

AlGaAs/GaAs HBTs 의 에미터 크기에 따른 전류 이득 변화에 관한 연구 A Study on the Current Gain Variation with the Emitter Size in AlGaAs/GaAs HBTs

정 준오*, 이 현웅, 이 태우**, 김 일호**, 박 문평**, 박 성호**, 편 광의**
명지대학교 전기전자공학부, 한국전자통신연구소 화합물 반도체연구부**

J.O Jeong, H.Y. Lee, T.W. Lee, I.H. Kim, M.P. Park, S.H. Park, K.E. Pyun
Dept. of E. & E. Engineering, Myong-gi University, Compound Semiconductor Dept., ETRI

ABSTRACT

AlGaAs/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors (HBTs) with various emitter areas were fabricated and the device size dependence on the current gain was examined. With the different emitter areas, the passivated devices having the same peripheral length were fabricated and measured. The measured base current density in the Gummel plots shows an ideality factor of nearly 2. It is found that as the emitter area becomes small, the base current density with the ideality factor of 2 increases linearly, and as the emitter perimeter/area ratio becomes large, the surface recombination current density component increases. The current gain performance in AlGaAs/GaAs HBTs is mainly determined by either the larger emitter area or the smaller ratio of the emitter perimeter to the emitter area. These results will be compared with experimental works for GaInP/GaAs HBTs

1. 서론

표면 재결합 속도 및 표면 상태 밀도가 높은 것으로 알려진 GaAs의 물질 특성은 AlGaAs/GaAs HBTs (Heterojunction Bipolar Transistors)와 같은 소수 캐리어 소자들에서의 전류 전달 특성을 상당히 저하시키며, 특히 크기가 작은 소자일수록 이러한 특성에 상당히 의존하는 것으로 알려져 있다. 실제적으로 절연된 소자에서의 전류 이득의 증가는 표면 재결합 성분의 감소에 의한 것으로 이해되고 있다. 그러나 우수하게 표면이 절연된 HBT의 경우에 전류 이득에 대한 전류 성분의 의존성에 대해서는 명확하게 설명되고 있지 않다[1].

GaInP/GaAs HBTs의 전류이득은 이상 계수 (Ideality factor)가 1인 베이스 전류 성분에 좌우되는 반면, AlGaAs/GaAs HBTs는 베이스 전류 성분 중 이상 계수가 2에 가까운 성분이 지배적이며, 이는 공간전하영역 (Space charge region)에서 발생하는 재결합 성분의 영향으로 이해되고 있다. AlGaAs/GaAs HBTs는 GaInP/GaAs HBTs에 비해 많은 DX centers와 높은 포획 전하 밀도 (Trap charge

densities)를 갖기 때문에 공간 전하 영역에서의 재결합 성분은 무시할 수 없다. 그 단점에도 불구하고 높은 전류이득 특성을 보이는 AlGaAs/GaAs HBTs는 초고속 광통신 분야의 중요한 소자로서 인식되고 있다. 본 논문에서 이러한 IC의 구성 소자로서 많은 응용이 예상되는 AlGaAs/GaAs HBTs의 소자 크기에 따른 전류 이득의 특성을 고찰하여 초고속 IC의 최적화된 HBT 소자 설계에 기여하고자 한다.

2. 공정 및 측정

본 연구에서 제작된 AlGaAs/GaAs HBTs의 에피구조는 MOCVD (metal-organic chemical vapor deposition)에 의해 성장되었고 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 의 Si으로 도핑된 에미터, $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 의 C으로 도핑된 베이스 및 $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 의 Si으로 도핑된 콜렉터로 구성되어 있으며 자세한 AlGaAs/GaAs HBTs의 에피구조는 표. 1에 제시되고 있다.

Table 1. The epitaxial layer structure of the AlGaAs/GaAs HBTs used for the experiment.

