

InGaP/GaAs HBT의 DC 특성과 신뢰도

최 번재, 최 재훈, 송 정근*
동아대학교, 공과대학 전자공학과
부산시 사하구 하단동 840번지
* cksong@seunghak.donga.ac.kr

DC Characteristics and Reliability of InGaP/GaAs HBTs

Pun-Jae Choi, Jae-Hoon Choi, Chung-Kun Song*
Dept. of Electronic Engineering Dong-A University
840 Hadandong Sahaku Pusan 604-714 Korea
* cksong@seunghak.donga.ac.kr

Abstract

Recently, InGaP/GaAs HBTs have been much interested as a potential replacement for AlGaAs/GaAs HBTs because of their superior device and material properties. In this paper, DC characteristics of InGaP/GaAs HBTs and the temperature dependance as well as the reliability were investigated comparing with AlGaAs/GaAs HBTs. As a results InGaP/GaAs HBTs produced the superior performance to AlGaAs/GaAs HBTs.

알려지고 있다. 따라서, 온도가 증가할 때 AlGaAs/GaAs HBT에 비해 베이스에서 에미터로의 정공 역주입을 크게 줄여 전류이득의 감소를 상당히 개선할 수 있다. 그리고, InGaP/GaAs HBT는 전도대의 에너지 갭 불연속 차이(ΔE_c)가 매우 작아 AlGaAs/GaAs HBT에서와 같은 grading 공정을 추가할 필요가 없으며, 뿐만 아니라 InGaP과 GaAs를 선택적으로 식각할 수 있기 때문에 높은 신뢰성을 가지는 에미터 ledge 구조로 제작하기가 용이하다[3].

I. 서론

HBT(Heterojunction Bipolar Transistor)는 큰 전류이득, 높은 주파수 특성, 그리고 고전력 처리능력 등의 우수한 성능으로 인해 초고주파 및 광집적회로의 능동소자 등으로 그 활용 범위가 더욱 광범위해지고 있다. 그 중에서도 AlGaAs/GaAs HBT의 경우 안정된 적층기술을 기반으로 HBT 개발 초기부터 많은 연구 대상이 되어왔다.

이러한 우수한 특성으로 인해 최근 InGaP/GaAs HBT는 AlGaAs/GaAs HBT를 대체할 차세대 기술로 인정되어 폭 넓은 연구는 물론 상용화를 위한 개발도 추진 중이다. 본 논문에서는 InGaP/GaAs HBT의 DC 파라미터에 대한 온도 특성을 조사함으로써, 고온에서 안정적인 소자 성능을 요구하는 응용분야에 활용될 수 있는 물론 온도변화에 따른 안정적인 소자 제작을 위한 설계에 있어서도 유용한 자료로 제시되어 될 것이다.

InGaP/GaAs HBT는 에미터 재료인 InGaP의 에너지 갭이 1.89~1.92eV[1,2] 정도로 AlGaAs의 에너지 갭 1.78eV보다 크며, 베이스 재료인 GaAs와 이종접합을 형성할 경우, 에너지 갭 차이가 가진자대와 전도대에 거의 동일하게 위치한 AlGaAs/GaAs와 달리 InGaP/GaAs는 에너지 갭 차이의 대부분이 전도대에 위치한 것으로

II. 시료 및 실험

실험에 사용된 InGaP/GaAs HBT는 (100) GaAs 기판 위에 표1과 같이 MOCVD로 에피층을 성장시킨 다음, 매사식각과 비자기정렬 공정으로 제작한 단일 에미터 소자이다.

표1. InGaP/GaAs HBT의 조성표

반도체	폭(A)	도펀트	농도(cm^{-3})
n-InGaAs	500-800	Si	2×10^{19}
n-GaAs	500	Si	5×10^{18}
n-GaAs	1300	Si	3×10^{17}
n-InGaP	500	Si	3×10^{17}
p-GaAs	1400	C	1×10^{19}
n-GaAs	10000	Si	2×10^{16}
n-GaAs	6000	Si	5×10^{18}

