같이 여러 소자들의 출발재 료로써 제조기술 및 특성의 조사가 지난 20여년간 활발히 이루어져 왔으나 가장 기본적인 전기적 특성에 관한 연구결과는 희소한 상태이다. 특히 높은 비저항과 mixed conduction에 의한 미지 parameter 수의 증가는 실온에서의 전기적 특성 (전자 및 정공의 농도와 mobility 등) 연구에 많은 어려움을 보이고 있다.

이 글에서는 SI GaAs 의 제조방법 및 전도매체들의 깊은 에너지위치 (deep level)에 의한 상쇄현상 (compensation)을 간략히 설명한 후 넓은 자장 영역 ( $B = 0 \sim 13 \text{T}$ )에서의 Hall 효과 및 magnetoresistance (MR)에 의한 전기적 특성 연구방법을 설명하고, 전도매체의 재결합 현상을 연구할 수 있는 일반화 PME 효과 (FA-PME)에 대해 기술한 후 SI GaAs 기관의 응용에 대해 간략히 기술하였다.

## 2 SI GaAs 단결정의 제조와 Deep Level

GaAs 단결정의 제조방법은 주로 horizontal bridgman (HB) 방법과 liquid encapsulated czochralsky (LEC) 방법의 두가지이다.

HB 방법은 봉합된 석영관 내부의 한쪽에 종자결정과 Ga 을 두고 GaAs 의 용융점인  $1235^\circ\text{C}$ 로 유지하며 한쪽에 As 를 두어 약  $614^\circ\text{C}$ 로 유지(이 경

우 As 의 증기압은 약 1 기압) 한다. 합성된 결정의 stoichiometry 는 전기로 온도의 정밀제어나 기화된 As 의 양까지 고려한 Ga 과 As 의 정밀 칭량으로 결정한다. Ga 과 As 의 합성이 끝나면 증자결정으로 부터 서서히 냉각시켜 (전기로의 이동에 의해) 단결정-용융액 경계면이 약 0.1~2 cm/hr로 이용되게 한다. 이 방법으로 약 3kg 까지의 단결정을 제조할 수 있으며 제조된 기판은 "D" 형이다. 이와같이 제조된 단결정의 주요 불순물은 출발 물질인 Ga 과 As 에 이미 존재하던 불순물과 석영관으로 부터의 실리콘 및 진공 pump 용의 기름등으로 부터의 탄소등이다. 특히 Si 은 단결정 제조시 첨가된 산소에 의해 현저히 감소한다. 이 방법으로 제조된 현재까지의 가장 좋은 결과는 O<sub>2</sub> 가 첨가된 결정에서 Hall mobility 가 약 8000 cm<sup>2</sup>/V.s, n = 2~4 × 10<sup>15</sup> cm<sup>-3</sup> 이다.

LEC 방법은 휘발성이 큰 성분을 갖는 화합물 반도체의 제조에 매우 유용하다. 원리는 용융된 Ga As 를 역시 용융된 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 로 약 2cm 정도 덮어 As 의 휘발을 방지하며 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 뚜껑을 통하여 단결정을 성장시키는 것이다. 성장속도는 보통, GaAs 가 용해율이 크고 열전도가 나빠, 시간당 약 0.1~0.5 inch 정도이다. 도가니속에 채워질 Ga As 는 이미 제조된 단결정을 사용하거나 장치내부에서 직접 합성시키며, 후자의 쪽이 고순도 결정을 얻는데 유리하다. 용융액의 온도는 통상 ± 0.5 °C 이내로 제어되고, 장치 내부의 N<sub>2</sub> 압력을 약 2 기압 정도로 유지함으로써 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 층을 통한 As 의 손실을 방지한다. 용융액 도가니는 PBN (pyrolytic boron nitride), 석영등이 사용되나 PBN 이 고순도 결정제조에 가장 양호하다. 한편 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 의 질이 제조된 단결정의 특성에 크게 영향을 미치므로 결정제조전에 반드시 건조 및 배기가 필요하다. 이 방법으로 대단히 큰 (6kg 이상) 단결정을 제조할 수 있으며 제조된 기판은 실리콘과 같이 원형이나 결정내부의 dislocation 농도가 큰 것이 흠이다. (10<sup>4</sup>~10<sup>6</sup> cm<sup>-2</sup>) 전기적 특성은 반절연성의 경우 μn = 7000 cm<sup>2</sup>/V.s, conducting 의 경우 ≈ 6300 cm<sup>2</sup>/V.s 이다.

