論文99-36D-3-9

Hybrid Monte Carlo 시뮬레이션에 의한 고속 InAlGaAs/InGaAs HBT의 구조 설계

(Design of high speed InAlGaAs/InGaAs HBT structure by Hybrid Monte Carlo Simulation)

黃 成 凡 *, 金 勇 圭 **, 宋 政 根 ***, 洪 昌 憙 ***

(Sung-Bum Hwang, Young-Kyu Kim, Chung-Kun Song, and Chang-Hee Hong)

요 약

HMC(Hybrid Monte Carlo)시뮬레이션을 이용하여 InAlGaAs/InGaAs HBT의 비평형 고속전송을 해석하였고, 전송시간 및 차단주파수를 향상시키기 위하여 에미터-베이스 이종접합과 콜렉터 구조를 최적 설계하였다. 시뮬레이션 결과, 에미터 조성경사영역에서 Al 몰비를 x_f=1.0에서 x_f=0.5로 변화시킬 경우 베이스 전송시간이 τ_b=0.21ps로 가장 짧았다. 콜렉터 전송시간을 단축시킬 목적으로 콜렉터와 베이스 사이에 n^+형(콜렉터-Ⅰ), i형(콜렉터-Ⅱ), p형(콜렉터-Ⅲ), 콜렉터를 삽입하여 베이스-콜렉터 공간전하영역의 전계분포를 전자의 비평형고속전송을 유지하도록 설계하였다. 콜렉터-Ⅲ 구조에서는 전자와 음이온화된 억셉터가 콜렉터의 전계를 감소시킴으로써 전자가 Γ 밸리에서 먼 거리까지 전송을 가능하게 하여 가장 짧은 콜렉터 전송시간을 나타내었다. 결론적으로 가장 짧은 전송시간 τ_{ec}는 Al 몰비가 x_f=0.5인 에미터 구조와 콜렉터-Ⅲ에서 0.87psec이었고, 차단주파수 f_T=183GHz를 나타내었다.

Abstract

InAlGaAs/InGaAs HBTs with the various emitter junction gradings(xf=0.0-1.0) and the modified collector structures (collector-Ⅰ; n^+-p^+-n^+, collector-Ⅱ; i-p^+-n^+, collector-Ⅲ; p-p^+-n^+) are simulated and analyzed by HMC (Hybrid Monte Carlo) method in order to find an optimum structure for the shortest transit time. A minimum base transit time(τ_b) of 0.21ps was obtained for HBT with the grading layer, which is parabolically graded from x_f=1.0 and xf=0.5 at the emitter-base interface. The minimum collector transit time(τ_c) of 0.31ps was found when the collector was modified by inserting p-p^+-n^+ layers, because p layer makes it possible to relax the electric field in the i-type collector layer, confining the electrons in the Γ-valley during transporting across the collector. Thus InAlGaAs/InGaAs HBT in combination with the emitter grading(x_f=0.5) and the modified collector-Ⅲ showed the transit times of 0.87 psec and the cut-off frequency (f_T) of 183 GHz.

* 正會員, 慶南情報大學 電子情報學部 電子情報通信科
(Dept. of Electronic information communication, Kyungnam Collage of Information & Technology)
** 正會員, 大邱機能大學 매카트로닉스學科
(Dept. of Mechatronics, Tae-Gu Polytechnic Collage)
*** 正會員, 東亞大學校 電氣電子컴퓨터工學部
(Dept. of Electric & Electronic & Computer Engineering, Dong-A University)
接受日字:1998年9月18日, 수정완료일:1999年3月2日

Ⅰ. 서 론

InGaAs HBT는 InGaAs의 뛰어난 전송특성 때문에 고속 디지털 시스템, 마이크로파 또는 광통신 시스템에 널리 사용될 전망이다. 고속 InGaAs HBT로 100GHz 이상의 높은 차단주파수를 얻을 수 있지만 더 큰 차단주파수를 얻기 위한 HBT 구조 설계가 계속해서 진행되고 있다[1-2]. HBT 주파수 영역을 확장시키는 중요한 문제는 소자 내 전자의 전송을 비평형 고속 전송이 되도록 소자 구조를 최적화하여 베이스 전송시간과 콜렉터 전송시간을 줄이는데 있다.

비평형 고속 전송은 소자 구조의 여러 파라미터의 영향을 받는다. 비평형 고속전송을 위하여 에미터-베이스 계단접합의 에너지 단차에 의한 열전자 주입과, 경사형 베이스 구조의 내부 전계를 이용할 수 있다[3-5]. 이 방법으로 전자를 비평형 상태로 베이스 영역을 고속전송할 수 있지만 베이스 폭을 최적화하지 않으면 베이스-콜렉터 공간전하 영역을 통과할 때 전자가 L 밸리로 천이되어 속도가 감소하거나, 전자의 속도는 고속이더라도 베이스 폭이 지나치게 작아지면 베이스 면저항이 증가하여 고속전송의 효과가 감소할 수 있다. 따라서 베이스 폭과 경사형 베이스 구조의 최적화가 필요하다. 또한 베이스-콜렉터 공간전하영역의 전계를 밸리간 천이가 발생하지 않고 전자의 속도를 최대로 유지하면서 고속전송이 되도록 콜렉터 구조도 설계할 필요가 있다.

