

In_{0.53}(Al_xGa_{1-x})_{0.47}As의 전자와 정공 이동도의 실험식 추출

논문
9-6-4

Extraction of Empirical Formulas for Electron and Hole Mobility in In_{0.53}(Al_xGa_{1-x})_{0.47}As

이 경 략* 황 성 범** 송 정 근*

(Kyung-Rak Lee, Sung-Bum Hwang, Chung-Kun Song)

Abstract

We calculated the drift-velocities of electrons and holes of In_{0.53}(Al_xGa_{1-x})_{0.47}As, which is used for semiconductor materials of high performance HBTs, along with the various doping concentrations and Al mole fractions as well as the electric fields by Monte Carlo experiment. Especially, for the valence bands the accuracy of hole drift velocity was improved in the consideration of intervalley scattering due to the inelastic scattering of acoustic phonon. From the results the empirical formulas of the low- and high-field mobility of electrons and holes were extracted by using nonlinear least square fitting method. The accuracy of the formulas was proved by comparing the formula of low-field electron mobility as well as drift velocity of In_{0.53}Ga_{0.47}As and of low field hole mobility of GaAs with the measured values, where the error was below 10%. For the high field mobilities of electron and hole the results calculated by the formulas were very well matched with the MC experimental results except at the narrow field range where the electrons produced the velocity overshoot and the corresponding error was about 30%.

Key Words(중요용어): Monte Carlo(몬테 카를로), mobility(이동도), InGaAs(인듐갈리움비소)

1. 서 론

최근 InGaAs 반도체를 HBT (Hetero junction Bipolar Transistor)의 베이스 재료로 사용하여 차단 주파수를 향상시키는 연구들이 많이 수행되고 있다^{1,2)}. InGaAs는 전자의 이동도가 높고 전자의 접촉저항이 작기 때문에 HBT에서 베이스 재료로 사용하면 차단 주파수를 향상시킬 수 있고, 초미세 소자로 scaling이 가능하며 전력소모를 줄일 수 있는 장점이 있다³⁾. InGaAs 베이스에 대한 에미터로서 InAlAs와 InP를 주로 사용하는데, 이 경우 큰 전도대 불연속 에너지 (ΔE_c)를 갖는 InAlAs ($\Delta E_c=0.5eV$) 에미터가 높은 에너지의 전자들을 주입하여 베이스와 콜렉터 영역을 빠른 속도로 통과하므로써 InP ($\Delta E_c=0.36eV$) 에미터보다 차단 주파수를 증가시킬 것으로 예상되었지만 결과는 오히려 감소하였다⁴⁾. 이것은 에미터에서 베이스로 주입된 전자의 에너지가 너무 클 경우 높은 전계

가 형성되어 있는 베이스 콜렉터 공간전하영역을 통과하는 동안에 가속되어 에너지가 증가하므로써 전도대의 L_1 계곡에서 L_2 계곡으로 쉽게 천이하여 속도가 오히려 감소하기 때문이다. 따라서, 차단 주파수를 향상시킬 수 있는 최적의 전도대 불연속-에너지의 크기가 있을 것으로 예상되어, 필자는 전도대 불연속 에너지를 변화시킬 수 있는 In_{0.53}(Al_xGa_{1-x})_{0.47}As를 에미터로 사용하여 Al분비를 변화시킴으로써 차단주파수에 미치는 전도대 불연속-에너지의 영향을 몬테 카를로 (MC) 실험으로 분석하고, 차단 주파수를 향상시키기 위한 소자의 구조를 설계하고 있다. 본 논문에서는 이러한 설계에 필요한 In_{0.53}(Al_xGa_{1-x})_{0.47}As의 전자와 정공의 표층 속도를 MC 실험으로 계산하고, 그 결과로부터 비선형 최소제곱적합을 사용하여 이동도의 실험식을 추출하였다.

2. In_{0.53}(Al_xGa_{1-x})_{0.47}As의 물성 파라미터

4원소 화합물의 MC 시뮬레이션에 필요한 전도대와 가전자대의 각종 물성 파라미터들은 이미 알려져있는 2원소 화합물 즉 GaAs, InAs, AlAs의

* : 동아대학교 전자공학과
** : 경남전문대 전자통신과
접수일자 : 1996년 4월 20일
심사완료 : 1996년 6월 19일

물성 파라미터^{4,6)}로부터 내삽법으로 계산된 근사값을 사용하였다. 에너지갭을 제외한 물성 파라미터들은 선형 내삽에 의한 식(1)의 근사식을 사용하였고, 에너지갭은 bowing 상수를 고려한 식(2)의 근사식을 사용하였다. 식(1)에서 P는 물성 파라미터이고, X와 Y는 몰비이다. 식(2)에서의 bowing 상수는 표1에 정리하였다.

$$P_{Ay(BxCl_x)1-yD} = P_{AD} \cdot Y + [P_{BD} \cdot X + P_{CD} \cdot (1-X)] \times (1-Y) \quad (1)$$

$$E_{Ay(BxCl_x)1-yD} = E_{AD} \cdot Y + [E_{BD} \cdot X + E_{CD} \cdot (1-X)] \times (1-Y) - C_{ABCD} \cdot Y \cdot (1-Y) \quad (2)$$

표 1. bowing 상수⁵⁾.

