

WN_x 에미터 전극을 갖는 자기정렬 AlGaAs/GaAs HBT 의 제작과 특성

이종민*, 이태우, 박문평, 최인훈*, 박성호, 박철순

*고려대학교 재료공학과

*서울시 성북구 안암동 5 가 1

한국전자통신연구원 반도체연구단

대전광역시 유성구 가정동 161 번지

Fabrication and Characteristics of Self-aligned AlGaAs/GaAs HBT using WN_x as emitter metal

Jong-Min Lee*, Tae-Woo Lee, Moon-Pyung Park, In-Hoon Choi*, Sung-Ho Park and Chul Soon Park

*Department of Materials Science, Korea Univ.

*5-1 Anam-dong, Sungbuk-gu, Seoul 136-075

Semiconductor Division, Electronics and Telecommunications Research Institute

161 Kajong-dong, Yusong-gu, Taejon 305-350

Abstract Self-aligned AlGaAs/GaAs HBTs with the emitter area of $1.5 \times 10 \mu\text{m}^2$ were fabricated using WN_x as emitter metal. Their DC and RF characteristics were investigated. The common emitter current gain was 45 at $J_c = 6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$. From the Gummel plot, the ideality factors of I_c and I_b were 1.18 and 1.70, respectively. Emitter and base resistances were extracted from voltage drop region in Gummel plot, and their values were 5.3Ω and 38.2Ω . The extrapolated $f_T = 72\text{GHz}$ and $f_{max} = 81\text{GHz}$ were obtained at $V_{CE} = 2 \text{ V}$.

특성으로 인해 고속 아날로그와 디지털 소자, 고주파 전력 소자 등으로 응용되고 있다.^[1, 2] 이러한 응용을 위해서는 소자의 기생 성분을 최소화한 개선된 형태의 HBT가 필요하며, 이러한 목적에 부합하는 것이 자기정렬 HBT이다. 자기정렬 HBT를 제작할 때 중요한 점은 에미터 전극이며 고온에서 안정성이 큰 텅스텐 계열의 내열금속을 이용하는 연구가 관심을 얻고 있다. 오믹 전극으로서 텅스텐계 금속을 사용하게 되면, Au 계열의 오믹접촉이 가지는 열적 불안정성을 개선할 수 있으며 건식 식각 공정에도 적합하다. 이중 WN_x는 GaAs MESFET의 gate 전극으로서 연구되었으며^[3], HBT의 오믹 전극으로서도 충분한 가능성을 나타내었다.^[4] 하지만 WN_x을 에미터 오믹 전극으로 사용하여 제작된 HBT의 특성은 거의 보고된 바 없다. 본 연구에서는 에미터 오믹 전극으로서 WN_x를 사용하여 베이스 전극이 에미터에 자기정렬되는 HBT를 제작하였으며, 제작된 HBT 소자의 특성을 살펴보고 같은 에미터 크기를 가지나 비자기정렬 구조를 가지는 HBT의 특성과 비교하였다. 또한, 20 Gb/s의 전송속도를 갖는 광대역중 폭기의 능동소자로서의 WN_x 에미터 전극을 갖는 자기

1. 서론

초고속 및 초고주파 전자소자로서 각광받고 있는 이중 접합 바이폴라 트랜지스터(Heterojunction Bipolar Transistor : HBT)는 밴드갭이 상이한 에미터 베이스 간 이중접합을 이용하여 전자의 에미터 주입효율을 높일 수 있으며, 전자의 이동도가 높은 화합물 반도체를 사용함으로써 우수한 DC 및 RF 특성을 얻을 수 있다. 현재 널리 연구되고 있는 AlGaAs/GaAs HBT는 우수한

정렬 HBT 의 가능성을 살펴모았다.

