

온도변화에 따른 AlGaAs/GaAs HBT의 전류이득 특성

Current Gain Characteristics of AlGaAs/GaAs HBTs with different Temperatures

김종규, 안형근, 한득영

(Jong-Kyu Kim, HyungKeun Ahn, Deuk-Young Han)

Abstract

In this study, temperature dependency of current gain for AlGaAs/GaAs/GaAs HBT is analytically proposed over the temperature range between 300K and 600K. Energy bandgap, effective mass, intrinsic carrier concentration are considered as temperature dependent parameters. Collector current which is numerically calculated is then analytically expressed to enhance the speed of calculation for current gain. From the results, current gain decreases as the temperature increases. These results will be used to expect the unity current gain frequency f_T in conjunction with emitter-base and collector-base capacitances

Key Word : HBT, I-V characteristic, Current gain, f_T (cutoff frequency)

1. 서론

Si 트랜지스터와 GaAs 전계효과 트랜지스터(Field Effect Transistor, FET)는 마이크로파 집적 회로에서 기본적인 소자로 여러 분야에 걸쳐 사용되어 왔다. 그러나 좀더 높은 주파수에 대한 요구에 따라 새로운 소자로서 이종접합구조(Heterojunction structure)의 발전에 의해 고속 전자 이동 트랜지스터(High Electron Mobility Transistor, HEMT)와 이종 접합 쌍극자 트랜지스터(Heterojunction Bipolar Transistor, HBT)가 새로운 소자로서 각광을 받게 되었으며 그 활용 분야가 점차적으로 확대되고 있다. 특히 HBT는 GaAs MESFET 또는 HEMT 등과 같은 전계 효과 트랜지스터에 비해, 전자 천이 시간이 lithography 기술보다는 epi 성장기술에 의해 지배되므로 적절한 공정을 통해 높은 f_T 특성을 얻을 수 있으며, 또한 에미터 면적 전체를 통해 전류가 흐르므로 고전류를 다룰 수 있

고, 높은 트랜스컨덕턴스를 얻을 수 있다는 장점들로 인해 MMIC 및 고속 Digital IC 응용 분야에서 매우 유망한 소자이다. 따라서 HBT의 성능향상과 이를 이용한 회로 및 소자 설계를 최적화하기 위한 소자 특성 모델의 필요성이 증대되어 이에 관한 많은 연구가 있어왔다.

HBT는 1951년 Shcokley에 의해 처음으로 제안되었으며, Kroemer에 의해 구체화 되었고[4], 그 뒤로 많은 연구가 수행되어져 왔으며, Ebers-Moll 모델[1], Gummel-Poon 모델[2], New charge control 모델[3] 등 많은 해석적인 모델이 제시되었다.

본 연구에서는 AlGaAs/GaAs HBT에서 온도변화에 따른 전압-전류 특성과 그에 따른 전류이득 특성을 살펴보았다. 이를 위해 에너지갭과 유효질량, 그리고 진성 캐리어 농도 등에 대한 온도의 영향을 고려하였으며 이는 접합 정전 용량에 대한 해석과 더불어 f_T (차단주파수)를 예측하는데 이용이 될 것이다.

2. 온도변화에 따른 변수들

2.1 Energy Bandgap

전도대역(conduction band)과 가전자대역(valence

건국대학교 전기공학과
(서울 특별시 광진구 화양동 1번지 건국대학교,
Fax: 02-447-9186
E-mail : hkahn@kkucc.konkuk.ac.kr)

band)의 최소 에너지 차인 에너지 밴드갭은 반도체의 가장 기본적인 특성이다. 상온에서 고순도의 Si, Ge, GaAs의 에너지 밴드갭은 각각 1.12eV, 0.66eV, 1.424eV이다. 온도가 증가하면 대부분의 반도체의 에너지 밴드갭은 감소한다. 이러한 현상은 온도변화에 의한 반도체 물질의 부피변화와 electron-photon scattering으로 설명할 수 있다.

Thurmond가 Si, Ge, 그리고 GaAs에 대한 온도에 따른 에너지 밴드갭의 변화를 나타내는 일반적인 식을 제안하였다.

$$E_g(T) = E_g(0K) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (1)$$

Thurmond의 모델에서 모델 파라미터 값들은 표 1에 정리되어 있다.

표 1. Si, Ge, GaAs에 대한 Thurmond 모델의 변수값.