Table 1. bowing constants⁵⁾.

C _{ABCD}	C _r	0.44 (for Al, X=0) 0.54 (for Al, X=1)
	C _l	1.10
	C _x	2.0

In_{0.53}(Al_xGa_{1-x})_{0.47}As는 InP 기판의 격자상수 a=5.8676 Å와 일치하며 In_{0.53}Ga_{0.47}As (x=0)의 에너지갭 E_G=0.7505 eV 에서 In_{0.53}Al_{0.47}As (x=1)의 에너지갭 E_G=1.4747 eV 까지 Al 몰비에 따라 에너지갭을 0.7242 eV 변화시킬 수 있고, 모든 몰비에 대하여 직접밴드의 구조를 갖는다.

MC 실험의 결과는 사용하는 유효질량의 크기에 많이 좌우되었다. 본 논문에서는 상태밀도 유효질량(density of states effective mass)을 사용하였고, 그 결과는 측정치와 잘 일치하였다.

3. 산란기구

화합물 반도체의 전도대는 Γ, L, X 계곡으로 구성되어 있기 때문에 전자의 산란기구로서 각 계곡에서의 polar optical phonon, nonpolar optical phonon, acoustic phonon, plasma와 ionized impurity 그리고 intervalley (Γ↔L, Γ↔X, L↔X) 산란등을 고려하였다⁷⁾. 가전자대는 heavy hole band와 light hole band로 구성되어 있고, 두 밴드가 K=0 에서 축퇴(degenerate)되어 있기 때문에 계산과정에서 복잡성을 피하기 위해서 일반적으로 하나의 포물선 밴드를 가정하고 유효질량은 두 밴드의 평균 유효질량을 사용하여 근사적으로 계산한다. 그러나, 본 논문에서는 각 밴드마다 전도대와 마찬가지로 위와 같은 산란기구들을 별도로 고려하고, 특히 두 밴드가 축퇴되어 있으므로

acoustic phonon 산란에 의한 작은 에너지의 교환에 의해서도 두 밴드간 천이가 발생할 수 있기 때문에 acoustic phonon의 비탄성 충돌(acoustic phonon 에너지의 흡수와 방출)에 의한 밴드간 천이율을 고려하였다⁸⁾. In_{0.53}(Al_xGa_{1-x})_{0.47}As의 Al 몰비 x=0.3일 때 가전자대의 정공의 에너지에 대하여 acoustic phonon 산란에 의한 밴드간 천이율을 그림 1에 나타내었다. 그림에서 보듯이 정공의 에너지에 대하여 밴드간 천이율이 큰 차이를 보여주므로, 정확한 정공 이동도를 계산하기 위해서는 밴드간 천이율을 고려해야 한다.

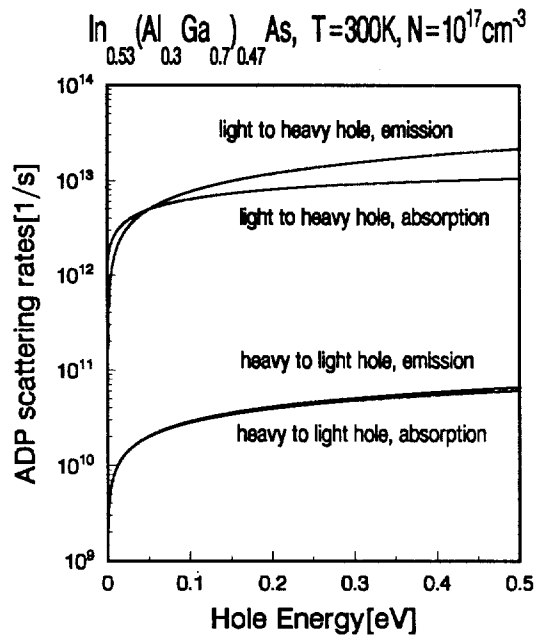


그림 1. In_{0.53}(Al_xGa_{1-x})_{0.47}As의 x=0.3일 때 비탄성 acoustic phonon 산란에 의한 heavy와 light 밴드 사이의 천이율.