이와 같은 방법으로 Ga As 를 제조할 때 Cr 을 불순물로서 첨가하거나 초고순도의 GaAs 를 제조하면 반절연성 (SI) Ga As 가 얻어진다. SI Ga As 내의 깊은 에너지 레벨들은 DLTS (deep level transient spectroscopy), OTCS (optical transient current spectroscopy) 등의 방법으로 연구되어 진다. 이 방법들에 의해 발견된 깊은 에너지 위치들은 전자 trap

으로 작용하는 deep donor 와 정공 trap 으로 작용하는 deep acceptor 의 두가지로 크게 나누어지고 지금까지 각각 17<sup>31)</sup>, 12<sup>41)</sup> 정도가 보고되어 있다.

이들중 SI Ga As 에서 가장 흔히 관측되는 것이 donor 로 작용하는 EL2 와 Cr 에 의해 만들어진 acceptor level 이다. EL2 는 종래 결정제조시 첨가된 산소에 의해 생성된 것으로 간주되었으나 최근의 연구결과 antisite 형태의 결정결함에 의해 생성되었음이 밝혀졌고<sup>5)</sup>, 그 농도는 약 5 × 10<sup>15</sup>~3 × 10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup> 정도이다. Cr 은 GaAs 결정내의 Ga 자리에 치환되어 (Cr Ga) 있으며 가장 확률이 큰 반응은 Cr<sup>3+</sup> ↔ Cr<sup>2+</sup> 으로 Cr<sup>3+</sup> 가 결정내에서 중성상태이고 약 2 × 10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup> 까지 첨가시킬 수 있다.

이 두 에너지의 위치는 금지대내의 중심부 부근에 있고 아래와 같이 표시된다.<sup>6)</sup>

$$E(EL2) = -0.759 + 2.37 \times 10^{-4} T \quad (2-1)$$

[eV]

$$E(Cr) = 0.81 - \frac{3 \times 10^{-4} T}{T + 204} + kT \ln(0.93) \quad (2-2)$$

[eV]

여기서 EL2 는 E<sub>c</sub> 로 부터, E(Cr) 은 E<sub>v</sub> 로 부터 표시된 값이다.

### 3) SI GaAs 의 전기적 특성

Ga As 의 intrinsic 전도매체 농도는 n<sub>i</sub> = 2.1 × 10<sup>6</sup> cm<sup>-3</sup> (T=300K<sup>71)</sup>) 으로서 Si 이나 Ge 에 비해 매우 낮으나 통상의 HB 방법으로는 실현되기 어려우며, LEC 방법의 초고순도 결정에서 또는 에너지 금지대내의 깊은 에너지 위치를 갖는 천이금속류 (예 Cr) 를 첨가함으로써 전도매체의 상채현상 (compensation) 에 의해 얻을 수 있다. 이와 같은 현상은 진형에서 이미 설명된 두개의 깊은 에너지 위치, deep donor 및 acceptor (농도 N<sub>DD</sub>, N<sub>AA</sub>), 와 두개의 얇은 에너지 위치, shallow donor 및 acceptor (농도 N<sub>D</sub>, N<sub>A</sub>), 를 가정한 4-level 모델에 의해 쉽게 이해될 수 있다.<sup>8)</sup> 이 경우의 전기적 중성조건 (charge neutrality) 은 아래와 같이 표시된다.

$$n + N_A^- + N_{AA}^- = p + N_D^+ + N_{DD}^+ \quad (3.1)$$

이온화된 각 에너지 위치들의 농도는 Fermi 위치 E<sub>F</sub> 와 Fermi-Dirac 의 통계에 의해 결정되며, 각 불순물들의 농도 및 위치들이 주어지면 (참고 2.1 과 2.2) E<sub>F</sub> 가 결정되고 따라서 전자 및 정공의 농도 (n, p) 가 주어진다. 그림 1 은 두개의 깊은 에너지

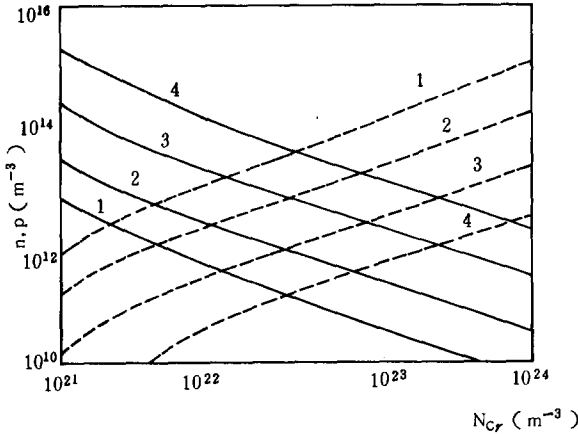


그림 1. Deep Impurities 에 따른 전도매체의 농도 (T = 300 K) n(— ---), N<sub>DD</sub> = 10<sup>21</sup> m<sup>-3</sup> (1), 10<sup>22</sup> m<sup>-3</sup> (2), 10<sup>23</sup> m<sup>-3</sup> (3), 10<sup>24</sup> m<sup>-3</sup> (4); N<sub>D</sub> = 10<sup>21</sup> m<sup>-3</sup>, K = N<sub>A</sub>/N<sub>D</sub> = 0.5, N<sub>AA</sub> 는 N<sub>Cr</sub> 으로 가정하였음.

