

AlGaAs/GaAs 이종접합 바이폴라 트랜지스터의 온도 변화에 따른 전기적 특성에 대한 연구
Temperature Dependence of Electrical Characteristics of AlGaAs/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors

박문평*, 이태우, 김일호, 박성호, 편광의
 한국전자통신연구소, 화합물반도체연구부

M. P. Park, T.W. Lee, I.H.Kim, S.H.Park, K.E.Pyun
 Compound Semiconductor Department, ETRI

ABSTRACT

When the ideality factor of collector current of AlGaAs/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors (HBTs) is larger than unity, conventional I_{CO}/T^2 versus $1000/T$ plot used in the determination of the barrier height of base-emitter junction of HBT was deviated from the straight line. We introduced the effective temperature T_{eff} as nT in the Thermionic-emission equation. The modified I_{CO}/T^2 versus $1000/T_{eff}$ plot was on the straight line in the temperature range considered. The activation energy obtained from the modified plot is 1.61 eV. The conduction band discontinuity calculated using this value was 0.305 eV and this value is coincident with the generally accepted value of 0.3 eV.

I. 서론

1980년대 초부터 실리콘 바이폴라 트랜지스터에 비해 고속으로 동작하는 AlGaAs/GaAs 이종 접합 바이폴라 트랜지스터(HBT)에 관한 연구가 활발히 진행되어왔다. 이와 같은 고속 특성은 AlGaAs와 GaAs 간의 격자 상수 정합이 매우 우수한 것, AlGaAs 에미터와 GaAs 베이스 간의 밴드 갭차가 크기 때문에 베이스층의 불순물 농도를 에미터층 보다 크게 할 수 있는 것에 기인한다. 이로 인해 베이스층의 저항 및 에미터-베이스 접합에서의 공핍층 캐패시턴스를 감소시킬 수 있기 때문이다. 그러나 AlGaAs/GaAs HBT는 에미터-베이스 전도대 간의 불연속이 큰 것, 에미터-베이스 가전자대 간의 불연속이 작은 것, AlGaAs 층에 전자 포획 준위인 DX center의 밀도가 큰 단점을 갖고 있다. 에미터-베이스 가전자대 간의 불연속이 작기 때문에 온도를 증가시키면 같은 컬렉터 전류치에서 전류 이득이 계속하여 감소한다[1].

에미터-베이스 전도대 간의 불연속은 AlGaAs/GaAs HBT의 전기적 특성에 미치는 영향이 크기 때문에 그 값을 측정하는 것이 대단히 중요하다. 온도를 변화시키면서 AlGaAs/GaAs HBT의 베이스-에미터 접합의 전압에 따른 베이스 전류 및 컬렉터 전류를 측정하는 것은 (Gummel plot) 일반적으로 사용되고 있는 방법이

다. 컬렉터 전류의 직선 영역에서의 전자 전송은 Thermionic-emission mechanism에 의해 표현된다.

$$I_C = A_E A^* T^2 \exp(-q\Phi_B/kT) [\exp(qV_{BE}/nkT) - 1]$$

위식에서 n 은 컬렉터 전류의 이상 인자이고, 이것은 베이스-에미터 접합에 인가되는 전압이 에미터층과 베이스층에 분배되는 비와 동등하다. 안정된 AlGaAs/GaAs HBT의 컬렉터 전류의 이상 인자는 1.0에 매우 근사하다. 이 경우 컬렉터 전류의 직선 영역을 베이스-에미터 접합 전압이 0 V 되기까지 외삽하여 구한 역 포화 컬렉터 전류로부터 AlGaAs/GaAs HBT의 베이스-에미터 접합의 barrier height를 구할 수 있다. 그러나 컬렉터 전류의 이상 인자가 1.0보다 클 경우 AlGaAs/GaAs HBT에는 누설 전류가 존재하게 되고, 이 경우 에미터 부터 컬렉터 까지 전송된 전자에 대하여 그 전송 기구는 아직 명확하게 알려져 있지 않다.