Fig. 1. Transition rate between heavy and light band due to the inelastic acoustic phonon scattering for x=0.3 of In_{0.53}(Al_xGa_{1-x})_{0.47}As.

Al 몰비에 대한 전전계 이동도의 실험식은 식(4)와 같이 x=0 인 In_{0.53}Al_{0.47}As의 이동도의 실험식을 선형내삽하여 구하였다.

$$\mu_L(x, N) = \mu_L(0, N) \times (1-x) + \mu_L(1, N) \times x \quad (4)$$

이렇게 추출한 실험식과 MC 실험 결과를 그림 3에서 비교하였고, 모든 도핑농도와 몰비에 대하여 두 결과가 잘 일치함을 볼 수 있다.

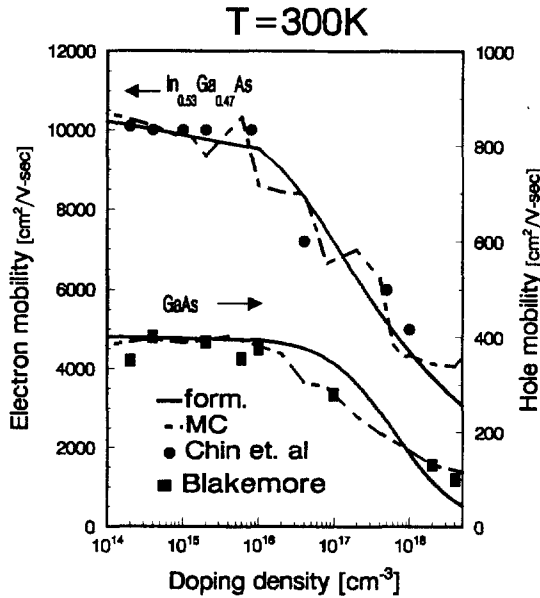


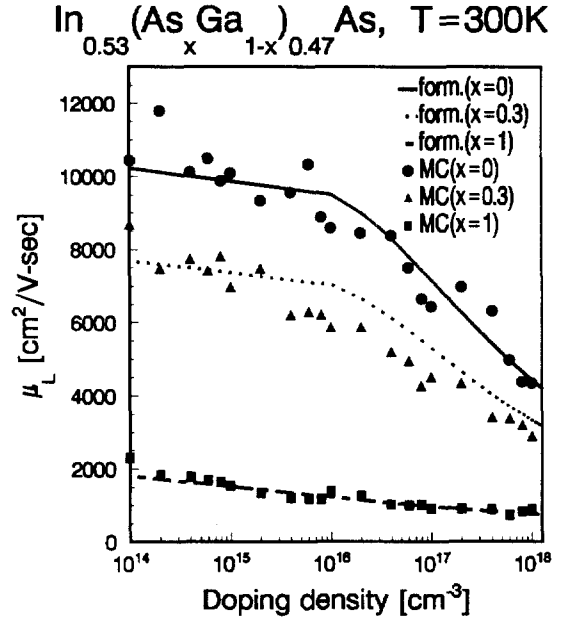
그림. 2. $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 의 저전계 전자 이동도의 MC 실험 결과와 실험식을 측정값⁹¹⁾ 및 GaAs의 저전계 정공 이동도의 MC 실험 결과와 Blakemore 실험식¹⁰⁾ 과 측정값¹⁰⁾의 비교.

Fig. 2. Comparison of the MC results and empirical formulas of low field electron mobility with the measured values⁹¹⁾ of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, the MC results of low-field hole mobility with the empirical formulas¹⁰⁾ and measured values¹⁰⁾ of GaAs.

고전계 상태에서 전자와 정공의 표동속도는 전계에 대하여 서로 다른 형태를 보여준다. 전자는 계곡간 천이에 의해서 속도-오버슈트가 발생하였다. $\text{In}_{0.53}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.47}\text{As}$ 의 전자 표동속도의 MC 실험 결과와 측정값을 그림 4a)에서 비교하였고^{11,12)} 저전계와 고전계 영역에서 두 결과가 잘 일치함을 볼 수 있다.