위치를 SI Ga As 내에서 가장 흔히 관찰되는 EL 2 와 Cr<sup>2+</sup> ⇌ Cr<sup>3+</sup> 로 가정하고 계산된 결과를 보이고 있다. 예상된 바와 같이 n 및 p 는 n<sub>i</sub> 값에 가까운 값이고 N<sub>AA</sub> 및 N<sub>DD</sub> 의 값에 따라 n 또는 p 형으로 전환될 수 있음이 관찰된다.

SI Ga As에서의 Hall 효과 및 전기전도도는 일반적으로 전자 및 정공이 모두 전도현상에 기여하는바, 단순한 형태로 표시되지 않는다. 보통의 실험조건인 낮은 자장(μ<sup>2</sup>B<sup>2</sup> ≪ 1)에서의 Hall mobility와 magnetoresistance는 mixed conduction과 전도매체의 산란효과에 의한 두가지의 기여를 가지며, 각 전도매체의 mobility (μ<sub>p</sub>, μ<sub>n</sub>) 및 매체농도(p, n)와 산란기구에 대한 지식이 측정된 결과의 해석에 필요하다.<sup>9)</sup> 통상, 산란효과를 무시하고(경우에 따라, 예컨대 extrinsic 재료에서, 이 항목이 mixed conduction에 의한 기여보다 클 수도 있거나) 실험결과를 해석한다 하여도 미지의 재료 parameter가 extrinsic의 경우보다 두배 증가하여 실질적인 결과해석의 어려움이 따른다.

한편 넓은 영역의 자장에서 (예컨대 B = 0 ~ 13T, 이 경우 자장에 의한 Landau level의 분리는 20meV 미만이며 SI Ga As내의 Fermi 위치는 금지대내의 중간위치에 있으므로 무시할 수 있음) Hall 효과와 magnetoresistance를 측정하면 각 전도매체의 산란효과가 무시되어 질 수 있고<sup>10)</sup>, 아래와 같이 표시된다.

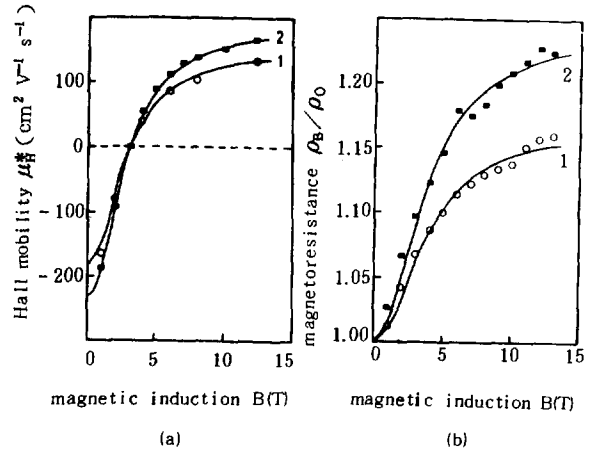


그림 2. 자장에 따른 ambipolar mobility μ<sub>H</sub><sup>\*</sup> 와 magnetoresistance 의 변화(T = 285 K)

$$\mu_H^* = \frac{(p_o \mu_{pB} \mu_{Hp} - n_o \mu_{nB} \mu_{Hn})}{(p_o \mu_{pB} + n_o \mu_{nB})} \quad (3.2)$$

$$\frac{\rho_B}{\rho_o} = \frac{(p_o \mu_{p_o} + n_o \mu_{n_o})}{(p_o \mu_{pB} + n_o \mu_{nB})} \frac{1}{(1 + \mu_H^{*2} B^2)} \quad (3.3)$$

여기서 각 mobility 들은 자장의 함수로, 넓은 자장의 경우 아래와 같이 간단하게 표시되어 질 수 있다.

$$\mu_{p,nB} = \mu_{p,n_o} / (1 + \mu_{p,n}^2 B^2) \quad (3.4)$$

이와 같은 방법으로 측정된 SI Ga As의 μ<sub>H</sub><sup>\*</sup> 와 ρ<sub>B</sub>/ρ<sub>o</sub>가 그림 2에 나타나 있다. 사용된 시료는 Cr이 첨가된(100)기판으로 두께 350 μm, 5mm×5mm의 Van der Pauw형이고, 5N의 In 전극을 갖고 있다. 이 두 실험결과를 위의 표현식으로 curve fitting하여 얻어진 SI GaAs의 재료 parameter가 아래의 표에 나타나 있다.

