

Hybrid Monte Carlo 시뮬레이션에 의한 InAlAs/InGaAs HBT의 전자전송 해석

논문
10-9-9

Analysis of Electron Transport in InAlAs/InGaAs HBT by Hybrid Monte Carlo Simulation

송정근*, 황성범**, 이경락***

(Chung-kun Song, Sung-Bum Hwang, Kyung-Lack Lee)

Abstract

As the size of semiconductor devices shrinks in the horizontal as well as vertical dimension, it is difficult to estimate the transport-velocity of electron because they drift in non-equilibrium with a few scattering. In this paper Hybrid Monte Carlo simulator, which employs the drift-diffusion model for hole-transport and Monte Carlo model for electron-transport in order to reduce the simulation time and increase the accuracy as well, has been developed and applied to analyze the electron-transport in InAlAs/InGaAs HBT, which is attractive for an ultra high speed active device in high speed optical fiber transmission systems, in terms of the velocity and energy distribution as well as cutoff frequency.

Key word (중요용어) : Monte Carlo 시뮬레이션, HBT(이종접합 쌍극자 트랜지스터), Non-equilibrium ballistic transport(비평형 고속전송), InAlAs/InGaAs HBT

1. 서 론

MOCVD와 MBE 등 박막성장 기술과 X-ray 등 Lithography 기술이 발달함에 따라 소자의 크기가 수직과 수평방향으로 미세화되고, 또한 다양한 반도체 재료의 결합에 의한 에너지 밴드의 조작이 가능해짐에 따라 HEMT와 HBT 등 첨단 고속소자에서는 캐리어의 비평형 고속전송 (non-equilibrium ballistic transport)을 이용하여 고속동작을 실현하고 있다.

이러한 고속소자에서는 충분한 산란과정을 거친 후 캐리어의 표동속도가 안정상태에 도달했을 때 나타나는 표동속도와 전계의 일반적인 관계식을 사용할 수 없다. 예를들면 채널길이 1000Å의 GaAs

HEMT에서 전자가 전송할 때 전자의 평균자유행정이 60Å이므로 단 16번의 산란과정을 거치게 되어 전자의 표동속도는 안정상태에 도달하지 않는다. 그리고, 표동속도는 채널길이에 대한 전자의 에너지 변화와 전계크기의 변화의 영향을 받기 때문에 더 이상 $v_d = \mu_n E$ 으로 표현할 수 없다.

이외에도 AlGaAs/GaAs HBT와 같이 이종접합의 계면에서 전도대 에너지의 불연속으로 인한 캐리어 에너지의 증가와 고전계가 인가된 베이스-콜렉터 공간전하영역에서 가속된 전자의 에너지 밸리간 천이 등에 의해서 전자의 표동속도를 간단한 해석적 표현식으로 나타낼 수 없게 되었다. 따라서, 이러한 소자의 해석을 위해서 더 이상 Drift-Diffusion (DD) 전류방정식을 사용할 수 없게됨으로써 캐리어의 운동을 보다 엄밀히 묘사하는 근원적인 방정식이 필요하게 되었다.

캐리어의 비평형 고속전송을 해석하기 위하여 Boltzmann Transport Equation (BTE)의 1차 변형식인 Hydrodynamic (HD) 방정식과 캐리어의 산란을 통계적으로 처리하는 Monte Carlo (MC) 방법

* : 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부

** : 경남전문대학교 전자통신과

*** : 현대전자 시스템 IC 연구소

접수일자 : 1997년 7월 3일

심사완료 : 1997년 10월 9일

을 사용하고 있다. HD는 DD에 비하여 BTE로 부터 덜 근사되었기 때문에 보다 정확히 캐리어의 운동을 묘사하고, 또한 비교적 수치해석적으로 접근이 용이하며 이론적으로 해석이 간단하여 1차원 소자의 해석에 많이 적용되어 왔다¹⁾. 그러나, HBT와 같은 2-캐리어 (전자와 정공) 소자에는 그 적용 예가 많지 않고, 아직 적합한 알고리즘이 없는 것으로 알고 있다. 반면에 MC는 각 캐리어의 산란과정을 시간의 변화에 따라 추적하여 통계적 방법으로 캐리어의 속도와 에너지를 계산하므로 소자의 구조에 관계없이 비평형 고속전송의 해석에 적합한 방법이다. 그러나, MC는 저전계 영역에서 통계오차가 크고, 소자 전체에 2-캐리어를 적용하면 과도한 계산시간이 소요되는 단점이 있다^{2,3)}.