$In_{0.53}(Al_xGa_{1-x})_{0.47}As$/InGaAs HBT의 경우 에미터-베이스의 에너지 단차는 최대 x_f=1일 때, ΔEc=0.53eV를 갖는다. 이 큰 에너지 단차 때문에 전자는 큰 운동에너지를 갖고 베이스로 주입하여 비평형 고속전송을 이루어 베이스 전송시간을 단축할 수 있다. 그러나, 이 에너지가 너무 크면 전자들이 쉽게 L 밸리(Γ와 L밸리 사이의 에너지 간격 $\Delta E_{\Gamma,L}$=0.56eV)로 천이하여, 전송속도가 오히려 감소하므로 최대 전송속도를 위한 Al 몰비 x_f의 최적값 산출이 필요하다. 이러한 연구는 Tomizawa 등이 선형경사영역을 사용하여 수행하였고[1], 본 논문에서는 포물선 경사영역을 사용하여 시뮬레이션하였다. 이것은 포물선 경사가 선형경사보다 에미터 주입효율이 우수하기 때문이다[6].

콜렉터 전송시간을 줄이기 위해서는 첫째, 콜렉터층의 두께를 줄이는 방법과 둘째, 비평형 고속전송을 콜렉터 내에서 가능한 오랫동안 지속하기 위해 콜렉터 공간전하 영역에 전계의 공간적 분포를 최적화시키는 방법, 마지막으로 HBT의 기생요소를 줄임으로서 콜렉터 캐패시턴스 충전시간을 감소시키는 방법 등이 있다. 특히 콜렉터 공간전하영역의 전계를 완화시킬 목적으로 콜렉터와 베이스 사이에 p-형 콜렉터와 진성 콜렉터 그리고, n-형 콜렉터를 삽입한 AlGaAs/GaAs HBT는 연구된 적이 있지만[2] InGaAs HBT에 대한 연구는 아직 이루어지지 않았고, 본 논문에서 이에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

본 논문에서는 DD(Drift-Diffusion)와 MC(Monte Carlo)를 혼합한 1차원 2 캐리어 Hybrid Monte Carlo(HMC) 시뮬레이터[7]를 이용하여, 에미터의 Al 몰비가 InAlGaAs/InGaAs HBT의 베이스 전송속도에 미치는 영향을 분석하였고, 특히 에미터 베이스 사이에 Al 몰비를 변화시킨 조성변화영역(grading)을 삽입하여, 몰비의 변화가 베이스 전송속도에 미치는 영향을 분석하여 최적의 몰비를 산출하였다.

또한, 콜렉터 전송시간을 단축시킬 목적으로 콜렉터와 베이스 사이에 n^+형, i형, p형, 콜렉터를 삽입하여 이 변형된 구조가 콜렉터 전송시간에 미치는 영향을 분석하고 최적구조를 설계하였다.

Ⅱ. HBT 구조와 시뮬레이션 모델

1. 베이스 고속전송을 위한 에미터 설계

먼저 에미터-베이스의 전도대 에너지 단차가 전자의 베이스 전송에 미치는 영향을 분석하기 위하여 표 1의 A와 같은 구조로 에미터와 베이스 사이에 조성변화영역을 삽입하여 Al 몰비를 변화시키면서 시뮬레이션하였다. 조성변화영역의 Al 몰비 x는 여러 가지 주입 전자의 에너지를 얻기 위해 1.0(계단형)과 0.0~0.9(경사형)까지 0.1씩 변화를 주어 계산하였고, 거리 y에 대한 Al몰비 x는 식 (1)와 같이 제곱의 관계를 갖도록 포물선 형태의 조성경사를 사용하였다.

$$x(y)=1-(1-x_f)\left(\frac{y+y_o}{y_o}\right)^2, \quad -y_o<y<0 \tag{1}$$

여기서 x_f는 조성경사영역에서 베이스 쪽 즉, y=0에서 Al 몰비를 나타낸다.

2. 콜렉터 고속전송을 위한 콜렉터 설계

표 1의 구조에서 에미터 조성경사영역의 최적 Al 몰비 x_f=1.0→0.5를 산출하였고, 이 구조를 이용하여

최적 콜렉터 구조를 설계하기 위하여 표 1의 B와 같이 세가지 콜렉터 구조에 대하여 시뮬레이션하였다.

표 1. 시뮬레이션에 사용된 HBT 구조
Table 1. Structure of HBT for simulation.

영 역	반도체	도핑농도 (cm^{-3})	두께 (Å)	몰비
에미터	$In_{0.53}Al_{0.47}As$	5×10^{17}	1000	1.0
조성경사	$In_{0.53}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.47}As$	5×10^{17}	500	1.0 -0.0
베이스	$In_{0.53}Ga_{0.47}As$	2×10^{18}	1000	0
콜렉터A	$In_{0.53}Ga_{0.47}As$	5×10^{16}	2500	0
서브-콜렉터	$In_{0.53}Ga_{0.47}As$	5×10^{17}	1500	0
콜렉터 B	n-InGaAs(콜렉터-Ⅰ)	1×10^{16}	1500	0
	i-InGaAs(콜렉터-Ⅱ)		1500	0
	p-InGaAs(콜렉터-Ⅲ)	5×10^{16}	1500	0
	p^+-InGaAs	1×10^{18}	200	0
	n^--InGaAs	1×10^{18}	200	0
서브-콜렉터	n-InGaAs	5×10^{17}	600	0

공간전하영역의 충전시간의 영향을 보기 위하여 높은 콜렉터 전류밀도($Jc=0.15\times10^6$ A/cm^2)에 시뮬레이션을 실행하였다.