에미터 전극과의 접촉 저항을 줄이기 위한 에미터 캡층인 n-InGaAs는 $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O$ 로 습식 식각하였고, n-GaAs는 CCl_2F_2 를 사용하여 RIE(Reactive ion etching)하였다. 에미터 캡층 에칭에 있어서 에미터 전극이 mask 역할을 하며, 에칭의 방향성에 의해 에미터 전극 아래쪽에 언더컷이 생성된다. 이어서 비자기정렬 공정을 사용하여 에미터 ledge를 제작하였다. Photoresist를 PECVD로 성장시킨 다음, 베이스 전극이 들어갈 부분을 제거하면 InGaP 에미터가 남게 된다. InGaP 에미터를 선택적 식각율이 우수한 HCl 용액을 사용하여 식각하면 에미터 ledge가 완성되고, 식각된 에미터 아래의 GaAs 베이스 위에 베이스 전극을 올린다. 제작된 ledge의 길이와 두께는 각각 $1.5\mu m$, 500A 이며, 베이스 전극은 베이스와 접촉 저항이 매우 적은 AuBe/Pd/Au를 사용한다. Photoresist를 제거한 후, 컬렉터를 습식 식각하여 소자를 제작하였다. 또한 소자의 열 특성을 개선하기 위해 소자 뒷부분을 $100\mu m$ 정도 남기고 갈아버리는 lapping 공정 및 via hole도 뚫었다. 그림1은 제작된 소자의 SEM 사진이다.

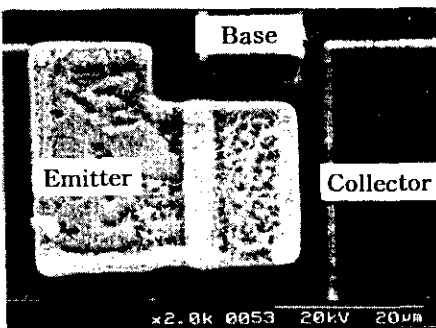


그림 1. InGaP/GaAs HBT의 SEM 사진

실험은 InGaP/GaAs HBT에 기판온도 300K에서 540K까지 20K씩 증가시키면서 Gummel 도표, 전류이득, 에미터-베이스간 전류-전압 특성, 베이스-컬렉터간 전류-전압 특성, 공동에미터 I_c-V_{ce} 출력특성을 측정하였다. 측정은 HP4155A와 소자의 온도를 제어할 수 있는 탐침장치를 사용하였으며, 모든 실험은 프로그램되어 자동 수행하였다.

III. 결과

1. Gummel 도표

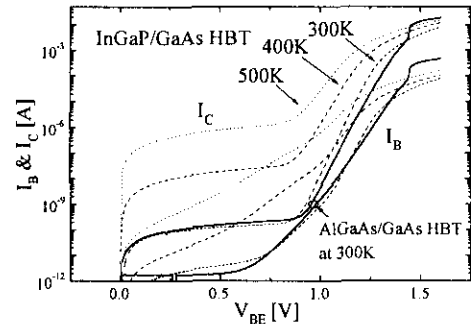


그림 2. 온도에 따른 Gummel 도표

그림2에 온도에 따른 InGaP/GaAs HBT의 Gummel 도표를 그려 놓았다. 340K에서의 이상계수 $\eta_B=1.29$, $\eta_C=1.04$ 로 매우 이상적임을 알 수 있다. 이 값은 참고문헌 [4]에서 InGaP/GaAs HBT의 이상계수 $\eta_B=1.10$, $\eta_C=1.04$ 와 거의 일치하며, 참고문헌 [5]에서 조사한 AlGaAs/GaAs HBT의 이상계수 $\eta_B=1.79$, $\eta_C=1.04$ 에 비해 매우 작은 값을 알 수 있다. 또한, 낮은 전류영역에서 에미터-베이스 접합의 공간전하영역 재결합 전류가 매우 작은 값을 가지고, 이는 작은 전류밀도($\sim 10^{-6}A/cm^2$)에서도 전류이득이 1보다 크다는 것과 관련이 있다[4].

InGaP/GaAs HBT는 전도대의 에너지 갭 불연속 차이(ΔE_C)가 AlGaAs/GaAs HBT에 비해 매우 작으므로, ΔE_C 로 인해 AlGaAs/GaAs HBT에서 주로 나타났던 thermionic emission에 의해 전류가 형성된다고 생각된다기보다는 에미터에서 베이스로 주입된 전자의 베이스 확산에 의해 전류가 형성된다고 관찰되어진다[6]. 그림3은 온도에 따른 베이스 및 컬렉터의 이상계수 값을 측정하는 것으로, 온도가 증가할수록 이상계수 값이 증가

하고있음을 알 수 있다.