물질	E_g at 0K(eV)	α (eV K ⁻¹)	β (K)
Si	1.170	4.73×10^{-4}	636
Ge	0.7437	4.774×10^{-4}	235
GaAs	1.517	5.5×10^{-4}	225
AlGaAs	$1.517 + 1.39 \times m$	$(5.5 + 3.35 \times m) \times 10^{-4}$	$225 + 88 \times m$

그림 1은 온도가 증가함에 따라 반도체 물질들의 에너지 밴드갭이 감소하는 것을 보여주고 있다.

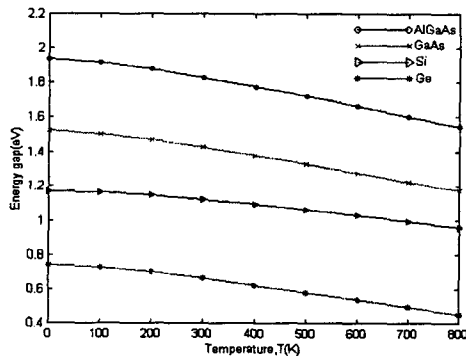


그림 1. 온도변화에 따른 반도체 물질의 에너지갭.

2.2 유효질량과 유효 준위밀도

캐리어가 반도체 격자내에 존재하게 되면 자유공간에 존재할 때와 달리 양성자 또는 전자에 의한 내부의 힘에 영향을 받게 된다. 따라서 자유공간의 질

량과 다른 값을 갖게 된다. 이러한 내부힘의 영향을 고려한 캐리어의 질량값을 유효질량이라 한다.

GaAs와 AlGaAs의 전자 유효질량, 정공 유효질량의 온도에 의한 영향은 각각 다음의 식과 같다.[10]

$$m_e^\Gamma(T) = \frac{1}{1 + \frac{p^2}{3} \left(\frac{2}{E_0(T)} + \frac{1}{E_0(T) + \Delta_0(T)} \right)} \quad (2)$$

$$m_e^\Gamma(T) = m_e^\Gamma(T=0) \frac{E_0(T)}{E_0(T=0)} \quad (3)$$

$$m_{HH}^s(T) = m_{HH}^s(T=0) \frac{E_0(T)}{E_0(T=0)} \quad (4)$$

$$m_{LH}^s(T) = m_{LH}^s(T=0) \frac{E_0(T)}{E_0(T=0)} \quad (5)$$

여기서, $p^2 = 22.66[eV]$ 이고, $m_e^\Gamma(T)$ 는 각각 GaAs와 AlGaAs의 온도변화에 따른 전자의 Γ 벨리에서의 유효질량이며, m_{HH}^s 와 m_{LH}^s 는 heavy hole과 light hole의 유효질량으로 GaAs의 경우 각각 0.5, 0.08이고, AlGaAs의 경우 각각 0.575, 0.104이다.

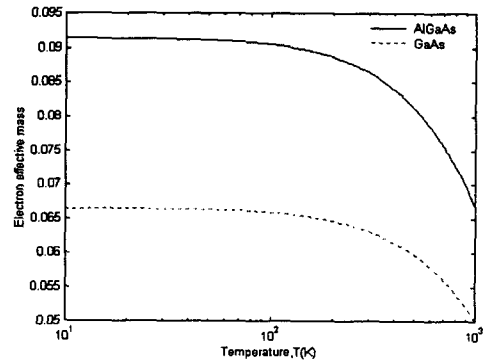


그림 2. 온도변화에 따른 유효질량.

그림 2는 온도변화에 따른 GaAs와 AlGaAs의 유효질량의 변화를 보여주고 있다.

유효 준위밀도는 캐리어 농도와 반도체 내부 캐리어의 에너지 분포를 결정하는데 필요하다. 원칙적으로 주어진 물질에 대해 밴드 이론 계산을 통해 결정되지만, 실질적으로 보다 단순한 접근 방법을 이용하여 근사적으로 구한다. 온도에 따른 GaAs와 AlGaAs의 유효 준위밀도는 다음과 같다.

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_{eff}^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (6)$$

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_{eff}^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (7)$$

2.3 진성 캐리어 농도

진성 캐리어 농도는 N_c , N_v 와 E_G 의 변화에 의존적이다.

$$n_i = \sqrt{(N_c \times N_v)} \times \exp(-E_G/2kT) \quad (8)$$

그림 3은 온도변화에 따른 진성 캐리어 농도의 변화를 보여준다.