HMC로부터 얻을 수 있는 소자의 성능평가 지수는 콜렉터 전류, 차단주파수, 전송시간, 표동속도 및 에너지 분포 그리고 밸리의 전자 점유율 등이다. 전송시간과 차단주파수는 식 (2)과 같이 계산하였다.

$$\tau_k = \sum_{i=0} \frac{1}{v_i} \cdot dy \qquad f_T = \frac{1}{2\pi\tau_k} \tag{2}$$

표 2. $In_{0.53}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.47}As$의 물성파라미터
Table 2. Material parameters of $In_{0.53}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.47}As$.

파라미터	근사식
Γ 밸리에서의 전자유효질량 $m_\Gamma(m_0)$	$0.041+0.033x$
L 밸리에서의 전자유효질량 $m_L(m_0)$	0.29
에너지 간격 Eg(eV)	$0.764+0.495x+0.203x^2$
전자 친화력 χ(eV)	$4.6-0.53x$
Γ밸리와 L 밸리사이의 에너지 간격 $\Delta E_{\Gamma L}$(eV)	$0.56+0.01x$
유전상수 ε_s	$13.7+1.0x$

여기서 v_i는 각 전자의 속도를 나타내고, dy는 매시(mesh) 간격을 나타낸다. 시뮬레이션에 사용된 물성 파라미터는 표 2와 같다.

MC에서 고려된 산란 메커니즘은 acoustic phonon, polar optical phonon, non-polar optical phonon, ionized impurity, inter-valley, plasmon scattering 등이다.

Ⅲ. 결과 및 분석

1. 베이스 고속전송을 위한 에미터 설계

조성변화영역의 Al 몰비 x는 소자의 전송시간에 상당한 영향을 준다.

베이스에서 전자의 속도는 전자가 조성변화영역에서 베이스로 주입할 때 에너지 단차(ΔEc)에 의한 에너지 증가와 조성변화영역에서 가속되면서 얻게 되는 에너지(ΔE)에 의하여 결정된다. 따라서, ΔEc와 ΔE를 적절히 조절하여($\Delta Ec+\Delta E < \Delta E_{\Gamma\text{-}L}$: x_f=0.0일 때 0.56eV) 전자가 L 밸리로 천이되지 않도록 함으로써 베이스에서 전자의 속도가 최대가 되도록 설계하여야 한다.

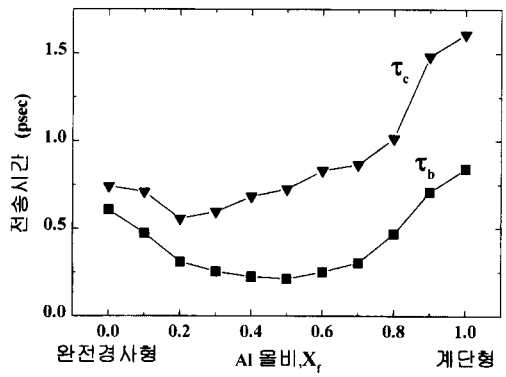
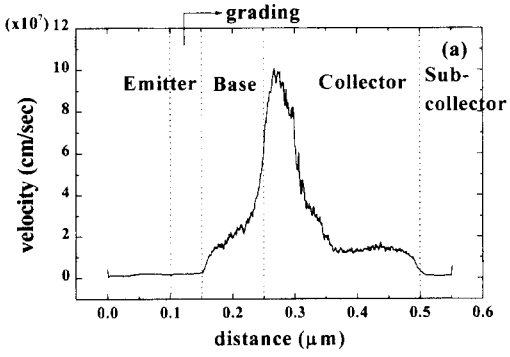


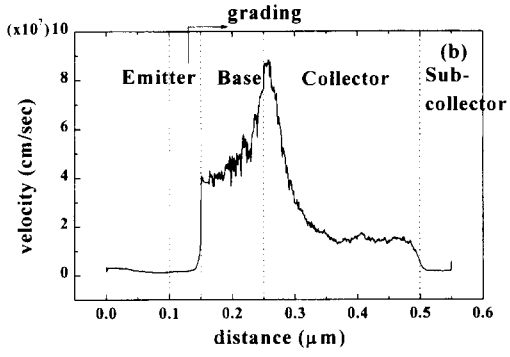
그림 1. Al 몰비 x_f에 대한 전송시간
Fig. 1. The transit times vs. Al mole-fraction.
τ_b : 베이스, τ_c: 콜렉터 전송시간
$J_C=0.15\times10^6 A/cm^2$, $V_{CE}=1.6V$

그림 1은 표 1의 콜렉터 A를 사용했을 경우 Al 몰비 x_f에 대한 베이스 전송시간(τ_b)과 콜렉터 전송시간(τ_c)을 나타내었다. x_f=0.0인 완전경사형 접합의 경우 에미터-베이스 사이의 전도대 에너지 단차가 존재하지 않으므로, 베이스 영역에서 전자의 전송은 주로 확산에 의해 이루어지기 때문에 전송 시간은 크게 나타난다. x_f가 증가할수록 전도대 에너지 단차(ΔE_c)가