4. 전자와 정공 이동도의 실험식 추출과 결과

먼저 MC 방식으로 특정 도핑농도 $N=N_D+N_A$ 에서 저전계 상태의 전자와 정공의 표동속도를 계산하고, 그 기울기 $\mu_L = v/\epsilon$ 로부터 저전계 이동도를 도출하였다. 그리고, 이와 같은 과정을 도핑농도를 변화시키면서 반복하여 도핑농도에 대한 저전계 이동도 관계 그래프를 구하고, 이 관계 그래프와 근사식(3)을 비선형 최소제곱적합 과정을 거



$\text{In}_{0.53}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.47}\text{As}$, $T=300\text{K}$

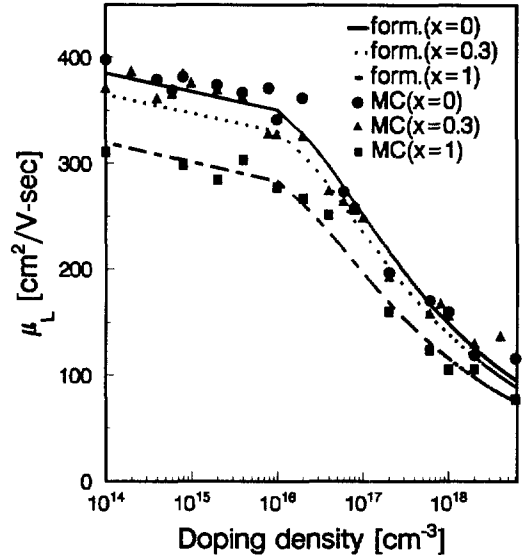


그림 3. $\text{In}_{0.53}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.47}\text{As}$ 에서 도핑농도 N 과 Al 물비 x 에 대한 a)와 b)정공의 저전계 이동도의 실험식과 MC 실험 결과와의 비교

Fig. 3. Comparison of a) the empirical formulas of low-field electron mobility and b) of low-field hole mobility with MC results for N (doping concentration) and x (Al mole fraction) of $\text{In}_{0.53}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.47}\text{As}$.

쳐서 오차를 최소화하는 실험식의 파라미터들을

추출하였다. 도핑농도에 대한 전자와 정공의 저전계 이동도 실험식(3)의 파라미터들을 표2에 정리하였다.

전자와 정공의 저전계 이동도의 실험식:

$$\mu_{L(N)} = \frac{A}{[1 + B \cdot N]^\alpha} \quad (3)$$

표 2. 도핑농도에 대한 전자와 정공의 저전계 이동도 실험식의 파라미터

Table 2. Parameters of empirical formulas of electron and hole low-field mobility for the various doping concentration.

	전자		정공	
	In _{0.53} Ga _{0.47} As	In _{0.53} Al _{0.47} As	In _{0.53} Ga _{0.47} As	In _{0.53} Al _{0.47} As
x	0	1	0	1
A	10240	1917	385.4	319.9
B	3.712x10 ⁻¹⁷	7.149x10 ⁻¹⁵	4.642x10 ⁻¹⁷	6.385x10 ⁻¹⁷
α	0.2295	0.1037	0.2467	0.2430

이 실험식의 정확도를 검증하기 위하여 In_{0.53}Ga_{0.47}As의 저전계 전자 이동도의 MC 실험결과와 실험식(3)을 측정값⁹⁾과 비교하였고, GaAs의 저전계 정공 이동도의 MC 실험결과를 Blakemore의 실험식¹⁰⁾과 측정값¹⁰⁾으로 그림2에서 비교하였다. 그림에서 In_{0.53}Ga_{0.47}As의 MC 실험결과와 실험식이 측정값과 모든 도핑농도에서 10% 이하의 오차로써 잘 일치함을 볼 수 있다.

고전계 상태에서 전자와 정공의 표동속도는 전계에 대하여 서로 다른 형태를 보여준다. 전자는 계곡간 천이에 의해서 속도-오버슈트가 발생하였다. In_{0.53}Ga_{0.47}As의 전자 표동속도의 MC 실험결과와 측정값을 그림4a)에서 비교하였고^{11,12)} 저전계와 고전계 영역에서 두 결과가 잘 일치함을 볼 수 있다. 정공 표동속도의 측정값은 입수할 수 없었기 때문에 비교할 수 없었다. 그림4a)에서는 In_{0.53}(Al_xGa_{1-x})_{0.47}As의 표동속도를 도핑농도와 몰비에 대하여 MC 실험한 결과를 함께 나타내었다. 전자의 속도-오버슈트는 도핑농도가 증가할수록 impurity 산란율이 증가하므로 속도-오버슈트의 크기는 감소하였고, 오버슈트가 발생하는 전계는 증가하였다. 그리고, Al 몰비가 증가할수록 계곡간 에너지 차이는 감소하였지만 Γ 계곡에서의 유효질량이 커짐으로 인해 가속이 덜 되기 때문에 오버슈트의 크기는 감소하였고, 더 높은 전계에서 오버슈