이 논문에서는 컬렉터 전류의 이상 인자가 1.0보다 클 경우 AlGaAs/GaAs HBT의 베이스-에미터 접합의 barrier height를 구하는 방법에 대하여 검토하였다.

II. 소자 제작 및 측정

AlGaAs/GaAs HBT를 제작 하는데 필요한 에피층은 유기 금속 화학 증착 (MOCVD)방법에 의해 성장시켰다. AlGaAs 에미터층은 Si를 $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, GaAs 베이스층은 C를 $3.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, GaAs 컬렉터층은 Si를 $2.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 을 도핑시켰다. 에피층 구조 및 AlGaAs/GaAs HBT의 단면도를 표 1 및 그림 1에 표시하였다. 실험에 사용한 AlGaAs/GaAs HBT의 전체 크기는 $200 \times 100 \mu\text{m}^2$ 이고, 에미터 면적은 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 이다. 그림 1에서 컬렉터 전극은 페이지 위쪽으로 향하는 방향에 있다.

비 자기 정합 구조 (non self-aligned structure)의 AlGaAs/GaAs HBT는 통상적인 mesa 에칭과 lift-off공정을 반복하여 제작 하였다. $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 4:1:50$ 용액을 InGaAs 캡층 식각에 사용하였고, $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 20:7:973$ 용액을 GaAs 캡층 및 AlGaAs 에미터층 식각에 사용하였으며, $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 4:1:50$ 용액을 GaAs 컬렉터층 및 소자 분리식각에 사용하였다. 에미터 및 베이스 전극에 Ti/Pt/Au 금속계를 사용하였고, 컬렉터 전극에

AuGe/Ni/Au 금속계를 사용하였다. AlGaAs/GaAs HBT의 표면 보호를 위해 SiN 박막을 플라즈마 증착 (PECVD)방법에 의해 증착시켰다. 전극 증착을 위한 via hole은 반응성 이온 식각 (RIE) 방법에 의해 형성시켰다.

제작이 끝난 AlGaAs/GaAs HBT를 절단하여 TO형 chip carrier에 붙인 후 와이어 본딩을 하였다. 패키지가 끝난 AlGaAs/GaAs HBT를 오븐에 넣고, 30°C부터 185°C까지 20°C 간격으로 온도를 증가 시키면서 HP 4145B를 사용하여 Gummel plot을 측정하였다.

III. 결과 및 토의

30°C부터 185°C까지 20°C 간격으로 온도를 증가 시키면서 측정한 Gummel plot을 그림 2에 도시한다. 컬렉터 전류와 베이스 전류가 베이스-에미터 전압에 따라 선형적으로 증가하는 영역은 온도가 증가할수록 좁아지는 것을 알 수 있다. 컬렉터 전류의 이상 인자는 30°C인 경우 1.164이고, 이 값은 185°C에서 1.249가 된다. 한편 베이스 전류의 이상 인자는 30°C인 경우 1.989이고, 이 값은 185°C에서 1.681이 된다. 컬렉터 전류와 베이스 전류의 온도 상승에 따른 변화를 그림 3에 도시한다.

AlGaAs/GaAs HBT의 베이스 전류는 베이스층, 에미터-베이스 공핍층, 에미터 모서리 와 베이스 전극 간의 베이스 표면, 메사 에칭된 에미터 표면 공핍층에서의 재결합 전류 및 베이스로부터 에미터로 주입되는 역정공 전류로 구성된다[2]. 모니터 AlGaAs/GaAs HBT의 에미터 면적이 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 이므로 에미터 모서리 와 베이스 전극 간의 베이스 표면에서의 재결합 전류는 무시할 수 있다[3]. 베이스층의 재결합 전류도 무시할 수 있는데, 이것은 컬렉터 전류에 대한 전류 이득의 변화를 온도를 증가시키면서 측정한 결과에서 설명할 것이다. 에미터-베이스 공핍층과 메사 에칭된 에미터 표면 공핍층의 재결합 전류의 이상 인자가 2이므로, 상기 두 베이스 전류 성분이 30°C에서 지배적임을 알 수 있다. AlGaAs/GaAs 이중 접합의 가전차대 불연속은 0.19 eV라고 알려져 있다[4]. 이 값이 작기 때문에 온도를 증가 시킴에 따라 베이스로부터 에미터로 주입되는 역정공 전류가 증가하게 된다. 역정공 전류의 이상 인자가 1이므로 베이스 전류의 이상 인자는 온도를 증가 시킴에 따라 점차 감소하고 185°C에서 1.681이 된다고 생각할 수 있다.

