

InAlGaAs/InGaAs HBT의 Monte Carlo 해석

황 성범*, 김용규**, 송정근***
* 경남정보대학, 전자정보통신과
**대구기능대학, 메카트로닉스학과
*** 동아대학교, 공과대학 전자공학과
부산시 사하구 하단동 840번지
cksong@daunet.donga.ac.kr

Monte Carlo Analysis of InAlGaAs/InGaAs HBT

Sung-Bum Hwang*, Yong-Kyu Kim**, Chung-Kun Song***
* Kyungnam College, Dept. of Electronic Communication Eng.
** Taegu Polytechnic College, Dept. of Mechatronics Eng.
*** Dong-A University, Dept. of Electronic Eng.
840 Hadan-dong, Saha-gu, Pusan, 604-714, Korea
cksong@daunet.donga.ac.kr

Abstract

Due to the large conduction band discontinuity between emitter and base, InAlGaAs/InGaAs HBT has an advantage to enable the hot electrons to inject into the base. In this paper, InAlGaAs/InGaAs HBT with the various emitter junction gradings and the modified collectors are simulated and analyzed by HMC(Hybrid Monte Carlo) simulator in order to find a optimal structure for the shortest transit time. A minium base transit time (τ_b) of 0.21 ps was obtained for HBT with the grading layer, which is parabolically graded from $x=1.0$ to $x=0.5$. The minimum collector transit time (τ_c) of 0.31ps was found when the collector was modified by inserting p^- and p^+ layers. Thus HBT in combination with the emitter grading and the modified collector layer showed the cut-off frequency (f_T) of 183GHz.

1. 서 론

고속정보 통신의 요구에 따라 보다 빠르고 차단 주파수가 높은 고성능 HBT가 필요하다. 고성능 HBT 설계에 있어서 중요한 점은 전자의 전송을 확산에 의해서가 아니라 높은 비평형 속도 오버슈트를 이용하여

베이스 및 콜렉터 전송시간을 단축하고, 차단 주파수를 증가시키는 것이지만 비평형 고속 전송이 되도록 소자 구조를 최적화 하기란 대단히 어렵다. 비평형 고속전송은 보통 에미터-베이스를 계단접합에 의한 평탄한 베이스 속으로 열 전자 주입과, 경사형 베이스 구조에 의해 내부 전계를 형성함으로써 얻을 수 있다.[1] 이 방법으로 전자는 비평형 상태로 베이스 영역을 고속전송 할 수 있지만 베이스 폭을 최적화 하지 않으면 베이스-콜렉터 공간전하영역을 통과할 때 전자가 L밸리로 천이되어 속도가 감소하거나, 전자의 속도는 고속이라도 베이스 폭이 지나치게 작아지면 베이스 면저항이 증가하여 고속 전송의 효과가 감소할 수 있다. 따라서 베이스 폭과 경사형 베이스 구조의 최적화가 필요하다. 또한 베이스-콜렉터 공간전하영역의 전계를 밸리간 천이가 발생하지 않고 전자의 속도를 최대한 유지하면서 고속전송이 되도록 콜렉터 구조도 설계할 필요가 있다. 고성능 HBT를 구현하기 위해서는 소자 구조 뿐만 아니라 반도체 재료의 선택이 중요하다. InAlGaAs/InGaAs HBT는 높은 전자 이동도와 진동대 에너지 불연속을 넓은 범위 ($\Delta E_c: 0.53eV$)에 걸쳐 조절할 수 있는 장점 때문에 40~100Gbps 광전송시스템의 능동소자로 연구되고 있다[2].

본 논문에서는 DD(Drift-Diffusion)와 MC(Monte Carlo)를 혼합한 1차원 2-캐리어 Hybrid Monte Carlo(HMC)시뮬레이터를 이용하여, 에미터의 Al 몰비가 InAlGaAs/InGaAs HBT의 베이스 전송속도에 미치는 영향을 분석하였고, 특히 에미터-베이스 사이에 Al 몰비를 변화시킨 조성경사영역(grading)을 삽입하여, 몰비의 변화가 베이스 전송속도에 미치는 영향을 분석

하여 최적의 물비를 산출하였다. 또 콜렉터 전송시간을 단축 시킬 목적으로 콜렉터와 베이스 사이에, p형 콜렉터를 삽입하여 이 구조가 콜렉터 전송시간에 미치는 영향을 분석하고 최적구조를 설계하였다.