본 논문에서는 MC의 단점인 과도한 계산시간의 소요를 해결하기 위해서 DD와 MC를 혼합한 1차원 2-캐리어 Hybrid Monte Carlo 시뮬레이터 (이하 HMC라고 함.)를 제작하였다. 여기서 DD는 특정 바이어스의 MC 계산을 위한 초기값 계산과 MC 계산 중 정공의 전송을 시뮬레이션하는데 사용함으로써 계산시간과 오차를 감소시켰다.

초고속 광전송시스템의 능동소자로서 HBT가 주목받고 있으며, 특히 InAlAs/InGaAs HBT는 높은 전자이동도와 전송속도 그리고, 큰 전도대 에너지 불연속등의 장점 때문에 40~100 Gbps 광전송시스템의 능동소자로서 연구되고 있다.⁴⁾ 본 논문에서는 HMC를 사용하여 InAlAs/InGaAs HBT의 전자전송을 해석하였다.

2. 소자방정식

시뮬레이션에 사용한 소자 방정식은 DD 시뮬레이션을 위하여 Poisson 방정식과 전자 및 정공 전류연속방정식을 사용하였다. MC 시뮬레이션에서는 Poisson 방정식과 정공 전류연속방정식을 사용하였고, 전자의 전송은 MC로 계산하였다. 이종접합소자에 적용할 수 있도록 Poisson 방정식은 식(1)과 같이 물질의 변화를 고려한 확장된 표현식을 사용하였다. 여기서 방정식의 변수는 반도체 소자 방정식의 일반적인 기호표시를 따랐다.

$$\nabla^2 \psi + \frac{1}{\epsilon} \nabla \epsilon \nabla \psi = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

식 (2)의 전자 전류연속방정식은 MC 시뮬레이션을 위한 초기값을 계산하기 위하여 사용되었다.

$$\nabla \cdot (D_n \nabla n - \mu_n n \nabla \psi) - R = 0 \quad (2)$$

정공 전류연속방정식 식 (3)은 MC 시뮬레이션의 초기값과 전자의 전송을 MC로 추적하는 동안 전계의 변화에 의한 정공의 전송을 계산하는데 사용하였다. MC는 과도현상을 시뮬레이션하므로 식 (3)에 정공농도의 시간적 변화항을 삽입시켰다.

$$\nabla \cdot (D_p \nabla p + \mu_p p \nabla \psi) - R = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)의 캐리어 이동도와 확산계수는 반도체 재료와 도핑농도 그리고 전계에 따라 변하는 값이다. GaAs, AlAs, InAs로 구성되는 alloy 화합물 반도체의 캐리어 이동도는 실험값이 없기 때문에 본 논문에서는 MC 시뮬레이션에서 추출한 실험식을 사용하였다⁵⁾.

3. 수치해석과 알고리즘

일반적인 MC 시뮬레이션은 Poisson 방정식에 의한 전계분포와 MC의 산란과 전송에 의한 전하분포의 계산을 유기적으로 반복하여 필요한 정보를 얻어내는 방법이다. 이 방법은 잘못된 초기값 설정에 의한 발산의 가능성이 많고, 또한 과도한 계산시간이 소요되는 단점이 있다. 본 논문에서는 Poisson 방정식과 MC 방법 그리고 DD 전류방정식과 전류연속방정식을 함께 사용함으로써 위와 같은 문제를 해결하였다.

먼저 특정 바이어스에서 MC를 수행하기 위한 전계분포의 적절한 초기값을 Poisson 방정식, DD 전류방정식 그리고 전류연속방정식을 반복계산하여 구하였다. 이렇게 구한 전계분포의 초기값을 사용하면 이어서 수행하는 MC에서 발산의 문제가 없어지고, 전계분포의 초기값을 MC 방법으로 계산할 필요가 없기 때문에 계산시간을 단축할 수 있다. 실제 Pentium PC를 사용하였을 경우 약 40%의 시간단축의 효과를 얻을 수 있었다.

그리고, bipolar 트랜지스터는 전자와 정공 2-캐리어를 사용하기 때문에 2-캐리어의 전송을 모두 MC로 추적하면 과도한 메모리와 시간이 소요된다. 따라서, 보통 n-p-n 트랜지스터에서는 정공의 역할이 중요하지 않기 때문에 정공의 전송을 무시한다. 그러나, n-p-n HBT와 같이 p 베이스 영역이 고준위 도핑된 소자에서는 이에의한 오차를 무시할 수 없다. 본 논문에서는 전자의 전송은 MC로 추적하

고, 정공의 전송은 DD와 전류연속방정식으로 계산하여 오차를 보상하였다.