실온에서 AlGaAs/GaAs HBT의 컬렉터 전류의 이상 인자는 1에 매우 가까운 값을 갖는다. 제작된 AlGaAs/GaAs HBT의 컬렉터 전류의 이상 인자가 30°C에서 1.164이다. 이와 같이 컬렉터 전류의 이상 인자가 1보다 클 경우에는 소자 내에 누설 전류가 존재한다고 생각할 수 있다. 이 경우 AlGaAs/GaAs HBT의 에미터-베

이스 접합의 barrier height를 구하기 위해 I_{CO}/T^2 를 $1000/T$ 에 대하여 도시한 것이 그림 4이다. 고온 영역에서 직선상에서 벗어나는 것을 알 수 있다.

고온 영역에서도 직선상에서 벗어나지 않기 위하여 Thermionic-emission equation의 barrier height에 관련된 지수 함수 항에 다음과 같이 Effective temperature T_{eff} 를 도입하였다.

$$I_{CO} = A_E \cdot A^* \cdot T^2 \cdot \exp(-q\Phi_B/kT_{eff}) \quad (1)$$

여기에서 I_{CO} 는 역포화 컬렉터 전류, A_E 는 에미터 면적, A^* 는 Effective Richardson 상수, T 는 절대 온도, q 는 전하량, Φ_B 는 barrier height, k 는 Boltzmann 상수이고, T_{eff} 는 nT 로 정의한다. (1)식에서 I_{CO}/T^2 를 $1000/T_{eff}$ 에 대하여 도시한 것이 그림 5이다. 고온 영역에서도 직선상에서 벗어나지 않는 것을 알 수 있다. 그림 5에서 구한 컬렉터 전류의 활성화 에너지는 1.61 eV이다.

이 값을 이용하여 AlGaAs/GaAs HBT의 에미터-베이스 전도대 불연속(ΔE_C)를 구할 수 있는가를 시도해 보았다. AlGaAs/GaAs HBT의 컬렉터 전류는 다음과 같이 쓸 수 있다[5].

$$I_C = A_E \cdot A^* \cdot T^2 \cdot \exp(-E_a/kT) \quad (2)$$

여기에서 E_a 는 Thermionic electron의 활성화 에너지이다. 이 활성화 에너지는 Thermionic electron이 에미터로부터 컬렉터까지 도달하는 과정에서 만나는 barrier height와 동등하고, 이때의 AlGaAs/GaAs HBT의 band diagram을 그림 6에 도시한다.

$$E_a = E_g(\text{GaAs}) - \delta_B + \Delta E_C - qV_2 - qV_{BE} \quad (3)$$

여기에서 $E_g(\text{GaAs})$ 는 GaAs 베이스의 밴드 갭, δ_B 는 베이스 불순물 Fermi 준위, ΔE_C 는 AlGaAs-GaAs 이중 접합에서 전도대 불연속, qV_2 는 베이스 영역의 diffusion potential이다. (3)식을 (2)식에 대입하면

$$I_C = I_{CO} \cdot \exp(qV_{BE}/nkT) \quad (4)$$

여기에서 I_{CO} 는 컬렉터 포화 전류이고, 다음과 같이 정의한다.

$$I_{CO} = A_E \cdot A^* \cdot T^2 \cdot \exp[-(E_g(\text{GaAs}) - \delta_B + \Delta E_C - qV_2)/nkT] \quad (5)$$

(3)식에서 V_{BE} 가 0일 때 활성화 에너지가 $q\Phi_B$ 와 같게 된다. Effective temperature를 nT 로 정의했기 때문에 (5)식은 (1)식과 같이 쓸 수 있다. (5)식에서 barrier height $q\Phi_B$ 를 구성하는 각 항의 온도 의존성은 다음과 같다.