Layer	Material	Doping[cm^{-3}]	Thickness(Å)
Cap III	InGaAs	1×10^{19}	400
Cap II	InGaAs grading	1×10^{19}	400
Cap I	GaAs	3.7×10^{18}	1300
Emitter II	AlGaAs grading	5×10^{17}	500
Emitter	AlGaAs	2×10^{17}	1500
Base	GaAs	3×10^{19}	700
Collector	GaAs	2×10^{16}	4000
Subcollector	GaAs	5×10^{18}	5000
Buffer II	AlGaAs	—	3000
Buffer I	GaAs	—	3000
Semi-insulating GaAs Substrate			

전자빔 진공증착기(E-beam evaporator)를 사용하여 에미터와 베이스 전극을 Ti/Pt/Au로 형성하였고 열증착기 (Thermal evaporator)를 사용하여 콜렉터 전극을 AuGe/Ni/Au로 형성하였다. 에미터 메사 식각에

$H_3PO_4:H_2O_2:H_2O=4:1:90$ 과 $NH_4OH:H_2O_2:H_2O=20:7:973$ 용액이 사용되었고 베이스 매사 식각과 소자 분리 식각 (Isolation etching)은 $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O=4:1:50$ 용액이 사용되었다. 매사식각 공정후 급속열처리장치(RTA)를 이용하여 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 의 N_2 분위기에서 10 초 동안 오믹 전극을 형성하였다. 비아 형성을 위해서 C_2F_6 플라즈마를 사용한 MERIE (magnetically enhanced reactive ion etching)에 의해 SiN 절연층을 식각하였다. 패드 금속에는 Ti/Au 가 사용되었다.

본 연구의 소자들은 비자기정렬구조(non-self-aligned structure)를 갖으며 층간 절연을 위해 SiN 를 PECVD 로 증착하였다. 최대 에미터 면적 $15 \times 50\mu\text{m}^2$ 에서 최소 에미터 면적 $1 \times 10\mu\text{m}^2$ 까지의 여러 에미터 면적을 갖는 AlGaAs/GaAs HBTs 를 설계, 제작하였다. HBT 소자들은 HP4145B parameter analyzer 로 측정하였다.

3. 측정 결과 및 분석

본 연구에서는 공통 에미터 특성 측정을 통해 얻어진 Gummel Plot 을 통해서 크기가 다른 소자들의 공통 에미터 전류 이득을 얻었다. 그림 1 은 각 다른 크기를 갖는 HBT 의 Gummel Plot 을 보이고 있다. 에미터-베이스간 전압 V_{BE} 에 대해 각 소자들은 같은 크기의 콜렉터 전류 밀도 J_C 를 보이는데, 비해 각각 다른 크기의 베이스 전류 밀도 J_B 를 갖는다. V_{BE} 가 낮음(대략 1.1V 이하) 저 전류 밀도 영역에서의 J_C 및 J_B 부분은 누설 성분을 설명하고 있다. 면적이 작아질수록 누설되는 전류 밀도 성분은 면적에 반비례하는 특성을 보이고 있다. 이는 면적에 대해 주변 둘레 길이가 커짐에 따라 주변 둘레에 높은 전류 밀도가 존재함을 보여준다.

J_C 가 인가 전압에 대해 지수 함수적인 증가를 보이는 영역에서의 이상계수는 1.25의 값을 갖는데 이는 참고 문헌[1]에서 제안된 전압 분해식에 따르면 이상계수는 에미터와 베이스 도핑 농도에 의해서 결정된다는 것으로부터 이해될 수 있다. 에미터와 베이스의 도핑 분포가 접합면 부근에서 이상적인 분포 특성을 갖지 못하고 다른 도핑 분포를 갖게 되어 나타나는 결과로 볼 수 있다. 이를 공통 에미터 I-V 특성에서의 다소 큰 오프셋 전압을 통해서도 설명할 수 있다. 이 영역에서의 베이스 전류 밀도 성분은 소자의 면적이 작아질수록 높은 베이스 전류 밀도를 보이고 1.8 에서 2의 사이의 이상계수를 보이는데 면적의 크기가 작아질수록 2의 이상계수를 갖는다. 이는 GaInP/GaAs HBTs 가 저전압 영역에서만 베이스 전류 밀도가 2인 이상계수에 의존하는 것과 비교 될 수 있다[1].

V_{BE} 가 높은(대략 1.4V 이상) 고 전류 밀도 영역에서의 J_C 및 J_B 부분은 소자의 에미터와 베이스 저항 성분에 의한 전압 강하에 의한 것이고 소자의 크기가 커짐에 따라 직렬 저항에 의한 전압 강하 영향이 현저하게 커짐을 알 수 있다.