표 1. SI GaAs의 재료특성(T = 285K)

	mobility (cm <sup>2</sup> /v s)		concentration(cm <sup>-3</sup> )		
	μ <sub>n0</sub>	μ <sub>p0</sub>	n <sub>o</sub>	p <sub>o</sub>	n <sub>i</sub>
No. 1	3,300	190	6.1×10 <sup>4</sup>	9.3×10 <sup>6</sup>	7.5×10 <sup>6</sup>
No. 2	3,440	250	7.6×10 <sup>4</sup>	7.2×10 <sup>6</sup>	7.5×10 <sup>6</sup>

이와같은 방법의 특징은 흔히 낮은 자장에서 측정된 결과의 해석에서 처럼 mobility의 비  $b = \mu_{n0} / \mu_{p0}$ 를 가정하지 아니하고 직접  $\mu_{n0}$ 와  $\mu_{p0}$ 를 결정할 수 있음이다. (보통 mobility의 비를 15로 가정한 연구발표가 많다<sup>11)</sup>) 위의 경우  $b = 14 \sim 17$ 로써 지금까지 가정된 값의 실험적인 확인을 주고 있다. 아울러 결정된 intrinsic 매체 농도는 측정온도에 대한 보정을 감안하면 최근 발표된 이론적인 값에 매우 잘 일치하고 있다.<sup>7)</sup>

Van der Pauw방법은 지금까지 대단히 유용한 것으로 이해되어 왔으나 magnetoresistance가 큰 시료들에 대해서는 Hall 전압의 측정시 MR에 대한 보정이 필요하다. 일반적으로 두개의 non-consecutive 전극에 전류  $I$ 를 흘리면 나머지 두전극에서의 전압은 Hall 전압  $V_H$ 와 MR의 성분으로 표시된다.<sup>12)</sup>

$$V_{13}(B) = V_H(I, B) + (\rho_B / \rho_0) V_{13}(0)$$

따라서 MR이  $V_H$ 에 비해 큰 경우 재래의 방법에 의한 Hall 전압의 측정온도 옳지 않게 되며, 두방향의 자장에 대해 적절한 평균값을 취해야 되고, 이 경우 Hall 전압뿐만 아니라 MR( $\rho_B / \rho_0$ )도 동시에 얻을 수 있다.

#### 4 FA-PME Effect

Photomagneto-electric(PME)효과는 반도체내의 재결합현상의 연구에 매우 유용하다. PME 효과는 1934년  $\text{Cu}_2\text{O}$ 에서 발견된 이래<sup>13)</sup> Aigrain과 Bulliard<sup>14)</sup> 및 Van Roosbroeck<sup>15)</sup>에 의해 이론적인 model이 정립되고 시료의 이방성<sup>16)</sup>, trapping<sup>17)</sup>, transient 효과<sup>18)</sup>등에 응용되어 왔다. 이 현상의 주요 원리는 빛에 의해 생성된 전도매체들이 Lorentz 힘에 의해 편이되어 시료양단에 단락전류 또는 개방전압을 주는 것이다.

한편 magnetoconcentration(MC) 효과는 전극에서 주입된 전도매체들이 Lorentz 힘에 의해 표면 재결합 속도가 서로 다른 시료의 어느 한쪽 표면으로 이동하여 재결합함으로써 Lorentz 힘의 방향에 따라 전류-전압의 특성이 비대칭적 비선형화하는 현상이다. 이 현상은 Welker<sup>19)</sup>에 의해 제시 되었으며 InSb, Ge 및 PbSnTe<sup>20), 21)</sup> 등에서 연구되었었고, Hall 소자보다 감응도가 더 예민한 자장측정용 magnetodiode에 응용되어있다.<sup>22)</sup>

Field Assisted(FA)PME효과는 이 두현상의 결합으로, 특히 SI GaAs의 재결합 특성 연구에 유용

하였다. 이 현상의 원리는 빛에 의해 생성된 전도매체들의 농도구배와 생성된 평균 전도매체의 농도가 Lorentz힘과 방향에 의해 크게 변화하며 이 결과 고전적 PEM효과로써 단락전류의 변화뿐만 아니라 비직선성 전류-전압의 관계를 보이고, 이 현상을 이용한 표면 및 체적 재결합 특성을 연구할 수 있다.

FA-PME 효과의 일반적인 model은 균일하고 등방성이며 전장의 방향으로 긴 직 6면체 반도체 시료를 가정한다. (그림 3의 삽입도 참조). 전장( $E_x$ )과 자장방향( $B_z$ )에 수직인 방향( $y$ )으로 빛을 쬐이면 시료내부의 전류밀도는 열평행의 조건아래  $y$ 방향에만 의존하게되며 아래와 같이 표시된다.

$$\vec{J}_{n,p}(y) = (\sigma_n \vec{E} - e \beta \mu_{n,p} \vec{\nabla} n, p) + (\sigma_{n,p} \vec{E} - e \beta \mu_{n,p} \vec{\nabla} n, p) \times (\mu_H)_{n,p} \vec{B} \quad (4.1)$$

여기서  $n(y)$ ,  $p(y)$ 는 전도매체의 농도이고  $\sigma_{n,p}$ 는 전기전도도( $\sigma_{n,p} = en, p\mu_{n,p}$ )이며  $\beta \equiv kT/e$ ,  $\mu$ 와  $\mu_H$ 는 drift와 Hall mobility이다.