GaAs 밴드 갭은 30°C-185°C 온도 범위에서 다음과 같이 온도의 일차 함수로 근사시킬 수 있다.

$$E_g(\text{GaAs}) \cong E_{g0} - E_{g1} \cdot T$$

여기에서 E_{g0} 는 0K의 밴드 갭이고, E_{g1} 은 $dE_g(\text{GaAs})/dT$ 에 의해 구해지는 온도 계수이다. 베이스의 불순물 준위는 $\delta_B = kT \cdot \ln(N_V/N_B)$ 와 같이 나타낸다. 여기에서 N_V 와 N_B 는 각각 가전차대의 Effective density of states와 베이스의 도핑 농도이다.

N_V 와 N_B 는 30°C-185°C 온도 범위에서 일정하다고 가정

한다. 베이스 영역의 diffusion potential은 $qV_2 = kT \ln(N_B N_E / n_i^2) \cdot (n-1)/n$ 와 같이 나타낸다. 여기에서 N_B 와 N_E 는 각각 베이스 도핑 농도와 에미터 도핑 농도이고, n_i 는 GaAs 의 Intrinsic carrier density 이다. Intrinsic carrier density 는 $n_i^2 = N_C N_V \exp[-E_g(\text{GaAs})/kT]$ 와 같이 나타낸다. 여기에서 N_C 는 전도대 Effective density of states 이다. 따라서 qV_2 는 다음과 같이 온도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$qV_2 = [k \ln(N_B N_E / N_V N_C) - 1] \cdot (n-1) / n \cdot T + E_{g0} \cdot (n-1) / n \quad (6)$$

(5)식의 각 항의 온도 의존성을 종합하면 barrier height 는 다음과 같이 온도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$q\Phi_b = q\Phi_0 + q\Phi_1 \cdot KT \quad (7)$$

여기에서 $q\Phi_1$ 은 $dq\Phi_b/dT$ 로 나타내는 barrier height 온도 계수이다.

$$q\Phi_0 = E_{g0} + \Delta E_c - E_{g0} \cdot (n-1) / n \quad (8)$$

(7)식을 (5)식에 대입하면

$$\ln(I_{co}/T^2) = \ln(A_E \cdot A^*) - q\Phi_1/n - q\Phi_0/nkT \quad (9)$$

T 가 0 K 일 때 (9)식은 (1)식과 일치한다.

AlGaAs/GaAs HBT 의 컬렉터 전류의 이상 인자가 1.164 일 때 (8)식에 의해 계산한 ΔE_c 는 0.305 eV 이고, 이 값은 일반적으로 알려진 0.3 eV 에 근사하다[6]. 따라서 AlGaAs/GaAs HBT 의 컬렉터 전류의 이상 인자가 1 보다 클 경우 I_{co}/T^2 를 $1000/T_{eff}$ 에 대하여 도시하는 방법이 에미터-베이스 접합의 barrier height 를 구하는 데 효과적이라고 생각된다.