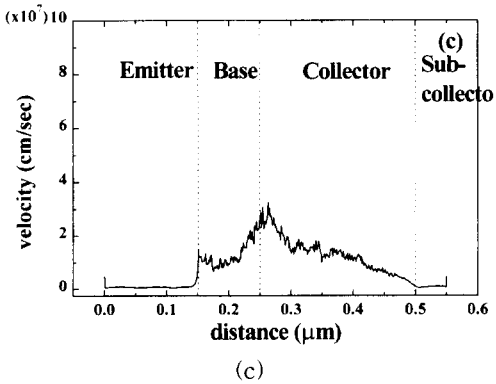
점점 커지고, 전자는 에너지 단차만큼 큰 운동에너지를 갖고 베이스 쪽으로 주입되어 비평형 고속전송을 하게 되므로 베이스 전송시간(τ_b)이 감소하게 된다. 그러나, Al 몰비 x_f=0.6이상인 경우 주입 에너지가 너무 커서 전자가 쉽게 L밸리로 천이하게 되어 오히려 전송속도는 감소함을 볼 수 있다.



(a)



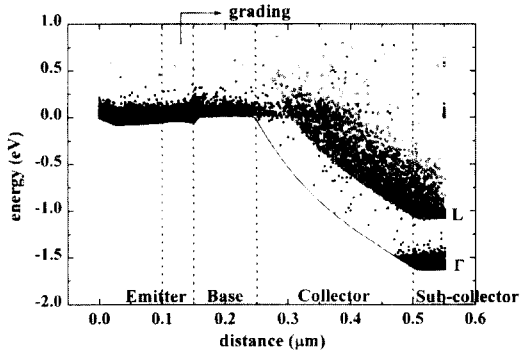
(b)



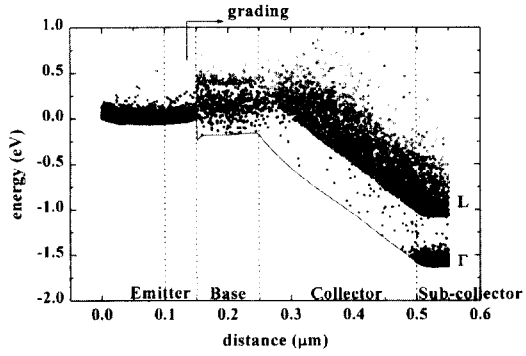
(c)

그림 2. a) 완전경사형 HBT b) x_f=0.5의 경사형HBT c) 계단형 HBT의 전자전송속도 분포 (J_C=0.15x10^6 A/cm^2, V_{CE}=1.6V)

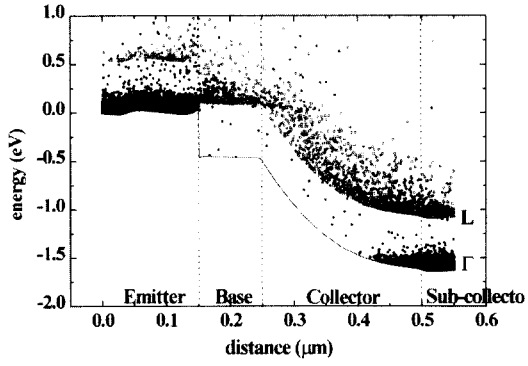
Fig. 2. The velocity distribution of a) the grading HBT b) the grading HBT(x_f=0.5) c) the abrupt HBT (J_C=0.15x10^6 A/cm^2, V_{CE}=1.6V).



(a)



(b)



(c)

그림 3. a) 완전경사형 HBT와 b) x_f=0.5 경사형 HBT c) 계단형 HBT의 전자의 전도대 에너지 분포 (J_C=0.15x10^6 A/cm^2, V_{CE}=1.6V)

Fig. 3. The electron distribution in conduction band of a) the grading HBT b) the grading HBT(x_f=0.5) c) the abrupt HBT (J_C=0.15x10^6 A/cm^2, V_{CE}=1.6V)

전자의 전송속도 분포(그림 2)와 전자의 전도대 에너지 분포(그림 3)를 보면 더욱 더 소자의 동작을 잘 이해할 수 있다. 베이스 영역에서 x_f=0.5 몰일 때 에미터로부터 주입되는 전자는 에너지 ΔE_C=0.27eV의

초기 에너지로 갖고 주입되므로 전송속도가 크고, 이 에너지는 베이스의 Γ와 L 밸리간 에너지 $\Delta E_{\Gamma L}$=0.56eV 보다 작기 때문에 Γ 밸리에서 비평형 고속 전송을 유지할 수 있게 되어 가장 높은 속도를 갖는다. 그러나, x_f=0.0이나 x_f=1.0일 때 전자의 속도는 확산에 의한 전송과 초기 에너지가 급격히 증가(ΔE_c=0.53eV)하여 대부분의 전자가 L 밸리로 천이되기 때문에 속도가 감소함을 볼 수 있다. 위에서 논의된 전송 메커니즘을 그림 3의 전자의 에너지 분포로부터 확실하게 이해할 수 있다.

그림 3(a)인 완전경사형인 경우 베이스 내 전자들은 Γ 밸리의 바닥에 분포되어 있다. 따라서 전송은 확산에 의해 이루어진다. 그러나, 그림 3(b)의 x_f=0.5의 부분적 경사형인 경우 전자들은 베이스의 Γ 밸리에서 중간적인 에너지를 가지고 비평형 고속전송을 한다. 그림 3(c)의 계단형인 경우 전자는 베이스로 들어갈 때 전도대 에너지 차 ΔEc=0.53eV를 초기 에너지로 갖게 되고 이것은 베이스의 밸리간 에너지 차이 $\Delta E_{\Gamma L}$=0.56eV에 가까운 에너지이므로 전자는 곧 L 밸리로 천이하기 때문에 속도가 감소하여 전송시간이 길어지며, 대부분 전자는 L밸리에 존재한다.