II. HBT의 구조

시뮬레이션에 사용된 HBT 구조는 표1에 나타내었다.

표 1. HBT의 구조와 파라미터

Layer	Material, Doping (cm ⁻³)	두께 (Å)	Al 물비
Emitter	n-AlGaAs 5×10 ¹⁷	1000	1.0
	n-AlGaAs 5×10 ¹⁷	500	1.0~0.5
Base	p ⁺ -AlGaAs 2×10 ¹⁸	1000	0
Collector (I)	n-InGaAs 5×10 ¹⁶	2500	0
	n-InGaAs 5×10 ¹⁷	500	0
Collector (II)	p-InGaAs 5×10 ¹⁶	1500	0
	p ⁺ -InGaAs 1×10 ¹⁸	200	0
	n ⁺ -InGaAs 1×10 ¹⁸	200	0
	n-InGaAs 5×10 ¹⁷	600	0

베이스에 주입되는 전자의 에너지가 베이스 전송시간에 미치는 영향을 분석하기 위해서 경사영역의 조성비를 변화시키면서 전송시간을 시뮬레이션하였다. 에미터-베이스 전이영역의 Al물비 x 는 여러 가지 주입 전자의 에너지를 얻기 위해 0.0~1.0까지 0.1씩 변화를 주어 계산하였고, 거리 y 에 대한 Al물비 x 는 식 (1)과 같이 제곱의 관계를 갖도록 포물선 형태의 조성경사를 사용하였다.

$$X(y) = X_f - X_f \left(\frac{y + y_0}{y_0} \right)^2, \quad -y_0 < y < 0 \quad (1)$$

콜렉터 전송시간을 단축시키기 위하여 표1의 콜렉터II 구조를 설정하여 시뮬레이션 하였다.

III. 결과 및 분석

1) 에미터 시뮬레이션

에미터-베이스 경계에서 Al 물비 성분 x 는 소자의 (활성영역에서) 전송시간에 상당한 영향을 준다. 그림 1는 여러 종류의 x 에 대한 베이스 전송시간(τ_b)과 콜렉터 전송시간(τ_c)을 나타내었다. $x=0.0$ 인 완전경사형 에미터-베이스 접합의 경우 전도대에 에너지 장벽($\Delta E_C=0$)이 존재하지 않으므로, 베이스 영역에서 전자의 전송은 주로 확산에 의해서 이루어진다.

x 가 증가할수록 ΔE_C 가 커지고 전자는 에너지 장

벽만큼 확실한 운동에너지를 갖고 베이스 쪽으로 주입되며 비평형 전송을 하게 되므로 τ_b 가 감소하게 된다. 그러나, 주입에너지가 너무 크면 L-밸리로 천이하게 되어 오히려 전송속도는 감소하게 되므로 적절한 에너지를 갖도록 물비를 조절할 필요가 있다.

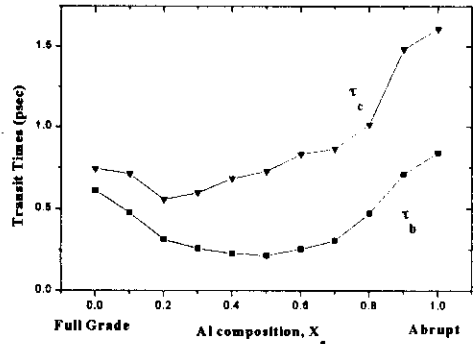


그림 1. Al 물비 x 에 대한 전송시간
 τ_b : 베이스, τ_c : 콜렉터 전송시간
 $J_C = 0.15 \times 10^6 A/cm^2$, $V_{CE} = 1.6V$

그림 1에서와 같이 $x=0.5$ 에서 최고의 속도를 나타내었으며, 물비가 증가함에 따라 최종에너지는 증가한다

전자들은 SCR 내 높은 전계 때문에 가속되어 L-밸리로 천이하므로 전자의 속도는 비평형 고속을 더 이상 유지할 수 없다. 따라서 에미터-베이스 접합의 경사형이나, 계단형 모두 최대 전송을 위한 충분조건이 될 수 없으며 소자의 속도를 증가하거나 최적 전송을 위하여 물비 x 값의 최적 조건의 산출이 필요하다. 소자 전체 전송시간 τ_{ec} 는 $x=0.5$ 일 때 최소값을 갖는다. 전자의 전송속도 분포(그림 2)와 전자의 전도대 에너지 분포(그림 3)를 보면 더욱 더 소자의 동작을 이해할 수 있다.