30°C-185°C 온도 범위에서 측정된 AlGaAs/GaAs HBT 의 Gummel plot 에서 전류 이득을 컬렉터 전류에 대하여 도시한 것이 그림 7 이다. 전류 이득은 같은 컬렉터 전류에 대하여 온도가 증가함에 따라 지속적으로 감소하고, 이것을 다음과 같이 (10)식으로 나타낼 수 있다.

$$\beta h = X_E N_E D_n / X_B N_B D_p \cdot \exp(\Delta E_c / kT) \quad (10)$$

여기에서 X_B 와 X_E 는 베이스 와 에미터 두께, N_B 와 N_E 는 베이스 와 에미터 도핑 농도이고, D_n 과 D_p 는 각각 전자 와 정공 확산 계수이다. 컬렉터 전류가 10 mA 가 될 때까지 전류 이득은 컬렉터 전류에 따라 증가한다. 이 영역에서의 주된 재결합 전류는 에미터-베이스 공핍층 재결합 전류이다. 전류 이득이 컬렉터 전류에 대하여 일정한 영역이 거의 존재하지 않으므로 베이스 층의 재결합 전류 영향은 무시할 수 있다. 컬렉터 전류가 10 mA 를 넘으면 전류 이득은 컬렉터 전류에 따라 지속적으로 감소하고, 이와 같은 현상은 high level injection 에 기인하여 베이스 폭이 증가하는 Kirk effect 로 설명할 수 있다[7].

IV. 결론

컬렉터 전류의 이상 인자가 30°C 에서 1.164 인 AlGaAs/GaAs HBT 의 에미터-베이스 접합의 barrier height 를 구하기 위해 I_{co}/T^2 를 $1000/T$ 에 대하여 도시한 결과

고온 영역에서 직선에서 벗어났다. Thermionic-emission equation 의 $q\Phi_b$ 에 관한 지수 항에 Effective temperature 를 도입하여, I_{co}/T^2 를 $1000/T_{eff}$ 에 대하여 도시한 결과 고온 영역에서도 직선에서 벗어 나지 않았다. 이 직선의 기울기에서 구한 컬렉터 전류의 활성화 에너지는 1.61 eV 이었다. 이 값을 이용하여 계산한 ΔE_c 는 0.305 eV 이고, 이는 일반적으로 알려진 0.3 eV 에 근사하다.

참고 문헌

- [1] W.Liu, et. al., IEEE Trans. Elec. Dev. 40 (1993) 1351.
- [2] G.B.Gao, et. Al., Appl. Phys. Lett. 61 (1992) 198.
- [3] W.Liu, et. Al., IEEE Trans. Elec. Dev. 39 (1992) 2726.
- [4] J.Batey, et. Al., J.Appl.Phys. 59 (1986) 200.
- [5] T.W.Lee, Ph. D. Thesis, University of Sheffield, U.K., 1992.
- [6] J.N.Miller, GaAs IC Symp. Short Course, 1992.
- [7] R.S. Muller and T. Kamins, Device Electronics for Integrated Circuits (Wiley, 1986), p. 328.

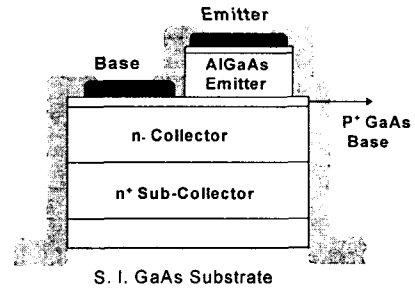


Fig. 1. Schematic cross section of an AlGaAs/GaAs HBT

Table 1. Epitaxial layer structure for the preparation of AlGaAs/GaAs HBT

Function	Material	In or Al Composition	Thickness (Å)	Doping
Cap I	InGaAs	0.5	400	1.0×10^{19}
Cap II	InGaAs	0.5 - 0	400	1.0×10^{19}
Cap III	GaAs	-	1300	3.7×10^{18}
Emitter I	AlGaAs	0 - 0.3	500	5.0×10^{17}
Emitter II	AlGaAs	0.3	1500	2.0×10^{17}
Base	GaAs	-	700	3.0×10^{19}
Collector	GaAs	-	4000	2.0×10^{18}
SubCollector	GaAs	-	5000	5.0×10^{18}
Buffer	GaAs	-	3000	-
Substrate	S.I. GaAs	-	600 μm	-