Poisson 방정식과 DD 전류방정식 그리고 전류연속방정식은 유한차분법으로 선형 이산화하여 Newton 수렴법으로 계산하였다. Newton 수렴법에서는 초기치의 설정이 해의 수렴과 정확도를 결정하는 중요한 요인이다. 평형상태의 전위분포의 계산을 위한 초기값은 일반적으로 "0"으로 설정하지만 이종접합의 경우 다양한 물성의 반도체들로 구성되기 때문에 "0"의 초기치가 적합하지 않을 때가 많다. 따라서, 각 반도체층의 페르미 에너지를 초기치로 사용하면 수렴은 물론이고 계산시간을 단축시킬 수 있었다. 바이어스가 인가되었을 경우 전위와 전자 및 정공농도의 초기값은 그 전 바이어스에서 계산된 값을 사용하면 일반적으로 수렴이 된다. 그러나, 높은 바이어스에서는 캐리어의 주입이 급격히 증가하여 이러한 초기값을 사용하여도 수렴하지 않았다. 이 경우 그 전 두 바이어스에서 계산한 결과로부터 선형적으로 외삽한 값을 초기치로 사용함으로써 높은 전압까지 수렴된 해를 얻을 수 있었다.

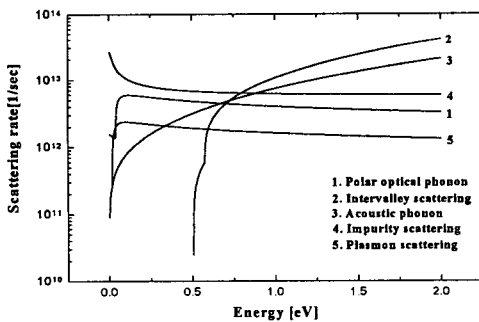


그림 1. In_{0.53}Al_{0.47}As의 각종 산란기구의 산란율 (N_D=5×10¹⁷cm⁻³)

Fig. 1. Scattering rate of the various scattering mechanisms of In_{0.53}Al_{0.47}As (N_D=5×10¹⁷cm⁻³)

MC에서는 산란 메카니즘으로 acoustic phonon, polar optical phonon, non-polar optical phonon, ionized impurity, inter-valley, plasmon scattering 등을 고려하였다. 그림1은 N_D=5×10¹⁷cm⁻³도핑된 In_{0.53}Al_{0.47}As반도체의 각종 산란기구의 산란율을 나타내었다. 이종접합의 경우 거리의 변화에 대한 전자친화력 X와 유효질량 m*의 변화에 의하여 전자의 운동량이 급격히 증감하는데, 이 변화량으로 보

통 거리의 미분값을 사용한다⁶⁾. 그러나, 계단형 (abrupt) 이종접합과 같이 전자친화력(X)과 유효질량(m*)이 불연속적으로 변하는 경우 미분값은 그리드 설정에 따라 다르게 된다. 따라서, 본 논문에서는 그리드 설정과 무관한 아래의 식을 사용하였다.

$$dk_x = \sqrt{\frac{2m_i^*}{\hbar^2} |\Delta X| (1 + \alpha |\Delta X|)}$$

$$\Delta X = X_{i+1} - X_i$$

$$dk_m = \frac{\partial k}{\partial m^*} \Delta m^* = \frac{k_i}{2} \left(\frac{m_{i+1}^*}{m_i^*} - 1 \right)$$

$$dk = -\frac{q}{\hbar} F dt + dk_x + dk_m$$

여기서 dk_x는 전자친화력의 차이와 dk_m은 유효질량의 차이에 의한 전자의 파수(wave number)의 변화를 각각 나타낸다. 그리고, F는 전계, α는 전도대 Γ 밸리의 non-parabolicity 이다. 경사형(grade) 이종접합의 경우 전자친화력의 변화에 의한 전자운동량의 변화는 식 (5)와 같이 alloy 전계 형태로 고려하였다.