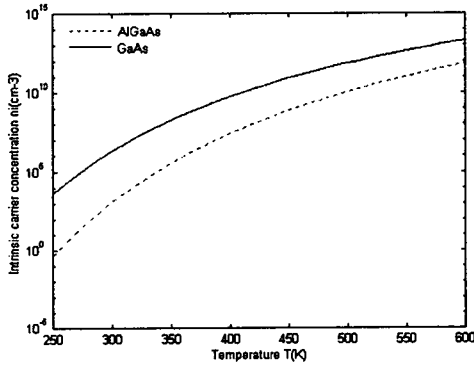


그림 3. 온도변화에 따른 진성 캐리어 농도.

3. Current equation

3.1 Collector current [5]

그림 4와 같은 HBT의 구조에서, 에미터와 베이스 공핍층 끝에서 콜렉터 전류는 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J_C(X_2) = J_n(-X_g) - (J_{SCRG} + J_{SCRs} + J_{SCR2}) \quad (9)$$

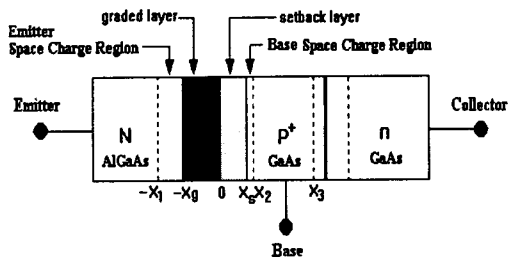


그림 4. N/p/n HBT의 단면도.

이종 접합면을 가로지르는 전자의 전류밀도 (electron current density)는 이종접합 양쪽의 전자의 흐름 (electron flux)의 차로써 구해질 수 있고, 이것은 식(10)과 같이 나타내어진다.[5],[6]

$$\begin{aligned} J_n(-X_g) &= qv_n v_n [n(-X_g^-) - n(-X_g^+) \exp(-\Delta E_C/kT)] \\ &= qv_n v_n \{ N_E \exp(-qV_{BE}/kT) \\ &\quad - n(X_2) \exp[q(V_{BE} + V_{BS} + V_{BEC})/kT] \} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, v_n 은 전자의 평균 thermal velocity의 1/4 값을 의미하며, v_n 은 전자의 tunnelling coefficient, ΔE_C 는 conduction band discontinuity이다.

준중성 베이스에서는 콜렉터 전류를 확산에 의한 전류로 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_C(X_2) \approx \frac{qD_n n(X_2)}{X_3 - X_2} \quad (11)$$

베이스 쪽의 에미터-베이스 공핍영역 끝에서 the-rmionic emission에 의한 전류와 확산에 의한 전류는 연속하므로, 베이스 쪽의 에미터-베이스 공핍영역 끝에서의 전자의 농도를 식(12)와 같이 구할 수 있다.

$$n(X_2) = \frac{v_n v_n N_E \exp(-qV_{BE}/kT) - (J_{SCRG} + J_{SCRs} + J_{SCR2})}{D_n / (X_3 - X_2) + v_n v_n \exp[q(V_{BE} + V_{BS} + V_{BEC})/kT]} \quad (12)$$

콜렉터 전류, $J_C(X_2)$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_C(X_2) = \frac{qv_n v_n N_E \exp(-qV_{BE}/kT) - (J_{SCRG} + J_{SCRs} + J_{SCR2})}{1 + v_n v_n \exp[q(V_{BE} + V_{BS} + V_{BEC})/kT] \frac{(X_3 - X_2)}{D_n}} \quad (13)$$

3.2 SCR recombination current

SCR recombination은 다음과 같이 그림 1의 네 구간에 대하여 식(14)와 같이 분석된다.[8]

$$\begin{aligned} J_{SCR} &= q \int_{-X_1}^{-X_g} R dx + q \int_{-X_g}^0 R dx \\ &\quad + q \int_0^{X_1} R dx + q \int_{X_1}^{X_2} R dx \\ &= J_{SCR1} + J_{SCRG} + J_{SCRs} + J_{SCR2} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, R 은 Shockley-Read-Hall Recombination Rate이고, 식 (15)와 같이 정의된다.[7]

$$R = \frac{n_i}{\sqrt{\tau_{p0}\tau_{n0}}} \frac{\sinh\left(\frac{E_{FN} - E_{FP}}{2kT}\right)}{\cosh\left[\frac{1}{kT}\left(E_i - \frac{E_{FN} + E_{FP}}{2}\right) + \ln\sqrt{\tau_{n0}/\tau_{p0}}\right]} + \exp[(E_{FN} - E_{FP})/2kT] \cosh\left[\frac{E_T - E_i}{kT} + \ln\sqrt{\frac{\tau_{p0}}{\tau_{n0}}}\right] \quad (15)$$

여기서, E_{FN} , E_{FP} 은 Quasi-Fermi level과 τ_{n0} , τ_{p0} 은 공핍영역에서의 life time이다.[9]

4. Simulation

시뮬레이션에 사용된 HBT는 에미터 도핑농도 $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 베이스 도핑농도 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 이며, graded layer의 두께는 200Å, setback layer의 두께는 0Å이다.