베이스 전송시간과 대조적으로 콜렉터 전송시간 τ_c는 그림 1에서 보듯이 Al 몰비 x_f에 따라 단조롭게 증가한다. x가 적은 경우는 베이스 전자의 에너지가 작아서 대부분 전자는 Γ 밸리에 존재한다. 이 전자들이 베이스-콜렉터 접합에 도달했을 때 공핍영역의 높은 전계에 의해 가속되어 그림 3(a)에서 보듯이 공핍영역 내에서 얼마간 높은 에너지를 갖고 비평형 고속 전송을 하게 된다.

그러나, 이 전자들은 가속되어 L 밸리로 곧 천이하므로 전자의 속도는 그림 2(a)에서 보듯이 다시 감소한다. x_f가 클 경우 베이스로 들어오는 전자들의 초기 에너지 증가로 공핍영역 속으로 들어오는 전자들의 초기 에너지도 증가한다. 보다 큰 초기 에너지를 갖는 전자는 쉽게 L 밸리로 천이하여 공핍영역 내 최대속도의 영역이 그림 2(b)에서 보듯이 좁게 되어 콜렉터 전송시간 τ_c가 증가한다.

시뮬레이션 결과 베이스 전송시간(τ_b=0.21psec)이 가장 짧은 Al 몰비 x_f 값은 0.5이고, 그 때 콜렉터 전송시간(τ_c)은 0.62psec이었다. 선형경사를 사용한 Tomizawa의 경우 베이스 최소전송시간이 x_f=0.6에서 나타났다[1]. 이것은 포물선 경사의 경우 조성경사영역에서 전자가 더 빨리 가속됨을 의미한다.

2. 콜렉터 고속전송을 위한 콜렉터 설계

그림 4는 표 1의 x_f=0.5 에미터 조성경사와 콜렉터 B 구조에서 3개의 변형된 콜렉터 구조에 대한 베이스-콜렉터 바이어스 전압 V_{BC}와 차단주파수 f_T의 관계를 보여준다.

모든 콜렉터 구조에 대하여 콜렉터 바이어스 전압 V_{BC}의 증가에 따라 f_T가 가파른 증가를 나타낸다.

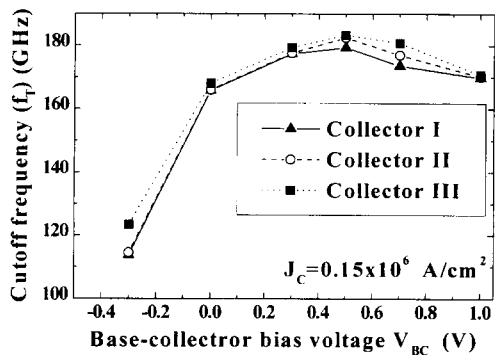
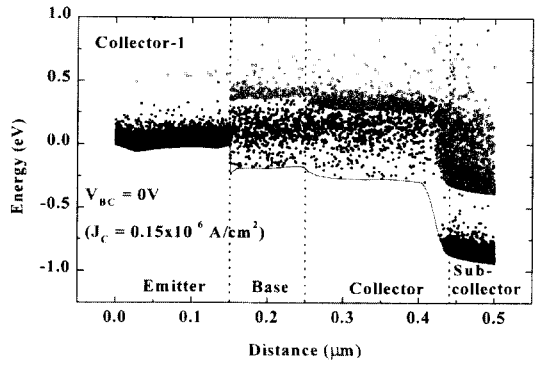


그림 4. V_{CB}에 대한 콜렉터-I,II,III의 차단주파수
Fig. 4. The dependence of fT on V_{CB} for collector-I,II and III.

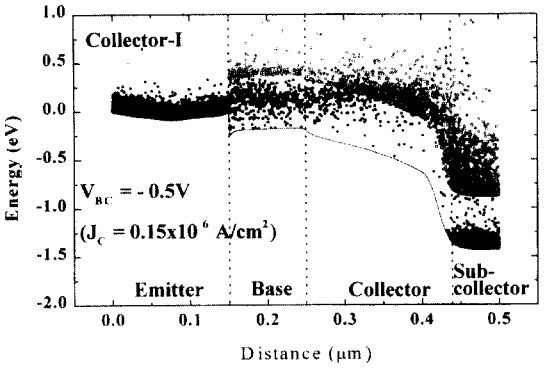
이것은 콜렉터 내에서 전자의 고속 전송은 콜렉터 바이어스 전압에 강하게 의존한다는 것을 의미한다.

V_{BC}=0V 근처에서 f_T의 가파른 상승은 고속 전자 전송을 위해서, 콜렉터 층에서 적절한 내부 전계가 형성되었다고 이해할 수 있다. 또한 높은 콜렉터 바이어스 전압에서 f_T의 감소는 콜렉터 내 높은 전계 때문에 밸리간 천이에 의하여 속도가 감소하였기 때문이다.