$$dk = -\frac{q}{\hbar} F dt + dk_m$$

$$F = -\frac{d\phi}{dx} - \frac{dX}{dx}$$

HMC의 흐름도는 그림 2와 같다. 입력 데이터가 주어지면 소자의 각 반도체층의 물성과 산란율을 계산하여 look-up table을 작성한다. HMC에서 사용하는 반도체는 GaAs, AlAs, InAs로 구성할 수 있는 모든 화합물반도체이며, 관련 물성은 각 binary의 물성으로부터 내삽한 근사식을 사용하였다. 이외 다른 반도체도 관련 물성 파라미터를 사용자가 쉽게 삽입하여 사용할 수 있도록 하였다. 그리드의 수와 간격은 계산속도와 해의 정확도에 영향을 미치므로 그리드 설정의 적절성을 평가하기 위하여 사용자가 지정한 소자의 구조와 그리드 분포를 그림으로 확인할 수 있게 하였다. 그리고, 사용자가 임의로 그리드 분포를 균일 혹은 parabolic 불균일 분포를 설정할 수 있게 제작하였다.

그리드 설정이 확인되면 평형상태의 전위분포를 계산하여 바이어스 상태의 시뮬레이션을 위한 초기값으로 사용한다. 지정된 바이어스까지 전압을 조금씩 증가시키면서 DD 전류연속방정식을 사용하여 근사해를 계산한다. 이렇게 구해진 값을 지정 바이어스의 MC 시뮬레이션을 위한 초기값으로 사용하

여 전자의 추적을 시작하며, 전자의 분포가 안정될 때까지 일정시간 (보통 5 psec) 동안 Poisson 방정식과 정공 DD 방정식 그리고 전자의 MC 계산을 유기적으로 반복수행하여 최종해를 구한다.

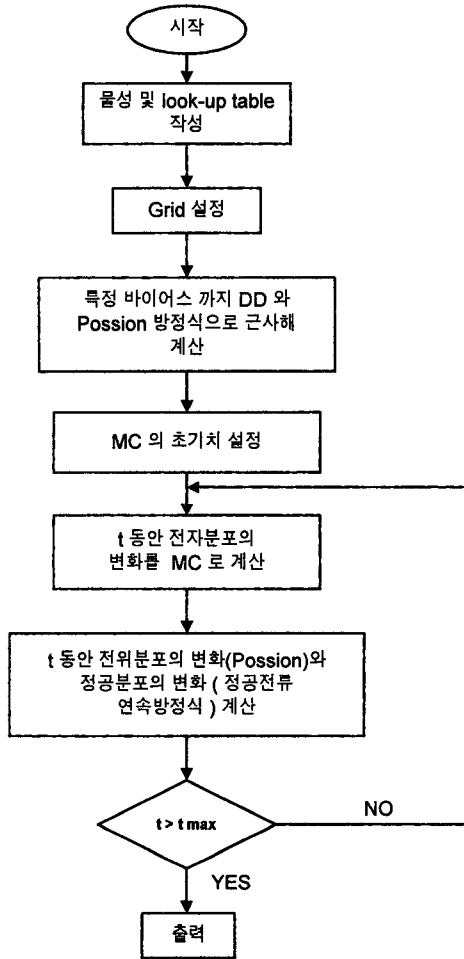


그림 2. HMC 프로그램의 흐름도
Fig. 2. Flow chart of HMC program

HMC로 부터 얻을 수 있는 소자의 성능평가 파라미터는 콜렉터 전류, 차단주파수, 전송시간, 표동속도 및 에너지 분포 그리고 밸리의 전자 점유율등이다. 전송시간과 차단주파수는 식 (6)과 같이 계산하였다.

$$\tau_k = \frac{\Delta Q_k}{\Delta J_c} \tag{6}$$

$$f_T = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta J_c}{\Delta Q_{ec}}$$

여기서 k는 소자의 각 영역을 나타내고, J_c는 콜렉터전류, Q_k는 각 영역의 전자 전하량을 뜻한다.

4. HMC를 이용한 HBT의 해석

HMC를 표1과 같이 계단형과 경사형 에미터 구조를 갖는 InAlAs/InGaAs HBT에 적용하여 동작을 분석하고, 성능을 비교하였다.