$y$ 방향으로 전류의 손실이 없다는 조건( $J_y \equiv 0$ )으로 부터 전장방향의 전류는 아래와 같이 전도 및 확산의 두 항으로 주어진다.<sup>23)</sup>

$$J_x(y) = J_c(y) + J_D(y) \\ = e(p\mu_p + n\mu_n)(1 + \mu_H^* B^2) E_x - kT \frac{\mu_p \mu_n (\mu_{Hp} + \mu_{Hn})}{(p\mu_p + n\mu_n)} B \frac{\partial}{\partial y} (pn) \quad (4.2)$$

여기서  $\mu_H^*$ 는 3절에서 주어진 mixed conduction의 Hall mobility이고(전도매체의 농도는 이 경우  $n = n_0 + \delta n$ ,  $p = p_0 + \delta p$ 이다),  $n$ 과  $p$ 는 steady state에서의 continuity에 의해 주어진다.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_{n,p} = \mp e(G - R) \quad (4.3)$$

여기서 전도매체의 생성율  $G$ 는 통상의 예와 같이 지수적이고( $G = \alpha I_0 e^{-\alpha y}$ ;  $\alpha$  = 흡수계수,  $I_0$  = 빛의 세기) 재결합율은 선형을 가정한다( $R_0 = \delta n / \tau_n = \delta p / \tau_p$ ,  $R_s = \tau_{1,2} \delta n(0, d)$ ;  $\tau$  = excess매체의 수명,  $\tau_{1,2}$  = 표면 재결합 속도임).

한편 SI GaAs에서의 excess 매체 농도는 각 깊은 에너지 위치의 서로 다른 trapping 효과에 의해 서로 다를 수 있으며(일반적으로  $\delta n \approx \delta p$ ) 통상의 실험조건이래에서는 아래의 관계가 성립한다.<sup>23)</sup>

$$n_0, p_0 \ll \delta n, \delta p \ll N_T \quad (4.4)$$

여기서  $N_T$ 는 재결합 중심의 농도이다. 연속방정식을

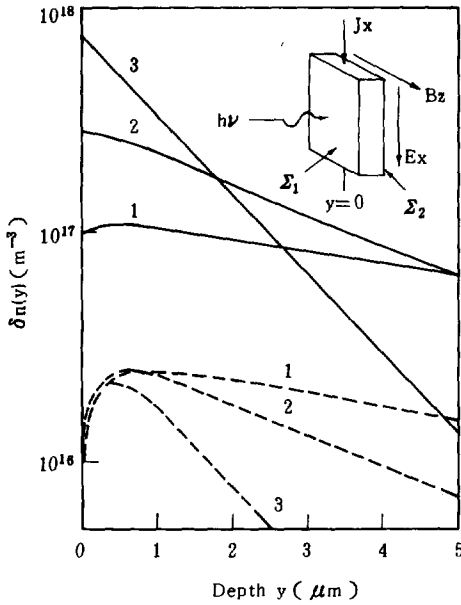


그림 3. Excess 매체농도구배  $\delta n(y)$ .  $I_0 = 10^{20} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $B = 1 \text{ T}$ ,  $\alpha = 8 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$ ,  $d = 350 \mu\text{m}$ ,  $\mu_{n0} = 0.335 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_{p0} = 0.021 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\Gamma = 1$ ,  $\tau_n = 10 \text{ ns}$ ,  $s_1 = 10 \text{ m/s}$  (—),  $10^3 \text{ m/s}$  (---), (1)  $E_x = -10^5 \text{ V/m}$ , (2)  $E_x = 0$ , (3)  $E_x = 10^5 \text{ V/m}$

선형화하기 위하여 trapping parameter를 아래와 같이 도입하면 :

$$\Gamma = \delta p / \delta n = \tau_p / \tau_n \quad (4.5)$$

excess 매체의 농도구배는 결국 적절한 경계조건을 설정하여 아래의 일반적인 모양을 갖게된다.<sup>23)</sup>

$$\delta n(y) = A_1 e^{\gamma L_1} + A_2 e^{-\gamma L_2} + A_3 e^{-\alpha y} \quad (4.6)$$