이것은 그림 5(a),(b) 전자의 에너지 분포를 보면 분명히 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 5. 콜렉터-I 구조에서 (a) V_{BC}=0V and (b) V_{BC}= 0.5V 일 때 전도대의 전자분포

Fig. 5. The electron distribution in conduction band for collector-I at (a) V_{BC}=0V and (b) V_{BC}= 0.5V

낮은 콜렉터 바이어스 전압 V_{BC}=0V 인 그림 5(a)를 보면, n+ 콜렉터 층에서 다수의 전자가 Γ 밸리에 남아 있는 것을 볼 수 있고, 대조적으로 V_{BC}=0.5V 인 그림 5(b)에서는 n+ 콜렉터 층 중간 지점에서 상위 밸리로 밸리간 천이가 일어나는 것을 알 수 있다. 바이어스 전압 V_{BC}= 0.5V 일 때 f_T가 가장 크며, 세 가지 콜렉터 구조가 앞 에미터 설계에서 사용된 콜렉터 구조의 f_T (170GHz)값 보다 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다.

다음 식 (3)으로 정의된 콜렉터 지연 시간 τ_c를 계산함으로써 공간전하 효과를 평가할 수 있다.

$$\tau_c = \frac{W_{BC}}{2\upsilon_c} + \gamma_E C_{BC} \qquad (3)$$

여기서 W_{BC}는 콜렉터 공핍영역의 폭, υ_c는 공핍영역에서의 유효 전자속도, γ_E는 에미터 저항, C_{BC}는 콜렉터 캐패시턴스이다.

식 (3)의 오른쪽 편의 첫째 항은 콜렉터 전송 시간이고, 두 번째 항은 공간전하 효과를 반영하는 콜렉터 캐패시턴스 충전 시간이다. V_{BC}=0V 와 0.5V에서 콜렉터-Ⅰ, 콜렉터-Ⅱ, 콜렉터-Ⅲ 구조에 대한 계산된 전송시간을 표 3에 나타내었다. 두 콜렉터 바이어스 전압에서 전송시간은 콜렉터-I, 콜렉터-II, 콜렉터-Ⅲ 순서대로 작게 나타났다.

그림 6(a)의 V_{BC}=0V 에서 콜렉터 지연 시간의 전송 시간 성분인 전자의 속도 분포를 보면 콜렉터 공핍영역에서 모든 콜렉터의 경우 속도가 거의 같다. 그러나, 그림 6(b)의 V_{BC}=0.5V 에서 세 콜렉터의 경우 속도의 차이는 매우 큰 차이가 난다.

표 3. 세가지 콜렉터 구조에 대한 콜렉터 전송시간

Table 3. The collector transit times for three collectors.

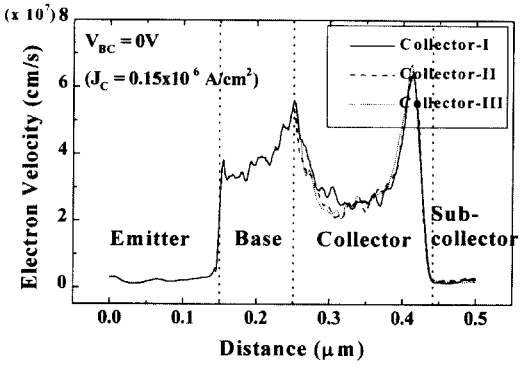
Bias voltage	콜렉터-I	콜렉터-II	콜렉터-III
V_{BC}=0V	0.410	0.410	0.397
V_{BC}=0.5V	0.337	0.322	0.318

(Jc=0.15×10^{6}A/㎠, unit : ps)

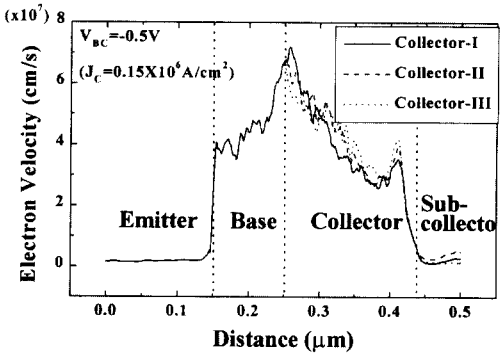
전자의 속도는 콜렉터-Ⅲ, 콜렉터-Ⅱ 콜렉터-Ⅰ 순서대로 콜렉터 공간전하영역에서 큰 값을 갖는다. 세 콜렉터의 전자속도 차이는 밴드의 휘어짐 때문이다. 콜렉터-Ⅲ에서 전자 또는 이온화된 억셉터 이온에 의해서 만들어진 공간전하영역의 음전하가 콜렉터 내 밴드를 위로 올라가게 한다(그림7 참조). 이것은 전자가 Γ밸리에서 먼 거리까지 전송을 가능케 하며 콜렉터-Ⅲ가 상대적으로 높은 전자의 속도를 유지한다. 대조적으로 콜렉터-Ⅰ는 n$^+$-콜렉터 층이 밴드 휘어짐을 억제하고, 전자의 전송이 밸리간 천이를 일으켜 속도를 감소시킨다. 이로 인해 f_T의 상대적으로 빠른 감소를 가져다준다. 밴드의 휘어짐은 베이스로부터 콜렉터로 많은 정공이 주입(그림 8 참조)하여 전자와 이온화된 억셉터에 의해 만들어진 공간전하영역의 음전하의 영향을 감소시키기 때문이다. p$^+$-p$^+$-n$^+$ 콜렉터에서 정공의 농도가 10^{16}㎝$^{-3}$ 정도 도달되면 콜렉터 공핍영역의 다소 감소한다. 이 공핍영역의 변화가 콜렉터 충전시간의 변화를 가져다주는데, 본 연구에 사용된 소자의 구조에서 V_{BC}= 0.5V 일 때 공핍영역의 변화를 계산해 보면, ΔW_{BC}는 약 10Å이다. 이 값으로 콜렉터 충전시간을 계산하면, 약 0.01-0.02 psec의 값을 갖는다. 이 값은 전송시간(약 0.3-0.4 psec)에 비해 매우 적은 값이다. 따라서 콜렉터 지연시간은 주로 전송시간에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