표 1. 시뮬레이션할 HBT의 구조
Table 1. Structure of HBT for simulation

에미터	In _{0.53} Al _{0.47} As	1000 Å	n 5x10 ¹⁷
경사영역: x=1→0	In _{0.53} (Ga _{1-x} Al _x) _{0.47} As	500 Å	n 5x10 ¹⁷
베이스	In _{0.53} Ga _{0.47} As	1000 Å	p 2x10 ¹⁸
콜렉터	In _{0.53} Ga _{0.47} As	2500 Å	n 5x10 ¹⁶
서브-콜렉터	In _{0.53} Ga _{0.47} As	1500 Å	n 5x10 ¹⁷

경사형 에미터의 경사영역은 Al 몰비의 변화에 의한 alloy 전위가 정전위 보다 커지지 않도록 하였으며, alloy 전계가 선형이 되도록 Al 몰비 X는 식 (7)과 같이 거리 y에 대한 제곱의 관계를 갖도록 하였다.⁷⁾ 여기서 X_f는 y=-y₀에서 몰비이고

$$X(y) = X_f - X_f \left(\frac{y + y_0}{y_0} \right)^2, \quad -y_0 < y < 0 \tag{7}$$

시뮬레이션할 소자의 경우 X_f=1 이다. 그림 3은 계단형과 경사형 HBT의 평형상태에서의 전도대와 전계를 비교하였다. 경사형의 경우 alloy 전계에 의한 에미터-베이스 정전계가 감소함을 볼 수 있다. 따라서, 계단형의 V_{EB,turn-on} = 1.2V 이었고, 경사형은 0.7V로 감소하였다. alloy 영역의 구조에 따라 전계분포는 상당히 달라지고, 이것은 전자전송에 직접적인 영향을 준다. alloy 영역을 200 Å 범위에 걸쳐 몰비를 1에서 0으로 식 (7)에 따라 변화시킬 경우 alloy 전계의 최대값 (음의 값)이 정전계 최대값 (양의 값)과 비슷한 크기가 되고 총전계는 접합 위치에서 상쇄되어 거의 0에 가까운 값이 된다. 그리고, 순방향전압을 인가하면 정전계는 감소하는 반면 alloy 전계는 변하지 않기 때문에 총전계는 음의 값을 갖게된다. 따라서 전자가 이 영역을 통과

할 때 가속되어 전송속도가 증가함으로써 속도분포는 마치 계단 접합의 경우와 비슷한 결과가 된다. 그러므로, 경사영역은 alloy 전계가 정전계 보다 커지지 않도록 충분한 공간에 걸쳐 물비를 식 (7)에 의해 변화시켜야 한다.

계단형과 경사형 HBT의 전자의 전송속도 분포를 그림 4)에 나타내었다. 계단형은 전자가 에미터

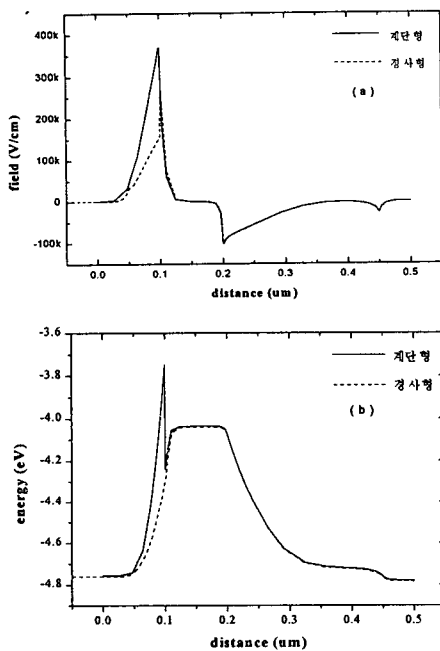


그림 3. 계단형과 경사형 HBT의 평형상태의 a) 전계 및 b) 전도대 분포
 Fig. 3. a) Electric field b) conduction band energy distribution of abrupt and graded HBT in equilibrium

에서 베이스로 주입되면서 전도대의 불연속 에너지 $\Delta E_C = 0.53 eV$ 만큼 전자의 에너지가 갑자기 증가하므로 속도가 그림 4a)와 같이 약 2×10^7 cm/sec로 급증한다. 경사형의 경우 에너지 불연속이 없기 때문에 에너지의 급격한 증가는 없다. 따라서, 속도는 그림 4b)와 같이 완만히 증가한다. 그리고, 경사형의 경우 정전계는 순방향 전압에 의해서 감소하지만 alloy 전계는 감소하지 않기 때문에 총전계는 에미터 왼쪽에 작은 음전계 영역이 생기고, 접합부에 큰 양전계가 형성된다. 그러므로, 전자의 속도는 에미터 쪽에서 다소 증가하다가 다시 감소하는 형