여기서  $A_1, A_2$  및  $A_3$ 는 관여된 여러 parameter들에 의해 결정되는 특성거리들에 의해 결정되는 계수이다. 대표적인 실험조건아래의 excess매체 농도구배가 그림-3에 나타나 있으며, Lorentz 힘의 크기와 방향에 따라 크게 변화함을 보인다. 시료의 두께 방향(y)에의 평균을 취하여 전류-전압 특성은 아래와 같이 결국 표시된다.

$$J_x = J_c + J_D \quad (4.7)$$

$$J_c = \Delta \sigma_B E_x = e (\Gamma \mu_p + \mu_n) (1 + \mu_H^* B^2) \langle \delta n \rangle E_x \quad (4.8)$$

$$J_D = e D^* (\mu_{Hp} + \mu_{Hn}) B \Delta n / d \quad (4.9)$$

$$\langle \delta n \rangle = \frac{1}{d} \int_0^d \delta n(y) dy \quad (4.10)$$

$$\Delta n = - \int_0^d \frac{\alpha}{\alpha y} \delta n(y) dy = \delta n(0) - \delta n(d) \quad (4.11)$$

위의 표현에서 SI GaAs의 특징인 (4.4)가 이용되었으며 ambipolar 확산계수  $D^*$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$D^* = (kT/e) 2 \Gamma \mu_p \mu_n / (\Gamma \mu_p + \mu_n) \quad (4.12)$$

이상의 해석은 통상의 시료두께 ( $d = 350 \mu\text{m}$ ) 가 GaAs내의 확산거리(수  $\mu_m$ )에 비해 매우 크기 때문에 (4.6)의 첫항이 생략될 수 있고, 대단히 간단해진다. 포함된 각 mobility는 3절에 이미 논의된 바와 같이 monokinetic가정에 의한 표현을 사용하여 기술된 여러 표현들을 일반화한 것들이다. 특히 외부 전장이 없을 때 ( $E_x = 0$ ) 확산전류  $J_D$  (4.9)는 고전적 PEM 효과를 나타내게 되고, 외부 전장이 매우 낮은 상태에서는 빛에 의해 생성된 전도매체들의 magnetoresistance를 얻을 수 있으며 ;

$$\frac{\rho_B}{\rho_0} = \frac{(J_c)_{B=0}}{(J_c - J_D)_B} = \frac{J_0}{J_B - J_{PME}} \quad (4.13)$$

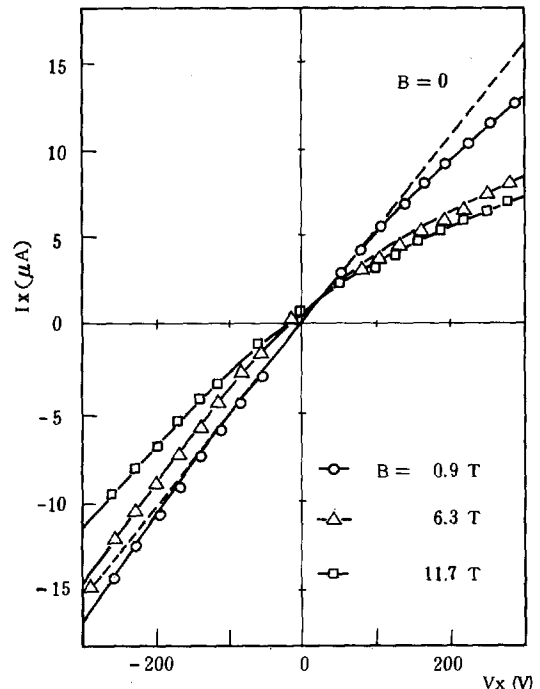


그림 4. FA-PME 효과의 전류-전압특성. 표면재결합속도  $s_1 = 300 \text{ m/s}$

trapping 계수  $\Gamma$ 에 대단히 민감한 양이다. 실제로 SI GaAs에서 측정된 MR은 대단히 큰 값을 보여 ( $B=10T$ 에서  $\rho_B/\rho_0 \geq 2$ ) 이 결과  $\Gamma$ 는 1에 가까운, 즉 mixed conduction의 결과를 예측하였다.<sup>24)</sup>

최종적으로 전류-전압의 특성은 (4.7)에 의해 나타난 바와 같이 비직선성이고(그림 4), 표면 재결합 속도가 커질수록 시료표면으로 편향된 전류의 포화가 빨라질 수 있었다. 한편 Lorentz 힘이 적은 경우 ( $E_x B$ 가 작은 경우;  $E_x$  또는  $B$ 가 적은 경우), (4.7)은 아래와 같은 근사식을 가지며 ;

$$J_x = (\Delta\sigma_B)_0 E_x - \tau_1 (\Delta\sigma_B)_0 E_x^2 B - \tau_3 J_{PME} (E_x B)^2 + \tau_2 J_{PME} E_x B + J_{PME} \quad (4.14)$$

$(\Delta\sigma_B)_0$ 는  $E_x B=0$  일 때를 표시한다. 이 표현은 측정된 전류가 Lorentz 힘의 방향에 따라 직선( $\sim E_x B$ ) 및 포물선형( $E_x^2 B$  또는  $E_x B^2$ )으로 분해될 수 있으며 그림 5에 그 예가 나타나 있다. 이와같이 전류-전압의 측정곡선을 조사함으로써 얻어진 재결합 관련 여러 parameter 들이 표 2에 수록되어 있다.