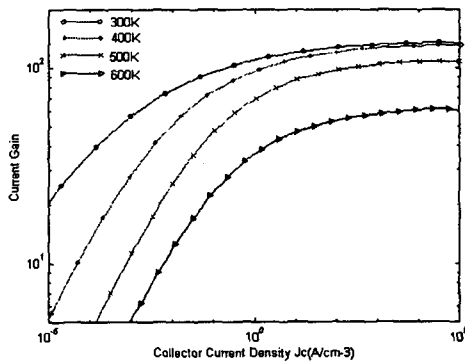


그림 5. 온도변화에 따른 콜렉터 전류와 전류이득.

그림 5는 다른 온도에서 콜렉터 전류에 따른 전류이득의 변화를 보여준다.

그림 6은 일정한 에미터-베이스 전압에서 온도변화에 따른 전류이득의 변화를 보여준다. 온도가 증가함에 따라 베이스 전류가 증가하여 결과적으로 전류이득이 감소하는 현상이 나타난다.

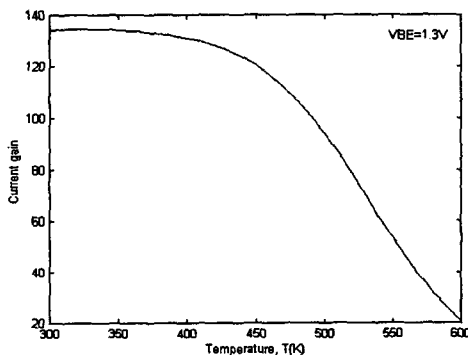


그림 6. 온도 변화에 따른 전류이득의 변화.

5. 결론

본 연구에서는 온도 의존성을 가지는 파라미터인 에너지갭(E_G)과 유효질량(m_n, m_h), 진성 캐리어

농도(n_i)를 고려하여, 온도변화에 따른 전압-전류 특성을 해석적으로 제시하였고, 그에 따라 변화하는 전류이득 특성을 분석하였다. 낮은 에미터-베이스 전압에서 온도가 증가함에 따라 콜렉터 전류는 증가하지만 베이스 전류의 증가로 인해 온도가 높아짐에 따라 전류이득은 감소하였다.

참고 문헌

- [1] Lundstorm, M.S., "An Ebers-Moll Model for the Heterostructure Bipolar Transistor", Solid-State Electron., Vol. 29, 1986, pp.1173-1179
- [2] Ryum, B. R. and Abdel- Motaleb, I. M., "A Gummel-Poon Model for Abrupt and Graded Heterojunction Bipolar Transistor(HBT's)", Solid-State Electron., Vol. 33, 1990, pp.869-880
- [3] Parikh, C.D. and Lindholm, F. A., "A New Charge-Control Model for Single and Double-Heterojunction Bipolar Transistor", IEEE Trans. Electron Device, Vol. 39, 1992, pp.1303-1311.
- [4] Kroemer, H., "Heterojunction Bipolar Transistor and Integrated Circuits", Proc. IEEE, Vol. 70, 1982, pp.13-25
- [5] 김광식, 유영한, 안형근, 한득영, "접합구조에 따른 AlGaAs/GaAs HBT의 DC 특성에 관한 연구", 한국전기전자재료학회 하계학술대회 논문집, Vol.1/No.1 PA13, 2000, pp.67-70
- [6] Grinberg, A. A., Shur, M.S., Fisher, R.J. and Morkoc, H., "An Investigation of the Effect of Graded Layers and Tunneling on the Performance of AlGaAs/GaAs Heterojunction Bipolar Transistor", IEEE Trans. Electron Device, Vol. ED-31, 1984, pp.1758-1764
- [7] C. D. Parikh and F. A. Lindholm, "Space-charge region recombination in heterojunction bipolar transistors", IEEE Trans. Electron Devices, ED-39, 2197 (1992)
- [8] S. Searles and D. L. Pulfrey, "An Analysis of space-charge-region recombination in HBTs", IEEE Trans. Electron Devices, ED-41, 476 (1994)
- [9] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed., Wiley, New York (1981)
- [10] Sadao Adachi, GaAs and Related Materials, World Scientific (1994)