그림 6(a)에서 두 개의 속도 첨두가 발견되나, 첫 첨두는 그림 5(a)에서 보듯이 베이스에서 콜렉터 속으로 부분적 정공의 침투 때문에 베이스 콜렉터 경계면에 전압강하가 발생하여 이것이 전자의 전송에 주입장치로 작용하여 높은 속도를 야기시킨다.

두 번째 첨두는 p^+-n^+ 층의 확산영역 때문에 생겨나는 높은 전계에 의한 급한 속도의 감소 때문에 형성된다. 그러나 그림 6(b)는 그림 6(a)와 같지 않다. 이것은 높은 콜렉터 바이어스 전압에 의하여 콜렉터 공핍영역의 중간부분에서 전자들이 산란하여 상위 밸리로 천이함으로써 속도가 감소하기 때문이다.



(a)



(b)

그림 6. (a) V_{BC}=0V and (b) V_{BC}=0.5V 일 때 콜렉터 전자 속도 분포

Fig. 6. The electron velocity profile of the collectors at (a) V_{BC}=0V and (b) V_{BC}=0.5V.

결론적으로 콜렉터 지연시간은 콜렉터 전송시간과 콜렉터 캐패시턴스 충전시간으로 구성되어 있다. 그러나, 콜렉터 캐패시턴스 충전시간(약 0.01~0.02 psec)은 콜렉터 전송시간(약 0.3 psec)에 비해 매우 적어 콜렉터 지연시간에 영향을 주지 못한다. 콜렉터-Ⅲ 구조가 정공의 콜렉터 주입으로 인한 베이스 확장 현상을 보다 효과적으로 억제할 수 없으나, 전송시간이 짧기 때문에 전체 콜렉터 지연시간은 콜렉터-Ⅲ 구조가 가장 짧음을 알 수 있었다.

참고문헌 [2]의 AlGaAs/GaAs HBT의 차단주파수(270GHz)와 본 논문의 InAlGaAs/InGaAs HBT의 차단주파수(183GHz)를 비교해 보면 전송 특성이 뛰어난 InGaAs HBT($\Delta E_{\Gamma,L}$=0.545eV)가 GaAs HBT($\Delta E_{\Gamma,L}$=0.28eV)보다 차단주파수가 낮게 나타났다. 본 논문에서는 베이스 폭을 공정과정을 고려하여 1000Å로 설정하였으나, GaAs HBT에서는 베이스 폭을 400Å로 설정함에 따른 차이로 판단된다. 또한, 베이스-콜렉터 경계면과 콜렉터 영역에서의 속도차이(약 1×10^7cm/s)는 GaAs HBT의 베이스에 조성변화를 주었기 때문이다. 즉, 조성변화로 인한 베이스에서의 전자의 전송이 가속되어 베이스-콜렉터 경계면에 도달될 때 속도가 증가하기 때문으로 사료된다.

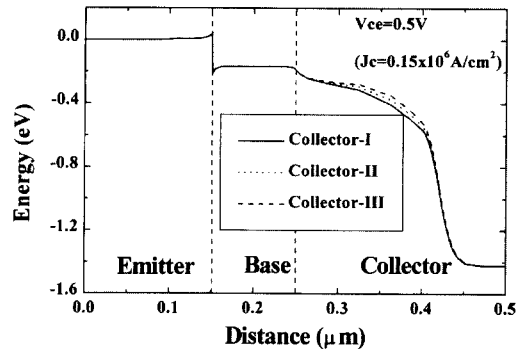


그림 7. V_{BC}=0.5V일 때 콜렉터 에너지 밴드

Fig. 7. The energy band of the collectors at V_{BC}=0.5V.

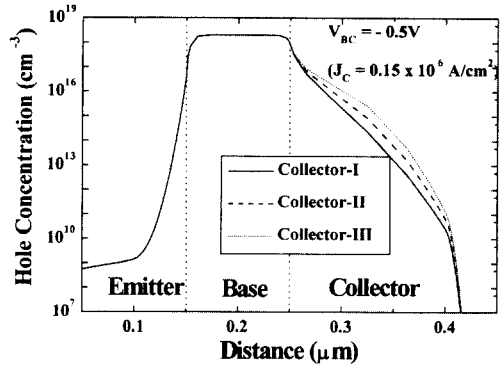


그림 8. V_{BC}=0.5V에서의 콜렉터 정공 분포

Fig. 8. The hole concentration of collectors at V_{BC}=0.5V

Ⅳ. 결 론

HMC를 통해 InAlGaAs/InGaAs HBT에서 Al 몰비의 변화를 준 에미터 조성변화영역이 전자의 비평

형 고속전송에 미치는 영향을 조사하였다. x_f=0.5 포물선 경사형 HBT는 에미터로부터 베이스로 주입되는 전자가 ΔE_C=0.265eV 에너지를 갖고 주입되기 때문에 고속전송이 되어 베이스 전송시간이 짧아지고 베이스-콜렉터 공간전하 영역을 전송하는 동안 L 밸리로 천이 할 때까지 충분히 가속되어 전송시간을 단축할 수 있었다. 전체 소자 전송기간은 x_f=0.5일 때가 가장 짧고 차단주파수도 170GHz 이상 나타남을 알 수 있었다.