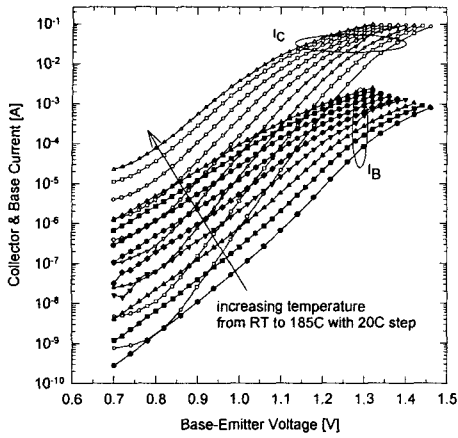


Fig. 2. Gummel plots of AlGaAs/GaAs HBT as a function of temperature

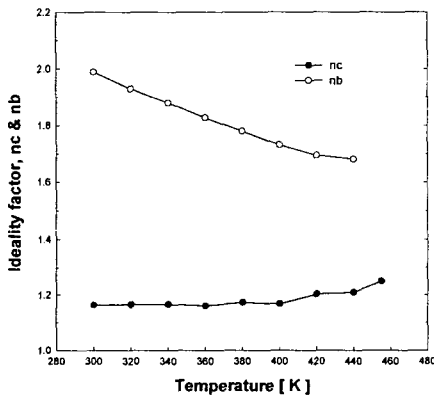


Fig. 3. Temperature dependence of the ideality factors of base and collector current

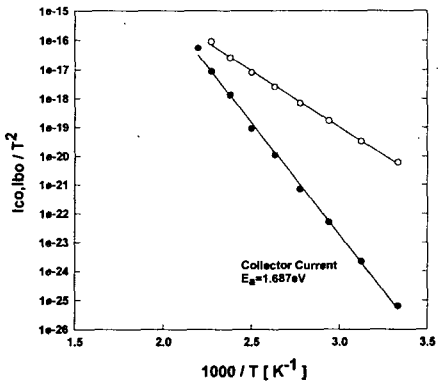


Fig. 4. Arrhenius plot of AlGaAs/GaAs HBT

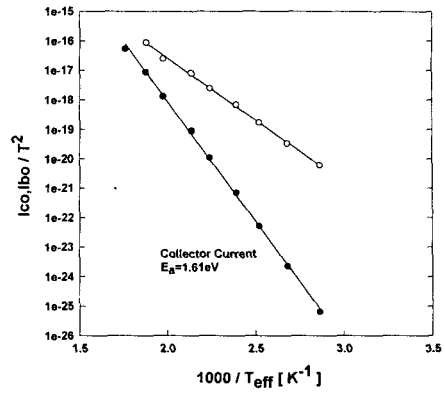


Fig. 5. Modified Arrhenius plot of AlGaAs/GaAs HBT

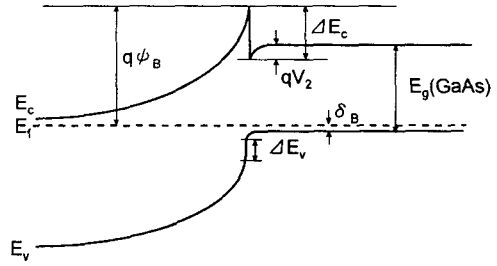


Fig. 6. Schematic band diagram of AlGaAs-GaAs heterojunction

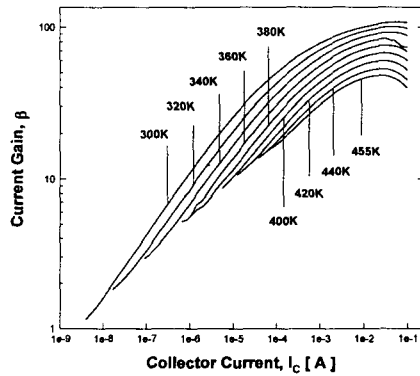


Fig. 7. Current gain versus collector current as a function of temperature