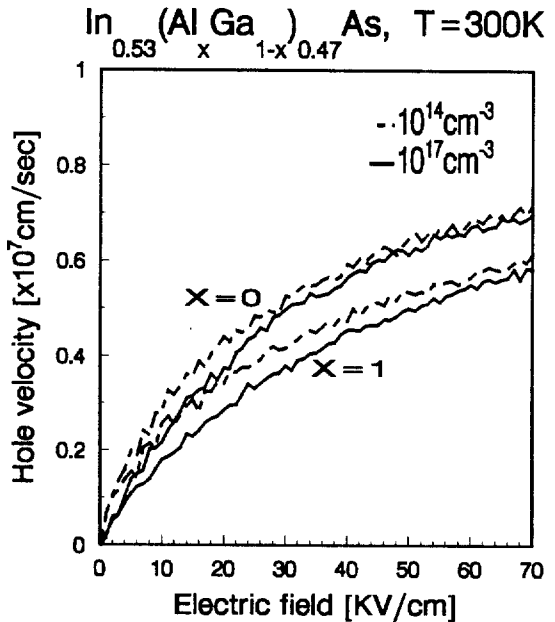
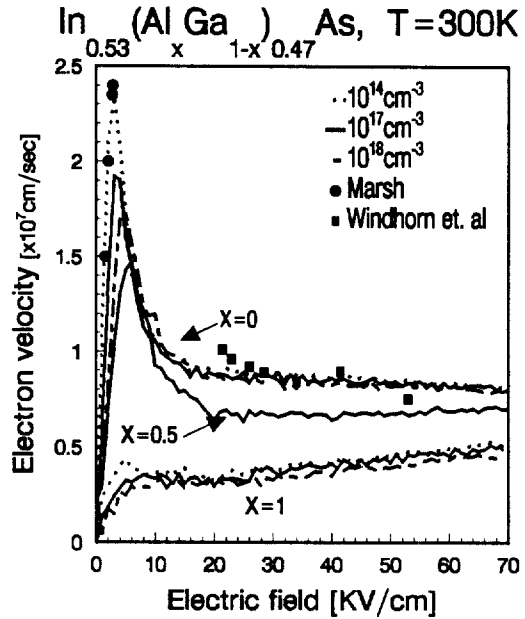


그림 4. In_{0.53}(Al_xGa_{1-x})_{0.47}As의 도핑농도와 몰비의 변화에 대한 a) 전자표동속도의 MC 실험결과와 측정값^{11,12)}의 비교, b) 정공 표동속도의 MC 실험결과.

Fig. 4. Comparison of MC results of a) electron drift-velocity and b) hole drift-velocity with the measured values of In_{0.53}(Al_xGa_{1-x})_{0.47}As for N (doping concentration) and x (Al mole fraction).

트 발생하였다. 실험결과 Al 몰비가 0.2에서는 대략 5KV/cm, 0.6에서는 6KV/cm에서 오버슈트가 발생하였다. 반면에 정공의 표동속도 그림4b)는 고전계에서 포화되었고, 도핑농도와 몰비가 증가할수록 산란율과 정공의 유효질량이 증가하여 속도는 감소하였다.

전자의 표동속도는 그림4a)에서 보듯이 몰비에 따라 속도-오버슈트와 속도-포화등 다른 형태를 보여주므로 전자의 고전계 이동도 $\mu_H = v/\epsilon$ 의 실험식도 두 가지 식을 사용하였다. 즉 속도-오버슈트가 두드러지게 나타나는 In_{0.53}Ga_{0.47}As (x=0)에서는 식(5)를 사용하였고, 속도-포화가 나타나는 In_{0.53}Al_{0.47}As (x=1)의 경우 식(6)을 각각 사용하였다.

전자의 고전계 이동도의 실험식:

In_{0.53}Ga_{0.47}As (x=0)의 실험식:

$$\mu_H(0, N, \epsilon) = \frac{\zeta \times \mu_L(0, N) + \zeta \times v_{sat} \cdot |\epsilon|^{1/\epsilon c^{\gamma}}}{\zeta + (\epsilon/\epsilon_c)^{\gamma}} \quad (5)$$

In_{0.53}Al_{0.47}As (x=1)의 실험식:

$$\mu_H(1, N, \epsilon) = \frac{\zeta \times \mu_L(1, N)}{\sqrt{1 + (\epsilon/\epsilon_c)^{\gamma}}} \quad (6)$$

여기서 μ_L 은 식(3)의 저전계 이동도의 실험식이고, $v_{SAT}=8 \times 10^6$ cm/sec의 포화속도이다. 그리고, ϵ_c 는 속도-오버슈트와 속도-포화가 발생하는 전계이다. 위의 실험식과 MC 실험 결과와 비선형 최소제곱적합을 통하여 추출한 파라미터들을 표3에 정리하였다.

표 3. 고전계 전자 이동도 실험식의 파라미터.

Table 3. Parameters of empirical formulas of high-field electron mobility.