전자의 전송속도가 콜렉터 영역에서 최대로 유지되기 위한 콜렉터 구조를 설계하였다. 이 구조에서 콜렉터 전송시간은 V_{BC} 전압에 많은 영향을 받는다는 것을 알았고 V_{BC} = 0.5V 에서 콜렉터 전송시간이 가장 짧았다. 콜렉터 지연시간은 콜렉터 전송시간과 콜렉터 캐패시턴스 충전시간의 두 성분의 합으로 구성되어 있어서 콜렉터-Ⅰ 구조가 다른 구조에 비해 콜렉터 캐패시턴스 충전시간이 짧고, 베이스 확장 효과를 억제하는 장점이 있었지만, 콜렉터 전송시간이 다른 두 구조에 비해 매우 커서 효과적인 구조가 아님을 알 수 있었다. 전체 콜렉터 지연시간은 콜렉터-Ⅲ 구조가 가장 뛰어남을 알 수 있었고, 이 구조에서의 차단주파수가 183GHz 이상 나타남을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] J. Hu, D. Pavlidis and K. Tomizawa, "Monte Carlo Studies of the Effect of Emitter Junction Grading on the Electron Transport in InAlAs/InGaAs Heterojunction Bipolar Transistors", IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 39, no. 9, pp. 1273-1281, 1992.

[2] T. Ishibashi, H. Nakajima, H. Ito. S, Yamahata and Y. Matsnoka, "Suppressed base-widening in AlGaAs/GaAs Ballistic collection transistors", presented at the 48th Ann. Device Research Conf., 1990. paper VIIB-3.

[3] G. Khrenov and E. Kulkova, "Numerical Study of Collector-Base Junction Design for Ultra-High-Speed InP/InGaAs Heterojunction Bipolar Transistors". Jpn. J. Appl. Phys, vol. 35, Part I. no. 2B, pp. 1184-1189, 1996.

[4] A. Kager and J. J. Liou, "Two-Dimensional numerical analysis of AlGaAs/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors Including the Effects of Graded Layer, Setback Layer and Self-Heating", Solid-State Electronics, vol. 39, no. 2, pp. 193-199, 1996.

[5] J. I. Song, C. Caneau, W. P. Hong and K. B. Chough, "Potentially high-performance carbon-doped GaInP/GaAs heterojunction bipolar transistor with different compositional base gradings", Electronics Letters, vol. 30, no. 7, pp. 605-606, 1994.

[6] Sandip Tiwari, "Analysis of the Operation of GaAlAs/GaAs HBT's", IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 36, no. 10, pp. 2105-2121, 1989.

[7] 이경락, 황성범, 송정근, "Hybrid Monte Carlo 시뮬레이션에 의한 InAlAs/InGaAs HBT의 전자전송 해석", 한국전기전자재료학회, 1997

저 자 소 개

黃 成 凡(正會員)

1959년 9월 21일생. 1986년 2월 동아대학교 전자공학과 졸업 (공학사). 1988년 2월 동아대학교 전자공학과 대학원 졸업 (공학석사). 1998년 8월 동아대학교 전지공학과 대학원 졸업 (공학박사). 1995년 4월 ~ 현재 경남정보대학 전자정보통신과 조교수. 주관심분야는 고속소자 모델링 및 설계, MMIC 등

金 勇 圭(正會員)

1963년 1월 7일생. 1986년 2월 동아대학교 전자공학과 졸업 (공학사). 1988년 2월 동아대학교 전자공학과 대학원 졸업 (공학석사). 1995년 2월 동아대학교 전자공학과 대학원 박사과정 수료. 1995년 3월 ~ 현재 대구기능대학 매카트로닉스학과 조교수. 주관심분야는 고속소자 모델링 및 설계, MMIC 등

宋 政 根(正會員) 第 35卷 D編 第 3號 參照

1957년 10월 14일생. 1980년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업 (공학사). 1984년 2월 서울대학교 전자공학과 대학원 졸업 (공학석사). 1992년 2월 University of Cincinnati Electronical & Engineering 졸업 (공학박사). 1992년 3월 ~ 1998년 10월 동아대학교 공과대학 전자공학과 조교수. 1998년 10월 ~ 현재 동아대학교 공과대학 전기전자컴퓨터공학부 부교수. 주관심분야는 고속소자, 하드웨어 신경망구현, 유기물 반도체소자 등

洪 昌 憙(正會員)

1939년 10월 11일생. 1964년 2월 한양대학교 전기공학과 졸업 (공학사). 1967년 2월 한양대학교 전자공학과 대학원 졸업 (공학석사). 1983년 2월 한양대학교 전자공학과 대학원 졸업 (공학박사). 1978년 4월 ~ 1982년 9월 동아대학교 전자공학과 조교수. 1982년 10월 ~ 1987년 9월 동아대학교 전자공학과 부교수. 1987년 10월 ~ 현재 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수. 주관심분야는 AC Servomotor, 고속소자, VLSI 설계, MMIC 등