베이스 영역에서 $x=0.5$ 몰일 때 에미터로부터 주입되는 전자가 중간 정도의 에너지를 갖고 주입되기 때문에 L-밸리의 천이 없이 Γ -밸리에서의 가속으로 인한 가장 높은 속도를 갖는다. 그러나 $x=0.0$ 이나 $x=1.0$ 일 때 전자의 속도는 확산에 의한 전송과 초기 에너지가 급격히 증가하기 때문에 대부분의 전자가 L-밸리로 천이되기 때문에 보다 적은 것을 볼 수 있다. 위에 논의된 전송 메커니즘을 그림 3의 결과로부터 확실하게 이해할 수 있다.

그림 3a인 경우 베이스 내 전자들은 Γ 밸리의 바닥에 누적되어 있다. 따라서 전송은 확산에 의해 이루어진다. 그러나 그림 3b의 경우 전자들은 베이스의 Γ 밸리에서 중간적인 운동 에너지를 가지고 비평형 고속

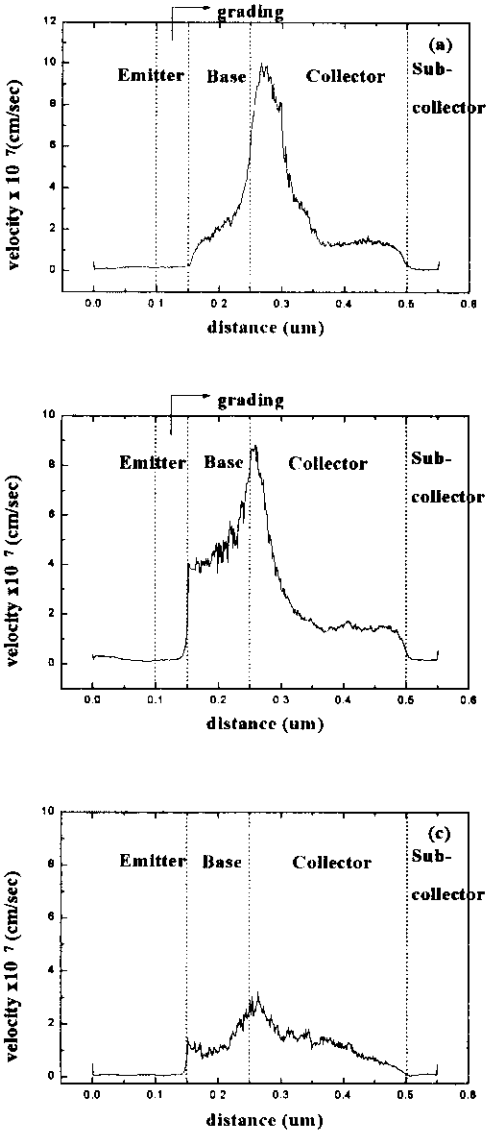


그림 2. a) 완전경사형 HBT b) $x=0.5$ 의 경사형 HBT c) 계단형 HBT의 전자전송속도 분포 ($J_c=0.15 \times 10^6$ A/cm², $V_{CE}=1.6V$).