	In _{0.53} Ga _{0.47} As	In _{0.53} Al _{0.47} As
x	0	1
β	3.058	-
γ	4.139	-
η	-	1.864
ϵ_c [KV/cm]	3	5
ζ	2.453	0.7413

몰비 x 에 대한 고전계 이동도의 실험식은 저전계 이동도와 마찬가지로 식(7)과 같이 내삽법으로

구할 수 있다. 여기서 선형 내삽법을 사용하면 속도-오버슈트가 발생하는 전계 영역에서 오차가 커지므로 비선형 내삽법을 사용하였고, 여기에 필요한 함수 f(x)와 g(x)의 계수를 표4에 정리하였다.

$$\mu_H(x, N, \epsilon) = \mu_H(0, N, \epsilon) \cdot f(x) + \mu_H(1, N, \epsilon) \cdot g(x) \quad (7)$$

$$f(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3$$

$$g(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3$$

표 4. 비선형 내삽식의 계수.

Table 4. Coefficients of function fitted by nonlinear interpolation.

	f(x)	g(x)
a ₀	1	-0.01
a ₁	-1.77	3.43
a ₂	2.70	-6.66
a ₃	-1.93	4.24

가전자대는 두 에너지 밴드가 K=0에서 일치하여 두 밴드의 최소에너지는 차이가 없기 때문에 정공의 표동속도는 몰비와 상관없이 고전계에서 포화되는 형태를 보여주므로 모든 몰비에 대하여 같은 실험식(8)을 사용하였다. 여기서 함수 h(N)은 도핑농도에 대한 비선형 최소제곱적합 과정에서 도입된 것이며, 이 함수는 In_{0.53}Ga_{0.47}As의 경우 $N=10^{18}$ cm⁻³ 그리고 In_{0.53}Al_{0.47}As의 경우 $N=4 \times 10^{18}$ cm⁻³ 을 기준으로 도핑농도에 대하여 두 개의 다른 변화를 보여주었고, 그 계수를 표5에 정리하였다. 몰비의 영향은 선형 내삽식으로 구하였다.

정공의 고전계 이동도의 실험식:

$$\mu_H(N, \epsilon) = \frac{\mu_L(N)}{(1 + \epsilon/h(N))}, \quad x=0과 \quad x=1 \quad \text{일 때} \quad (8)$$

$$\mu_H(x, N, \epsilon) = \mu_H(0, N, \epsilon) \times (1-x) + \mu_H(1, N, \epsilon) \times x$$

$$h(N) = b_0 + b_1 \cdot N + b_2 \cdot N^2 + b_3 \cdot N^3 + b_4 \cdot N^4 + b_5 \cdot N^5$$

이상과 같이 캐리어의 표동속도의 MC 실험 결과로부터 비선형 최소제곱적합 과정을 통하여 저전계 및 고전계 이동도의 실험식을 도핑농도와 몰비 그리고 전계의 함수로서 추출하였다. 이 실험식을 MC 실험 결과와 비교하여 그림5에 나타내었다. 그림5a), b)에서 보듯이 모든 몰비에 대하여 전

표 5. 함수 h(N)의 계수

Table 5. Coefficients of function h(N).

N(cm ⁻³)	In _{0.53} Ga _{0.47} As (x=0)		In _{0.53} Al _{0.47} As (x=1)	
	10 ¹⁴ -10 ¹⁸	2×10 ¹⁸ -8×10 ¹⁸	10 ¹⁴ -4×10 ¹⁸	6×10 ¹⁸ -8×10 ¹⁸
b ₀	2.5×10 ⁴	-2.26×10 ³¹	2.44×10 ⁴	1.164×10 ²⁷
b ₁	5.084×10 ⁻¹³	1.8×10 ¹³	5.77×10 ⁻¹³	-1.4×10 ⁸
b ₂	-2.075×10 ⁻³⁰	-3.79×10 ⁻⁶	-3.31×10 ⁻³⁰	-
b ₃	1.84×10 ⁻⁴⁸	2.38×10 ⁻²⁵	4.76×10 ⁻⁴⁸	-
b ₄	-	-	-2.24×10 ⁻⁶⁶	-
b ₅	-	-	3.13×10 ⁻⁸⁵	-

자와 정공의 고전계 이동도 실험식과 MC 실험 결과는 오차 10% 이내로 잘 일치하였으나, 전자의 속도-오버슈트가 발생하는 좁은 전계 영역에서, 약 30%의 오차를 보여 주었다. 그리고, 몰비 x=0.5에서도 그림5c)와 같이 속도-오버슈트가 발생하는 영역에서 약 30% 오차를 보여주었는데, Tomizawa 의 보고13) 에서도 Al_xGa_{1-x}As 의 경우 전자의 속도-오버슈트가 발생하는 좁은 전계 영역에서 약 30%의 오차를 보여 주고있다. 이것은 몰비 x의 영향을 식(7)과 같이 x=0, In_{0.53}Ga_{0.47}As 의 μ_H(O, N, ε) 실험식과 x=1, In_{0.53}Al_{0.47}As 의 μ_H(1, N, ε) 실험식을 내삽하여 계산한 결과라고 생각된다.