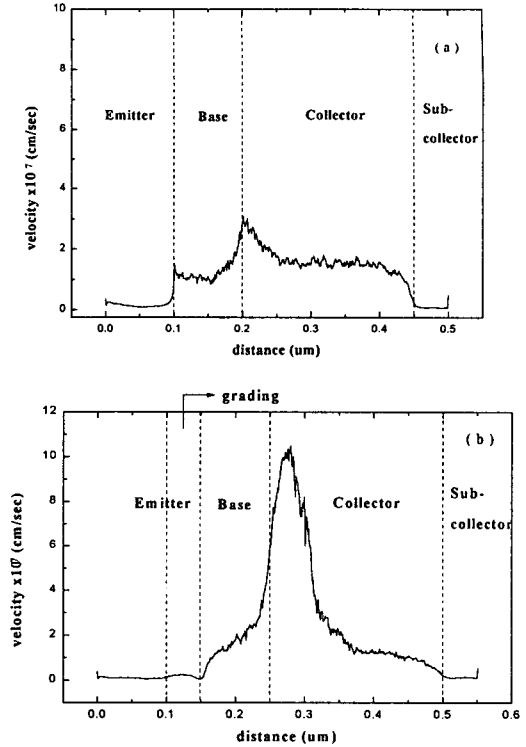


그림 4. a) 계단형 HBT와 b) 500Å의 경사영역을 갖는 경사형 HBT의 전자전송속도 분포 ($J_C = 8 \times 10^5$ A/cm², $V_{CE} = 1.6V$).
 Fig. 4. Electron transport-velocity distribution of a) Abrupt and b) Graded HBT with 500Å grading layer ($J_C = 8 \times 10^5$ A/cm², $V_{CE} = 1.6V$)

태를 보인다. 계단형에서 베이스에 주입된 전자는 에너지 (0.53eV)가 급격히 증가하기 때문에 InGaAs 베이스에서 Γ 밸리의 전자들이 대부분 L밸리 ($\Delta E_{\Gamma L} = 0.55 eV$)로 천이하여 전자의 속도는 감소한다. 전자의 분포를 전도대에서 나타낸 그림 5a)에서 보듯이 에미터에서 전자들은 대부분 Γ 밸리 (검은 점)에 위치하지만, 베이스로 주입하면서 80% 이상이 L밸리 (흰 점)로 천이하였음을 볼 수 있다. 이것은 밸리의 점유율을 나타낸 그림 6a)에서 뚜렷이 볼 수 있다. 경사형의 베이스에서 전자 속도는 베이스 영역의 전계가 0임에도 불구하고 속도가 그림 4b)와 같이 증가하였다. 이것은 에미터 왼쪽에 형성된 alloy 음전계에 의하여 베이스로 주입할 때 가속되었기 때

문이다. 그러나, 에너지의 증가는 ΔE_{FL} 보다 크지 않으므로 L밸리로 천이하지 않고 그림 5b)에서 보듯이 전자는 여전히 Γ 밸리에 위치한다. 따라서, 밸리의 점유율은 그림 6b)와 같이 에미터와 베이스에서 100%로 나타난다.

계단형과 경사형 모두 베이스 영역은 전하가 중성이므로 전자는 확산으로 이동한다. 그리고, 전자가 베이스-콜렉터 공간전하 (B-C SCR)의 고전계 영역에 가까이 갈수록 음전계에 의하여 가속되므로 속도는 증가한다. 계단형의 경우 Γ 밸리에 남은 20% 전자의 에너지는 베이스로 주입할 때 이미 전도대 불연속 에너지 만큼 증가하였으므로 B-C SCR에서 가속되면 쉽게 L밸리로 천이하여 속도는 그림 4a)와 같이 다시 감소하고, L밸리의 전자 점유율은 그림 6a)에서 보듯이 100% 가깝게 된다.

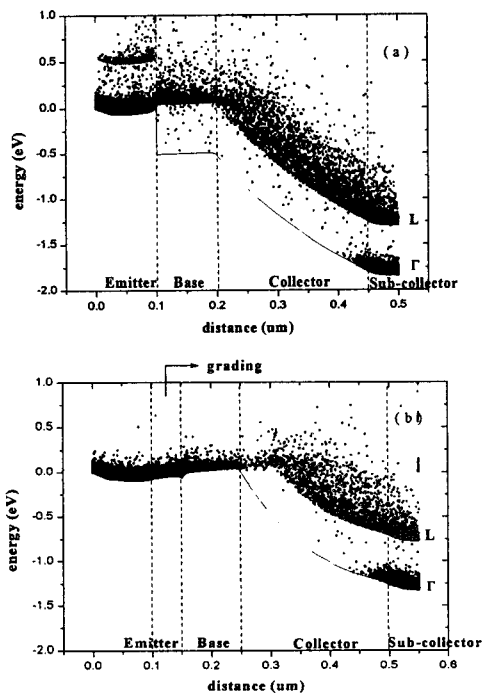


그림 5. a) 계단형 HBT와 b) 경사형 HBT의 전자의 전도대 에너지 분포 ($J_c=8 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$, $V_{CE}=1.6\text{V}$)