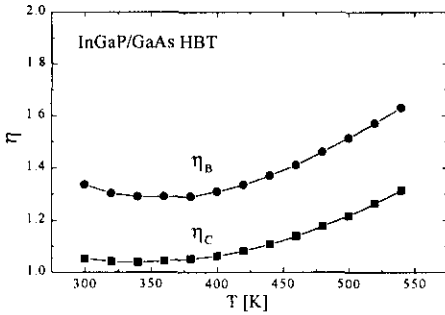


그림 3. 온도에 따른 ideal factor(η) 변화

2. 전류이득

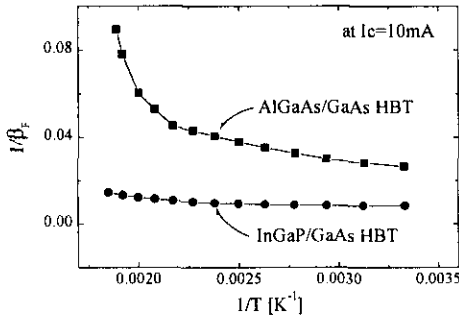


그림 4. 온도 변화에 따른 InGaP/GaAs HBT와 AlGaAs/GaAs HBT의 전류이득 비교

그림4는 콜렉터 전류 $I_C=10mA$ 에서의 전류이득 변화를 AlGaAs/GaAs HBT와 비교한 것이다. 그림4에서 보는 바와 같이 InGaP/GaAs HBT가 온도에 대해 매우 안정적인 전류이득을 가짐을 알 수 있다. 이는 에미터-베이스의 가전자대의 에너지 갭 불연속 차이가 AlGaAs/GaAs HBT에 비해 InGaP/GaAs HBT가 더 크기 때문에 베이스에서 에미터로의 정공 역주입이 효과적으로 차단되어 비교적 높은 온도범위에서도 안정적인 전류이득 특성을 나타내고 있다. 식 (1)을 이용하여[7] 가전자대의 에너지 갭 불연속 차이를 구해보면 $\Delta E_v=0.257eV$ 로 AlGaAs/GaAs HBT의 $\Delta E_v=0.19eV$ 보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있다.

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_0} + \frac{x_B N_B D_p}{x_E N_E D_n} e^{\Delta E_v/kT}$$

$$= \frac{1}{\beta_0} + f_1 e^{\Delta E_v/kT} \quad (1)$$

3. I-V 출력특성

그림2의 Gummel 도표에서 살펴 본 바와 같이 온도가 증가함에 따라 베이스 전류 I_B 가 증가한다. 그림5의 I_C-V_{CE} 출력 특성에 나타난 바와 같이 온도가 증가함에 따라 증가한 I_B 값을 일정하게 유지하기 위해 V_{BE} 가 낮게 유지되고, 이로 인해 출력전류 I_C 는 감소하게 된다.

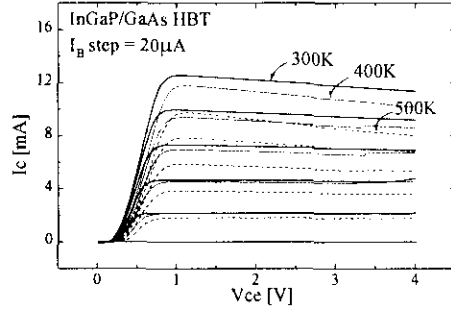


그림 5. 온도에 따른 I_C-V_{CE} 출력 특성

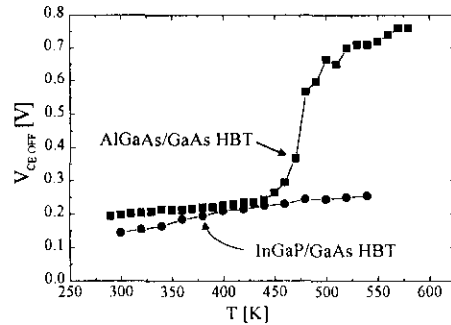


그림 6. 온도에 따른 InGaP/GaAs HBT와 AlGaAs/GaAs HBT의 $V_{ce,off}$ 변화

그림6은 온도에 따른 InGaP/GaAs HBT와 AlGaAs/GaAs HBT의 오픈 전압의 변화를 나타낸 것이다. AlGaAs/GaAs HBT의 경우 450K 정도까지는 일정한 오픈 전압을 유지하나 그 이상 온도가 증가하면 급격한 오픈 전압의 상승[8]이 발생하는 반면 InGaP/GaAs HBT는 약간 증가하는 경향은 있으나 넓은 온도범위에 걸쳐 매우 안정적인 값을 알 수 있다. 이는 InGaP/GaAs HBT의 에미터 진도대 불연속 에너지가 아주 작으므로 콜렉터 동종접합의 특성과 유사하기 때문이다.