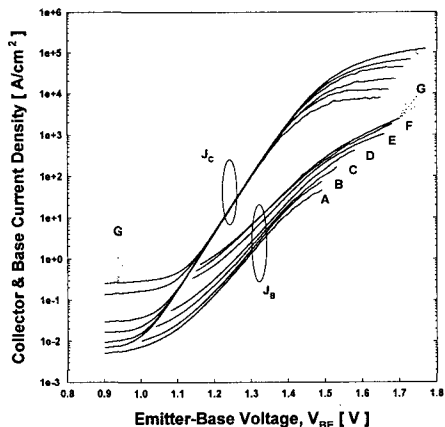


Fig. 1. The Gummel plots of the collector and the base current densities as a function of the base-emitter voltage for the devices with various emitter sizes of A: $15 \times 50\mu\text{m}^2$, B: $10 \times 50\mu\text{m}^2$, C: $5 \times 50\mu\text{m}^2$, D: $3 \times 33.3\mu\text{m}^2$, E: $3 \times 10\mu\text{m}^2$, F: $1.5 \times 15\mu\text{m}^2$, G: $1.5 \times 10\mu\text{m}^2$.

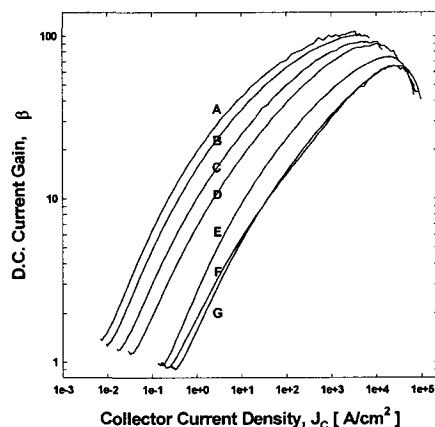


Fig. 2. A plot of the D.C. current gain β versus the collector current density J_C for the devices with various emitter sizes of A: $15 \times 50\mu\text{m}^2$, B: $10 \times 50\mu\text{m}^2$, C: $5 \times 50\mu\text{m}^2$, D: $3 \times 33.3\mu\text{m}^2$, E: $3 \times 10\mu\text{m}^2$, F: $1.5 \times 15\mu\text{m}^2$, G: $1.5 \times 10\mu\text{m}^2$.

그림 2는 J_C 에 대한 전류 이득 β 의 변화를 보이고 있다. 저 전류 밀도 영역에서의 β 은 J_C 의 증가에 따라 비례 특성을 보이고 있으며 이상적으로 유도된 식들을 고려해보면[1,2], J_C 에 대한 β 의 증가율은 $J_C^{-1/2}$ 로 근사할 수 있다. 그림 2에서 GaInP/GaAs HBTs는 β 의 특성 곡선이 β 의 증감에 따라 평탄한 영역이 존재하는 반면에[1],

AlGaAs/GaAs HBTs의 곡선에는 존재하지 않는다. 이는 인가 전압에 대해 J_b 성분이 J_c 성분과 다른 이상 계수를 갖고 지수 함수적으로 증가함을 나타낸다. 서론의 전체 부분을 입증한다. 베이스 전류 밀도 성분은 이상 계수가 거의 2에 가까운 성분에 의해 좌우되고 전류 이득 특성도 이에 영향을 받는다. AlGaAs/GaAs HBT에 있어서 이상 계수가 1인 베이스 벌크 재결합 성분은 이상 계수가 2인 성분에 비해 극히 작아 무시할만하다. 이는 벌크 재결합 성분이 베이스의 재결합 성분을 지배하는 특성을 보이는 GaInP/GaAs HBT의 베이스 전류 밀도 성분 특성과는 대조를 보인다[1].

그림 3은 에미터 면적에 대한 β 의 역의 변화를 각 J_c 에 대해서 나타내고 있다. 그림에 제시된 결과는 에미터의 주변 둘레 길이는 일정하고 면적이 다르게 설계된 HBT 소자(에미터 면적: $1 \times 10.5\mu\text{m}^2$, $1.2 \times 10.3\mu\text{m}^2$, $1.5 \times 10\mu\text{m}^2$, $3 \times 8.5\mu\text{m}^2$)들로부터 측정된 것이다. 이는 에미터의 둘레 길이가 일정하게 하여 주변 둘레에 의해 영향받는 성분들이 일정하게 유지되고 에미터 면적에 영향을 받는 성분들에 의한 전류 이득의 변화를 고찰하기 위해서이다. 결과로부터 소자의 면적이 작아질수록 전류 이득에 대해 반비례함을 보이고 있다. 이는 이상 계수가 2에 가까운 공간 전하 영역에서의 재결합 전류 밀도 성분은 면적이 작아질수록 커지게 되고 이로 인한 전류 이득의 감소도 커지게 된다.