Fig. 5. Electron distribution in the conduction band of a) Abrupt and b) Graded HBT ($J_c=8 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$, $V_{CE}=1.6\text{V}$)

그러나, 경사형의 경우 이러한 에너지 증가가 없기 때문에 B-C SCR에서 L밸리로 천이하는데 필요

한 에너지로 증가할 때까지 가속되어 전자의 속도는 그림 4b)와 같이 $y=0.3\mu\text{m}$ 에서 $10 \times 10^7 \text{ cm/sec}$ 에 도달하게 된다. 이 위치 이후 부터 전자는 L밸리로 천이하기 시작하여 L밸리의 점유율이 50%에 이르고 서브-콜렉터에 이르기 까지 대부분의 전자들이 L밸리로 천이한다 (그림 5b). 따라서, 속도는 그림 4b)에서 보듯이 다시 감소한다. 이것은 그림 5b)의 전도대 전자 에너지 분포 그림에서도 잘 나타나 있다. B-C SCR에서 대부분의 전자가 L밸리로 천이한 것을 볼 수 있다.

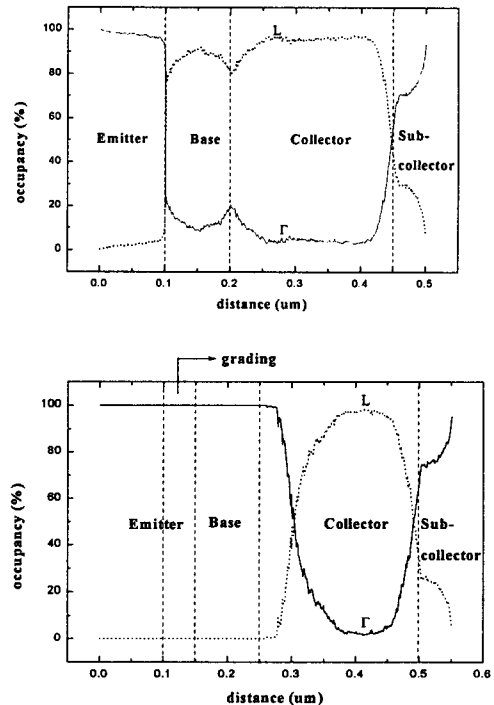


그림 6. a) 계단형 HBT와 b) 500A의 경사영역을 갖는 경사형 HBT의 Γ 밸리와 L밸리의 전자 점유율 ($J_c=8 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$, $V_{CE}=1.6\text{V}$)

Fig. 6. Electron occupancy of Γ and L valley of a) Abrupt and b) Graded HBT with 500 A grading layer ($J_c=8 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$, $V_{CE}=1.6\text{V}$)

식 (6)에 의한 전송시간은 계단형 HBT의 베이스 전송시간이 0.8 psec, B-C SCR 전송시간이 1 psec 이었다. 그리고, 경사형 HBT의 베이스 전송시간은 1.5 psec, B-C SCR 전송시간은 0.5 psec 이었다. 계단형의 베이스 전송시간이 경사형 보다 짧은 것

은 계단형 HBT에서 전자의 에너지가 베이스에 주입할 때 전도대 에너지 불연속 만큼 증가하기 때문이다. 그리고, 경사형 HBT의 B-C SCR 전송시간이 계단형 보다 짧은 것은 전자가 L밸리로 천이할 때까지 충분히 가속되었기 때문이다. 계단형은 전도대 에너지 불연속 만큼 베이스 주입 전자의 에너지가 증가함으로써 베이스 전송 시간은 감소하였지만 L밸리로 쉽게 천이하였기 때문에 B-C SCR 전송시간은 오히려 길어졌다. 반면에 경사형 HBT는 베이스 전송시간은 길지만 B-C SCR을 높은 속도로써 전송함으로써 전송시간은 단축되었다. 전체 전송시간은 에미터 전송시간을 포함하여 계단형 HBT가 2.9 psec 이었고, 경사형 HBT는 3.31 psec 이었다. 따라서, 계단형 HBT의 전송시간이 더 짧았음을 알 수 있었다. 계단형과 경사형의 f_T 는 각각 55 GHz 이고, 48 GHz 이었고, 이 결과를 표 2에 정리하였다.