전송을 한다. 그림 3c 인 경우 전자는 베이스로 들어갈 때 보다 큰 에너지(0.53eV)로 인해 L벨리로 천이하기 때문에 속도가 작고, 전송시간이 크며, 대부분 전자는 L벨리에 존재한다. 시뮬레이션 결과 가장 빠른 Al 물비 $x=0.5$ 일 때 베이스 전송시간은 0.21psec이고 콜렉터 전송시간은 0.62 psec이었다

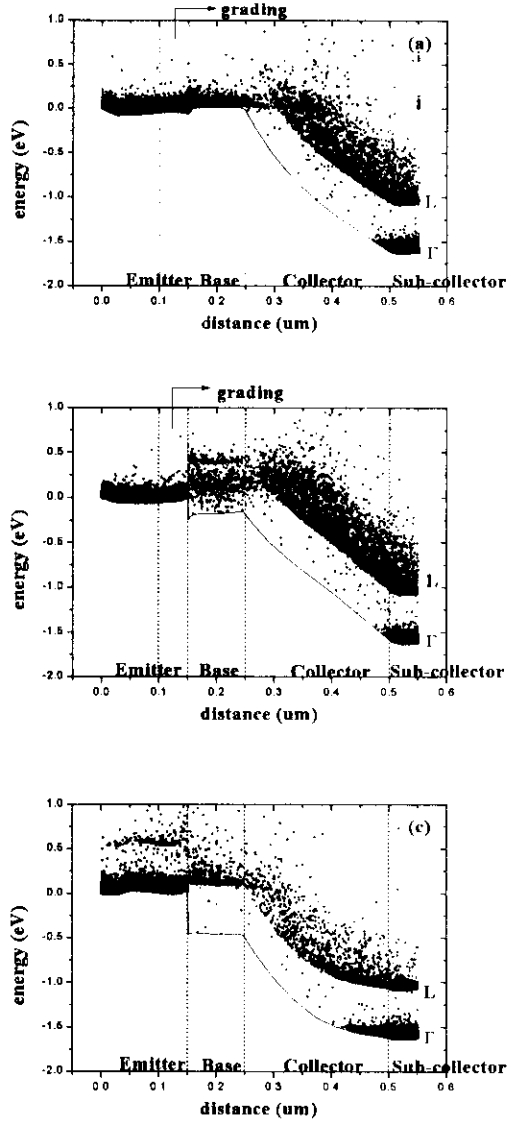


그림 3. a) 완전 경사형 HBT와 b) $x=0.5$ 경사형 HBT c) 계단형 HBT의 전자의 전도대 에너지 분포 ($J_c=0.15 \times 10^6$ A/cm², $V_{CE}=1.6V$)

2) 콜렉터 시뮬레이션

BCT구조에서는 콜렉터 바이어스 조건이 대단히 중요하다. 즉 전자의 전송이 콜렉터 내의 Γ벨리에서만 효과적으로 가속되기 위해서는 적절한 바이어스 전압이 필요하다.

그림4은 $V_{BC}=-0.5V$ 에서의 전자의 속도 분포를 보여준다. 그림4 콜렉터II에서는 두 개의 속도 첨두가 발

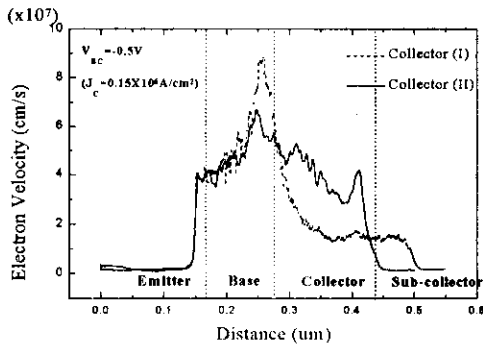


그림 4. 콜렉터 I, II의 전자속도 분포($V_{BC}=-0.5V$)

견되는데 처음 침투는 베이스에서 콜렉터 속으로 부분적 hole의 침투 때문에 전압강하가 베이스-콜렉터 접합면의 콜렉터 부분에 형성되어 전자가 콜렉터에 주입할 때 에너지를 얻게된다. 따라서 전자는 L-밸리로 천이하여 속도가 감소되므로 첫 번째 침투가 형성된다.

두 번째 침투는 콜렉터 바이어스 전압에 의하여 콜렉터 공핍영역의 중간부분에서 전자들이 L-밸리로 천이되게 하여 속도를 감소시키기 때문이다(그림 5 참조).