표 2. SI GaAs의 재결합관련 Parameter 들  
( $\mu_{n,p}$ : 표 1 참조, T = 296 K)

	$D_0^*(m^2/s)$	$L_0^*(\mu m)$	$\tau_n(ns)$	$\tau_p'(ns)$	$s_1(m/s)$
No. 2	$1.3 \times 10^{-3}$	1.7	2.2	2.0	300
No. 7	$9.5 \times 10^{-4}$	1.1	1.0	0.8	20,000

위에 나타난 두 시료는 각각 화학연마된 표면(표면재결합이 낮은, No 2)과 기계적으로 연마된(표면재결합이 큰, No.7) 것들이며, 각각 300 및 20,000  $m/s$ 의 표면재결합속도를 보여 실험조건과 잘 일치하고 있다. 특히 excess 매체의 수명( $\tau_n=1.0\sim 2.2 ns$ )는 이미 보고된 값( $0.5 ns^{17)}$  및  $3 ns^{25)}$ 에 잘 일치하며 trapping 계수는 언급된 바와 같이 1 부근의 값이었다.

3절에서 설명된 방법과 FA-PME 효과는 설명된 바와 같이 SI GaAs의 전기적 및 재결합 특성의 연구에 매우 효과적이었으며, 여타 재료들에 대해서도 응용될 것이 기대되어 진다.

### 5 SI GaAs 기관의 응용

SI GaAs를 이용한 각소자의 제조방법은 크게 두 가지로 나뉜다. 주로 logic 소자 및 IC의 제조에는 SI GaAs에 직접 이온주입(흔히 multiple localized ion implantation)을 하여 필요한 active layer 및  $n^+$ 층을 얻는 방법이 있고, SI GaAs 위에 MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) 또는 VPE (Vapor Phase Epitaxy)에 의해 고저항의 buffer 층과 active layer를 제조한 후 소자를 제조하는 두가지 방법이다. 어느 방법을 이용하더라도 초고주파용 및 고속논리스소자를 위해  $1\mu m$  또는 그 이하의 크기를 갖는 gate의 제조기술이 필요하다. 이와 같은 미세구조는 E-beam, x-ray 또는 deep UV 등을 이용하며 gate metal angle shadow-deposition<sup>27)</sup> 등의 방법과 아울러 현재  $0.2 \mu m$  정도의 gate 크기를 갖는 소자제조기술이 다수 발표되어 있다.

Buffer layer는 SI GaAs와 active layer 사이에  $2\sim 3 \mu m$ 의 두께로 약  $10^{14} cm^{-3}$ 의 고순도 GaAs층이나  $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ 와 같이 GaAs보다 금지대가 큰것을 이용하기도 한다.<sup>28)</sup> Buffer layer가 있는 경우 active layer 내의 mobility 분포가 비교적 균일하나

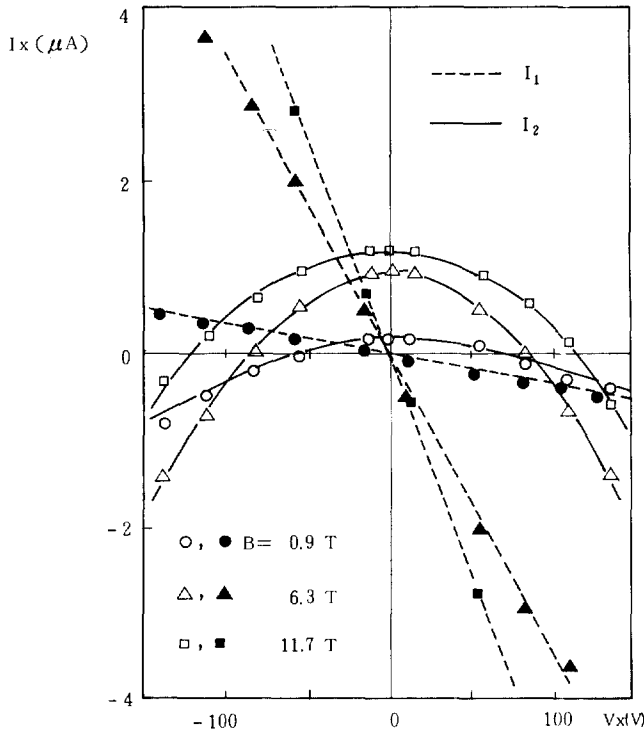


그림 5. FA-PME 효과의 두 전류성분.

$$I_{1,2} = 1/2 [ I_x(B) \pm I_x(-B) ]$$

그렇지 않은 경우 active layer - SI GaAs 경계면에서 급격히 감소하여 소자특성 크게 감소시킨다.<sup>29)</sup>

Active layer는 통상  $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  정도의 매체농도에 0.2  $\mu\text{m}$  정도의 두께를 가지며 그 위에 다시 ohmic 전극용  $n^+$  층( $10^{18} \text{cm}^{-3}$  또는 그 이상) 갖고 있다.