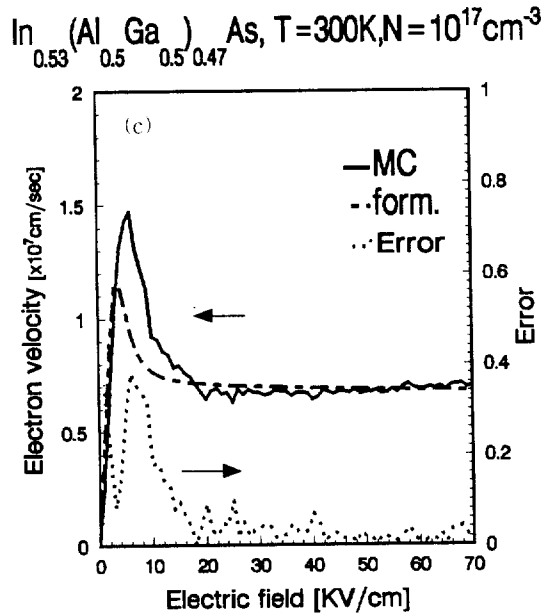
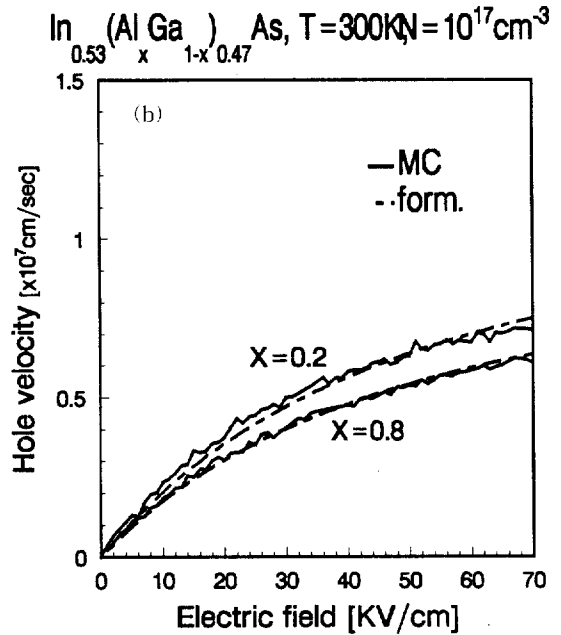
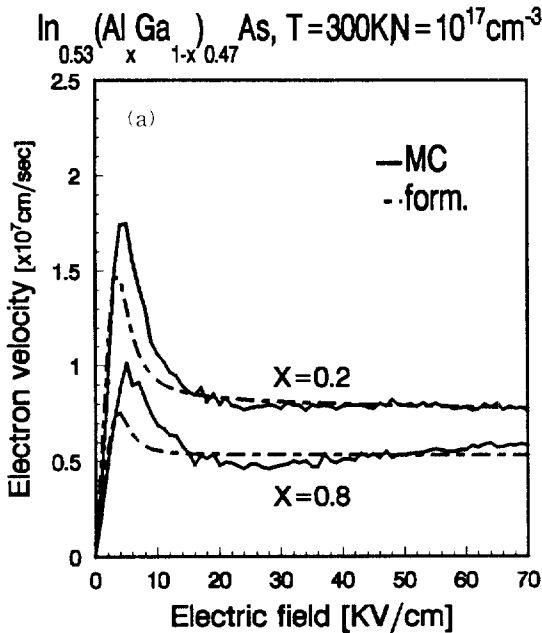


그림 5. a)전자와 b)정공의 표동속도의 실험식과 MC 실험 결과의 비교, c)몰비 x=0.5일때 전자 표동속도의 MC와 실험식의 비교 및 오차.

Fig. 5. Comparison of empirical formulas of a) electron drift-velocity, of b) hole drift-velocity and c) of electron drift-velocity for x=0.5 including error with MC results.