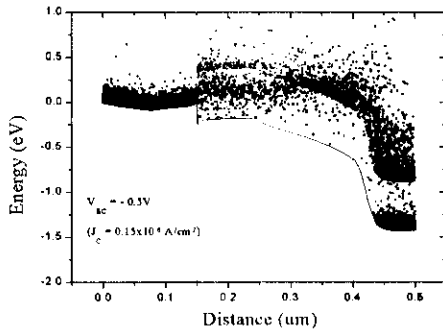


그림 5. 콜렉터 II의 전자에너지 분포($V_{BC}=-0.5V$)

그림4를 보면 콜렉터 공핍영역에서의 두 콜렉터의 전자 속도의 차이는 에너지밴드의 휘어짐 때문이다(그림6 참조). 콜렉터 II에서 전자 또는 이온화된 억셉터에 의해서 만들어진 공간전하영역의 음전하가 콜렉터 내의 에너지밴드를 위로 올라가게 한다. 이것은 전자가 L-밸리에서 먼 거리까지 전송을 가능케하며 콜렉터 II가 상대적으로 높은 전송속도를 야기 시킨다. 대조적으로 콜렉터 I는 n⁻ 콜렉터 층이 밴드의 휘어짐을 억제하고, 전자의 전송이 밸리간 산란을 일으켜 속도를 감소시킨다. 시뮬레이션결과 가장 빠른 Al 몰비 $x=0.5$ 일 때 베이스 전송시간은 0.21 psec이고, 콜렉터 전송

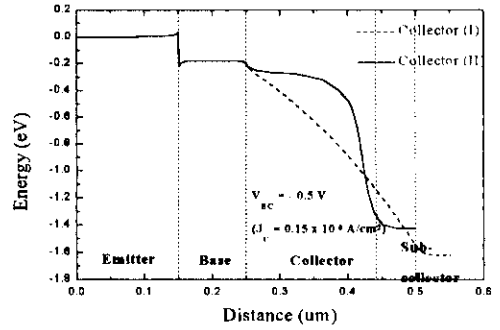


그림 6. 콜렉터 I, II의 에너지 밴드

시간은 0.31 psec이었다. 가장 빠른 콜렉터 II 구조에서 f_T 는 183GHz의 속도를 나타내었다

V. 결론

HMC 시뮬레이션을 사용하여 InAlGaAs/InGaAs HBT에서 에미터에 Al몰비를 변화 시킨 조성경사 영역을 삽입하여 몰비 변화가 전자의 비평형 고속전송에 미치는 영향을 분석하였고, 또 콜렉터를 변형한 구조가 전자의 전송에 미치는 영향을 분석하였다. Al 몰비 $x=0.5$ 일 때 에미터로부터 베이스로 주입되는 전자가 L-밸리에서 적절한 에너지를 가지므로 베이스 전송시간($\tau_b=0.21$ psec)이 짧았다. 변형된 콜렉터 구조에서 베이스-콜렉터 바이어스 전압이 전송속도에 미치는 영향을 조사한 결과 $V_{BC}=-0.5V$ 일 때 가장 콜렉터 전송시간($\tau_c=0.31$ psec)이 짧음을 알 수 있었다. 또 B/C 공간 전하 영역의 높은 전계 때문에 속도의 감소를 보완해 주기 위하여 변형된 콜렉터 II 구조에서 전송시간이 가장 짧음을 알 수 있었다. 따라서 Al몰비가 $x=0.5$ 일 때와 콜렉터 II의 구조일 때 $\tau_{ec}=0.87$ psec이었고 $f_T=183GHz$ 로서 최적전송속도를 나타내었다.

참고문헌

1. D. Ritter et al., "Diffusive base transport in narrow base InP/Ga_{0.47}In_{0.53}As heterojunction bipolar transistor," Appl. Phys. Lett., vol.59, pp.3431, 1991
2. H. Nakajima et al., "Monte Carlo analysis of non-equilibrium electron transport in InAlGaAs/InGaAs HBT's," IEEE Trans. Electron Dev., vol. 40, pp.1950, 1993.
3. 이경락, 황성범, 송정근, "Hybrid Monte Carlo 시뮬레이션에 의한 InAlAs/InGaAs HBT의 전자전송 해석," 한국전기전자재료학회, 1997.