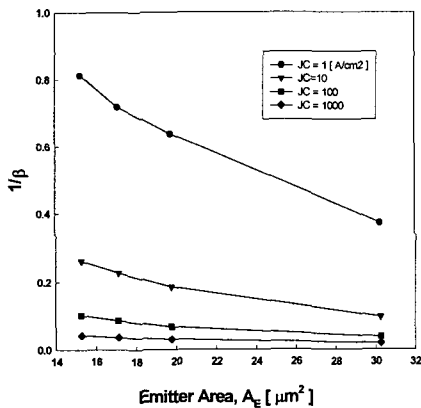


Fig. 3. The plot of $1/\beta$ as a function of the emitter area A_E at the collector current densities J_c of 1, 10, 100, 1000[A/cm²]. Devices having the same peripheral length were fabricated and measured for the different emitter devices ($1 \times 10.5\mu\text{m}^2$, $1.2 \times 10.3\mu\text{m}^2$, $1.5 \times 10\mu\text{m}^2$, $3 \times 8.5\mu\text{m}^2$)

그림 4는 에미터의 면적 A_E 에 대한 둘레 길이 P_E 의 비의 함수로서 β 의 역의 변화를 보이고 있다. 이미 널리 알려

진 에미터 크기 효과[1]에 대해서 이를 적용해 보면 그림의 각 곡선의 기울기는 소자의 표면 전류 밀도를 각 소자의 J_c 로 나눈 것과 같고 소자의 크기 즉, 에미터 면적에 대한 둘레 길이의 비가 커질수록 표면 재결합 전류 밀도 성분은 선형적으로 증가하여 전류 이득은 감소한다.

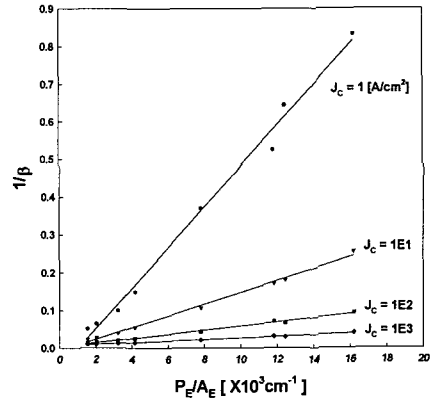


Fig. 4. The plot of $1/\beta$ as a function of the ratio of the emitter peripheral length P_E to the emitter area A_E at the collector current densities J_c of 1, 10, 100, 1000[A/cm²]. The lines were extrapolated from each datum of $1/\beta$ against P_E/A_E .

4. 결론

본 논문에서 전류 이득은 면적의 감소 또는 소자의 면적에 대한 주변 길이의 비의 증가에 따라 감소하는 특성을 보인다는 것을 증명하고 있다. 이는 면적이 감소함에 따라 베이스 전류 밀도 성분의 증가로 전류 이득의 감소를 나타냈으며, 소자의 크기가 작아짐에 따라 표면에서의 재결합 전류 밀도 성분의 증가로 인해 전류 이득은 감소함을 보였다. AlGaAs/GaAs HBT의 전류 이득은 소자의 크기가 작아질수록 에미터 면적에 의해 비례하는 베이스 전류 밀도 성분과 에미터 둘레 길이에 비례하는 베이스 전류 밀도 성분 모두에 의해 결정됨을 보였다. 본 연구로부터 AlGaAs/GaAs HBT는 전류 이득이 에미터 크기와 비례하고 주변 둘레에 반비례하는 특성을 보인다는 것을 입증하였으며, 이러한 관계로부터 아날로그 또는 디지털 회로의 최적화된 HBT 소자 설계에 기여할 수 있다.

참고 문헌

- [1] J.O. Jeong, H.Y. Lee, T.W. Lee, M.P. Park, S.H. Park and K.E. Pyun, JKPS, vol. 29, p.526, 1996
- [2] Tae-Woo Lee and P.A. Houston, IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 40, p.1390,1993