5. 결 론

고성능 HBT의 반도체 재료로 사용되는 In_{0.53}

$(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.47}\text{As}$ 의 전자와 정공의 저전계 및 고전계 이동도의 실험식을 MC 실험 결과로부터 추출하였다. 도핑농도에 대한 저전계 이동도의 실험식은 전자와 정공 모두 유사한 변화를 보여주므로 같은 실험식을 사용하였고, 관련된 파라미터들을 비선형 최소제곱적합을 통하여 도출하였다. 실험식과 MC 실험 결과가 모든 도핑농도와 몰비에 대하여 잘 일치하였다. 고전계 이동도는 전계의 변화에 대하여 전자와 정공의 표동속도가 다른 형태를 보여주므로 각각 다른 실험식을 사용하였고, 전자의 경우 몰비가 작을수록 속도-오버슈트가 심하게 발생하고 클수록 속도-포화되므로 $x=0$ 과 $x=1$ 에 대하여 각각 다른 실험식을 사용하였다. 이 실험식은 몰비 $x=0.5$ 일때 속도-오버슈트가 발생하는 좁은 전계 영역에서 MC 결과와 최고 30%의 오차를 보여주었지만, 다른 모든 전계 영역에서 도핑농도와 몰비의 변화에 대하여 오차가 10% 이내로 잘 일치하였다. 정공의 경우 acoustic phonon의 비탄성 충돌에 의한 밴드간 천이를 고려하여 정확도를 향상시켰다. 정공의 표동속도는 몰비에 상관없이 고전계에서 포화되는 형태를 보여주므로 모든 몰비에 대하여 같은 실험식을 사용하였고, 모든 도핑농도와 몰비 그리고 전계에 대하여 MC 결과와 오차 10% 이내로 잘 일치하였다. 이 실험식은 전자의 속도-오버슈트가 발생하는 좁은 전계영역에서만 최대 30%의 오차를 갖고 $\text{In}_{0.53}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.47}\text{As}/\text{InGaAs}$ 반도체 계열로 구성된 전자소자의 해석과 설계에 활용될 수 있다.

* 본 연구는 '95 한국학술진흥재단 연구비와 '95 동아대학교 기초자료 연구비에 의해 지원되었음.

참고문헌

1. H. Fukano, H. Nakajima, T. Ishibashi, Y. Takanashi, and M. Fujimoto, "Effect of Hot-Electron Injection on High-Frequency Characteristics of Abrupt $\text{In}_{0.52}(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x)_{0.48}/\text{InGaAs}$ HBT's," IEEE Trans. Elec. Dev., Vol. 39, pp.500-505, 1992.
2. H. Fukano, Y. Kawamura, and Y. Takanashi, "High-speed InAlAs/InGaAs Heterojunction bipolar transistors," IEEE Elec. Dev. Lett., Vol.9, pp.312-314, 1988.
3. R. N. Nottenberg, Y. K. Chen, M. B. Panish, R. Hamm, and D. A. Humphrey, "High-current-gain submicrometer InGaAs/InP heterostructure bipolar transistors," IEEE Elec. Dev. Lett., Vol.9, pp.524-526, 1988.
4. Sadao Adachi, "GaAs, AlAs, and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$: Material Parameters for use in research and device applications," J. Appl. Phys., Vol.58, pp. R1-R29, 1985.
5. Ch. Kpf, H. Kosina and S. Selberherr, "Mobility model for III-V Compounds suited for hydrodynamic device simulation," in 22nd Intern. Symp. on Compound Semiconductors, Cheju Island, Korea, Aug. 28 - Sept. 2, 1995.
6. Marino J. Martinez, David C. Look, John R. Sizelove and Fritz L. Schuermeyer, "Monte Carlo simulation of bulk hole transport in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$, and $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{1-x}$," J. Appl. Phys., Vol.77, pp.661-664, 1995.
7. Kuzutaka Tomizawa, "Numerical Simulation of Submicron Semiconductor Devices," Artech House, Boston, 1993.
8. T. Brudevoll, T. A. Fjeldly, J. Baek, and M. S. Shur, "Scattering rates for holes near the valence-band edge in semiconductors," J. Appl. Phys., Vol.67, pp.7373-7382, 1990.
9. V. W. L. Chin, T. Osotchan and T. L. Tansley, "On the calculation of electron mobility in $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$," Solid-State Electronics., Vol.35, pp.1247-1251, 1992.
10. Blakemore, J. S., in Key Papers in Physics - "Gallium Arsenide," ed. by J. S. Blakemore, American Institute of Physics, New York, 1987.
11. J. H. Marsh, "Effects of compositional clustering on electron in $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$," Appl. Phys. Lett., Vol.41, pp.732-734, 1982.
12. T. H. Windhorn, L. W. Cook, and G. E. Stillman, "Temperature dependent electron velocity-field characteristic for $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ at high electric fields," Journal of Electronic Materials, Vol.11, pp. 1065-1082, 1982.
13. Kazutaka Tomizawa, and Dimitris Pavlidis, "Transport Equation Approach for Heterojunction Bipolar Transistors," IEEE Trans. Elec. Dev., Vol.37, No.3, pp.519-528, 1990.