전극재료로서 ohmic 전극은 통상 Au/Ge(12%)와 Ni을 함께 사용하며 gate 용으로는 Al, Ti/W, Pt/Ti/Au 등이 사용된다.

직접 이온주입에 의한 각 논리회로의 제조는 SAINT 방법(Self aligned implantation for  $n^+$  - layer technology)과 아울러 0.1  $\mu\text{m}$ 의 gate 크기까지 제조가능한 것이 보고되어 있고<sup>30)</sup> liftoff 방법과 함께 널리 사용되고 있다.

### ㉔ 맺는 말

SI GaAs 기관의 전기적 특성, 특히 저온에서의 특성과 scattering 현상에 대한 이해 및 고온처리시의 특성변화등이 앞으로 연구되어야 할 문제들로 남아 있다. 아울러 단결정 제조시의 결정결함을 감소시키고 결정내 불순물의 제거가 기술상의 문제로 앞으로 더 개선되어야 할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

- 1) 大林道夫; 電子林料 84年 1月, p. 47
- 2) 安部正幸; 電子林料 84年 1月, p. 42
- 3) G. M. Martin et al; Electron. Lett. **13**, p. 191 (1977)
- 4) A. Mitonneau et al; Electron. Lett. **13**, p. 666 (1977)
- 5) J. Lagowski et al; "Semi-Insulating III-V materials (Evian, 1982)", p154 (Shiva, Nantwich)
- 6) G. M. Martin et al; J. Appl. Phys, **51**(5), p.2840 (1980)
- 7) J. S. Blakemore; J. Appl. Phys. **53**, p. 520 (1982)

- 8) P. F. Lindquist; J. Appl. Phys. **48**, 1262 (1977)
- 9) J. Betko & K. Merinsky; J. Appl. Phys. **50**, 4212 (1979)
- 10) S. Cristoloveanu; Thesis INPG (1981, France)
- 11) D. C. Look; "Semi-Insulating III-V Materials (Nottingham, 1980)", p. 183 (Shiva, Orphington)
- 12) D. Marion, S. Cristoloveanu and A. Chovet; IEE Proc. **129**(part 1), p. 125 (1982)
- 13) K. Kikoin and M. M. Noskov; Phys. Z. Sowjetunion **5**, p. 586 (1934)
- 14) P. Aigrain and M. Bulliard; C. R. Acad. Sci., Paris, **236**, p. 595 (1953)
- 15) W. Van Roosbroeck; Phys. Rev. **101**, p. 1713 (1956)
- 16) F. Adduci, L. Baldassarre and a. Minafra; J. Appl. Phys, **49**, p. 6178 (1978)
- 17) S. S. Li and C. I. Hung; J. Appl. Phys, **43**, 1757 (1972)
- 18) R. H. Moyer et al; Appl. Phys. Lett. **39**, p. 266 (1981)
- 19) H. Welker; Z. Naturf. **6a**, p. 184 (1954)
- 20) S. Cristoloveanu and J. H. Lee; J. Phys. C: Solid State Phys, **13**, p. 5983 (1980)
- 21) S. Cristoloveanu et al; ibid **16**, p. 927 (1983)
- 22) S. Cristoloveanu et al; Phys. Stat. Sol. (a) **76**, K43 (1983)
- 23) K. N. Kang; Thesis, ENSERG-INPG (1983, France)
- 24) S. Cristoloveanu and K. N. Kang; J. Phys. C: Solid State Phys. **17**, p. 699 (1984)
- 25) D. C. Look; Phys. Rev. **B16**, p. 5460 (1977)
- 26) Bryant M. Welch et al; IEEE **ED-27**, p. 1116(1980)
- 27) P. C. Chao et al; IEEE **EDL-4**(4), p. 122 (1983)
- 28) C. L. GHOSH and R. L. Layman; ibid **EDL-5**(1), p. 3 (1984)
- 29) T. M. Nosaki; Inst. Phys. Conf. Ser. No 24, Chapt. **2**, p. 46 (1975)
- 30) N. Kato et al; IEEE. **EDL-4** (11), p. 147 (1983)