에미터의 전도대 에너지 불연속 크기와 베이스를 약간의 경사형으로 설계하면 베이스 전송시간을 최대 단축할 수 있고, B-C SCR의 전계 분포를 전자들이 L밸리에서 계속 전송하도록 하여 최대속도를 유지할 수 있도록 최적의 구조를 산출할 수 있을 것이다.

표 2. 계단형과 경사형 HBT의 전송시간과 f_T
($J_C=8 \times 10^5$ A/cm², $V_{CE}=1.6V$)
Table 2. Transit time and f_T of Abrupt and Graded HBT ($J_C=8 \times 10^5$ A/cm², $V_{CE}=1.6V$)

	τ_e (psec)	τ_b (psec)	τ_c (psec)	τ_{ec} (psec)	f_T (GHz)
계단형	0.3	0.83	1.77	2.9	55
경사형	0.35	1.13	1.83	3.31	48

5. 결 론

Poisson 방정식과 확산-표동 전류 연속방정식 그리고 Monte Carlo 방법을 혼합한 Hybrid Monte Carlo 시뮬레이터를 제작하였다. HMC로써 시뮬레이션 시간을 단축할 수 있었고, 안정된 수렴을 이룰 수 있었다.

HMC를 계단형과 경사형 InAlAs/InGaAs HBT에 적용하여 전자의 비평형 고속전송을 해석하였다. 계단형 HBT는 전도대 에너지 불연속에 의한

베이스 주입 전자의 에너지를 증가시킴으로써 베이스 전송시간을 단축시켰지만 전자들이 L밸리로 쉽게 천이함으로써 B-C SCR 전송시간은 오히려 증가하였다. 반면에 경사형 HBT는 베이스 주입 전자의 에너지 증가가 없기 때문에 베이스 전송시간은 길었지만 B-C SCR을 전송하는 동안 L밸리로 천이할 때 까지 충분히 가속되어 전송시간을 단축할 수 있었다. 전체 소자 전송시간은 계단형 HBT가 경사형 보다 짧았다. 에미터-베이스 전도대 에너지 불연속의 크기와 베이스-콜렉터 공간전하 영역의 전계를 전자의 전송속도가 최대로 유지되어 전송되도록 소자 구조를 설계하는 연구가 필요하다.

* 이 논문은 '95 한국학술진흥재단 연구비에 의해 지원 되었음.

참 고 문 헌

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 nonequilibrium electron transport in InAlGaAs/InGaAs HBT's," IEEE Trans. Electron Dev., vol. 40, pp.1950, 1993.
3. Juntao Hu et al., "Monte Carlo Studies of the Effect of Emitter Junction Grading on the Electron Transport in InAlAs/InGaAs Heterojunction Bipolar Transistor," IEEE Trans. Electron Devices., vol.39, no.6, pp. 1273, 1992.
4. K. Hohkawa et al., "Integrated circuit for ultra-high-speed optical fiber transmission systems," IEICE Trans. Electron., vol. E76-C, no.1, pp.68, 1993.
5. 이걸락, 송정근., "In_{0.53}(Al_xGa_{1-x})_{0.47}As의 전자와 정공 이동도의 실험식추출," 한국전기전자재료학회 vol.9, no.6, pp.504, 1996.
6. Kazutaka Tomizawa., "Numerical Simulation of Submicron Semiconductor Devices," Artech House, Boston., 1993.
7. Sandip Tiwari., "Analysis of the Operation of GaAlAs/GaAs HBT's," IEEE Trans.

Electron Devices., vol.36, no.10, pp.2105,
1989.

저자소개



이경락

1967년 8월 6일 생. 1994년 2월 동아대 전자공학과 졸업. 1997년 2월 동 대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 현재 현대전자 시스템 IC 연구소 연구원.



송정근

1957년 10월 14일 생. 1980년 3월 서울대 전자공학과 졸업. 1984년 2월 서울대 전자공학과 대학원 졸업 (석사). 1992년 2월 University of Cincinnati Electrical & Computer Engineering 졸업 (박사) 1992년 ~ 현재 동아대학교 공과대학 전기·전자·컴퓨터 공학부 조교수



황성범

1959년 9월 21일 생. 1986년 동아대 전자공학과 졸업. 1988년 동 대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전자공학과 박사과정 수료.
현재 경남전문대 전자통신과 조교수