4. 신뢰도

매사 구조를 가진 AlGaAs/GaAs HBT 열화의 주된 원인은 외부 베이스 표면과 이를 둘러싸고 있는 질화막 사이의 표면상태에 의한 표면 재결합 전류의 증가가 그 원인으로 나타났다. 이를 개선하기 위해 에미터 ledge 구조의 제작을 시도하였으나, 에미터 재료인 AlGaAs와 GaAs를 선택적으로 식각하는 식각용액이 아직 개발되지 않아 ledge의 두께와 길이를 제어하기 위해 조사되어진 식각용액에 기초하는 시간적인 방법밖에 없어 공정상의 어려움은 물론 제작된 소자에 있어서도 그 균일성을 확보하기 어려운 상태이다.

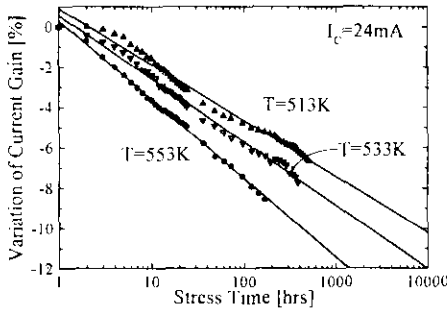


그림 10. 스트레스에 따른 전류이득의 변화

앞서 언급한 바와 같이 선택적 식각을 비롯한 여러 가지 장점을 지닌 InGaP 에미터로 ledge를 제작한 InGaP/GaAs HBT로 513K, 533K, 553K에서 콜렉터 전류 24mA로 일정시간 간격으로 스트레스를 인가한 후, 300K에서의 전류이득을 측정하는 실험을 반복한 결과를 그림7에 그려 놓았다. 그림과 같이 전류이득이 일정한 형태로 감소함을 알 수 있으며, 스트레스를 인가하기 전의 전류이득에 비해 전류이득이 10% 감소하는 시간을 각각 400, 2000, 10000시간을 구할 수 있었다. 이를 이용하여 Arrhenius 도표로부터 활성화 에너지 $E_A=1.97\text{eV}$, 140°C 에서의 평균 실재시간 $MTTF=4.8 \times 10^8$ 시간을 얻을 수 있었다.

이러한 신뢰도의 개선은 InGaP ledge 에미터를 사용하여 베이스 표면 재결합 상태를 현저히 감소시킨 것과 HCl계 식각용액을 이용하여 InGaP 에미터 ledge를 안정적으로 제작할 수 있었기 때문이다.

IV. 결론

InGaP/GaAs HBT의 DC 특성을 300K에서 540K 범위에서 측정하였으며, InGaP 에미터와 GaAs 베이스 사이의 가전차대 에너지 갭 불연속 ΔE_g 가 0.257eV 정도로 AlGaAs/GaAs HBT의 0.19eV[8] 보다 훨씬 커 온도에 대해 매우 안정적임을 알 수 있었다. 또한 가속수명실험 결과 신뢰도 측면에서도 활성화 에너지 $E_A=1.97\text{eV}$ 로 매우 신뢰성이 높다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] A. W. Hanson, *et. al.*, "Comparison of In_{0.5}Ga_{0.5}P/GaAs Single- and Double-Heterojunction Bipolar Transistors with a Carbon-Doped Base", IEEE Electron Device Letts., vol. 14, no. 1, pp. 25-28, 1993.
- [2] William Liu, *et. al.*, "1.5-W CV S-Band GaInP/GaAs/GaInP Double Heterojunction Bipolar Transistor", IEEE Electron Device Letts., vol. 15, no. 6, pp. 215-217, 1994.
- [3] 최번재, 송정근, "High Reliable GaAs HBT with InGaP Ledge Emitter Structure", 제5회 한국반도체학술대회, pp. 459-460, 1998.
- [4] William Liu, and S.-K. Fan, "Near-Ideal I-V Characteristics of GaInP/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors", IEEE Electron Device Letts., vol.13, no.10, pp. 510-512, 1992.
- [5] Klaus Fricke, *et. al.*, "AlGaAs/GaAs HBT for High-Temperature Applications", IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 39, no. 9, pp. 1977-1981, 1992.
- [6] William Liu, *et. al.*, "Current Transport Mechanism in GaInP/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors", IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 40, no. 8, pp. 1378-1382, 1993.
- [7] H. Kroemer, "Heterojunction Bipolar Transistors and intergrated circuits", Proc. IEEE, vol. 70, pp. 13-25, 1982.
- [8] 김득영, 박재홍, 송정근, "AlGaAs/GaAs HBT의 DC 파라미터에 미치는 온도영향 해석", 대한전자공학회논문지, vol. 33, no. 12, pp. 39-46, 1996.