2. 소자 제작

제작한 HBT 에 사용된 에피층은 3 인치 반절연성 GaAs 기판 위에 MOCVD 방법으로 성장하였으며, 불순물로서 n-type 의 경우는 Si 을 p-type 의 경우는 C 을 사용하였다. AlGaAs 와 GaAs 의 완충층을 각각 성장한 후, $4 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 으로 도핑한 5000 Å 의 부컬렉터층과 $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 으로 도핑한 4000 Å 컬렉터층을 성장한 후, $3 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 의 고농도로 도핑한 700 Å 의 베이스층을 성장시켰다. 에미터층으로는 먼저 1 차 에미터 층으로 큰 에너지 갭을 갖는 AlGaAs 층을 $2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 로 도핑하여 1500 Å 성장시키고, 2 차 에미터층으로 $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 로 도핑된 경사형 AlGaAs 층을 500 Å 성장시켰다. 오믹접촉을 위해 $3.7 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 으로 도핑된 GaAs 층과 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 으로 도핑된 InGaAs 층을 성장시켜 HBT 에피층의 성장을 완성하였다.

WN_x 에미터 전극을 갖는 자기정렬 HBT 를 제작하기 위해서 다음과 같은 방법을 사용하였다. 먼저 WN_x (1200 Å) 을 스퍼터를 이용하여 형성한 후 그 위에 Ti/Pt (500 Å / 200 Å) 층을 lift-off 방법에 의해 원하는 패턴으로 형성시켰다. Ti/Pt 층을 마스크로 사용하여 WN_x 층을 자계인가형 건식 식각(MERIE) 방법으로 SF_6/CHF_3 혼합가스를 사용하여 에칭한 후, 캡층과 에미터층을 $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ 와 $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ 의 에칭액을 사용하여 베이스층까지 역메사 형태가 되도록 에칭하였다. 베이스층이 노출된 후 에미터 전극과 베이스 전극

으로 동시에 Au/Pt/Ti/Pt 를 올려 자기정렬 HBT 를 제작하였다. 베이스 메사식각 후 컬렉터 전극으로는 Au/Ti/Au/Ge/Ni 을 증착하고 급속열처리를 하였다. 습식에칭으로 소자절연을 하였으며 SiN_x 를 PECVD 방법으로 증착하여 소자를 passivation 하고 급속배선을 형성하여 HBT 소자를 완성하였다. 제작된 HBT 의 구조를 Fig. 1 에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

제작된 WN_x 에미터 전극을 갖는 자기정렬 HBT 의 DC 특성은 Cascade Microprobe station 과 HP4145B parameter analyzer 를 이용하여 측정하였으며, RF 특성은 HP8510B Network Analyzer 로써 S-parameter 를 측정하였다. Fig. 2 는 에미터 크기가 $1.5 \times 10 \mu\text{m}^2$ 인 자기정렬 HBT 소자의 에미터 공통 I-V 특성 곡선이다. 이때의 소자의 V_{ce} off-set 전압은 대략 0.25 V 로 나타났다. 이 특성곡선에서 동작전류가 증가함에 따라 컬렉터 전류의 역경사가 나타나는 현상은 고 전류에서 발생하는 열에 의한 전류이득 감소에 의한 것이다.^[5] 컬렉터 전류밀도(J_c)가 $6 \times 10^4 \text{ A}/\text{cm}^2$ 에서 에미터 공통 전류이득은 45 이었다. Fig. 3 은 베이스-에미터 전압 (V_{be}) 에 따른 컬렉터 전류(I_c) 및 베이스 전류(I_b) 를 나타내는 Gummel plot 이다. 자기정렬 HBT 의 I_c 의 이상 계수는 1.18, I_b 의 이상 계수는 1.70 을 나타내었으며, 비자기정렬 HBT 의 I_c 의 이상 계수는 1.18, I_b 의 이상 계수는 1.74 로 나타났다. 이러한 값은 일반적으로 알려진 AlGaAs/GaAs HBT 의 값과 큰 차이가 없으므로,

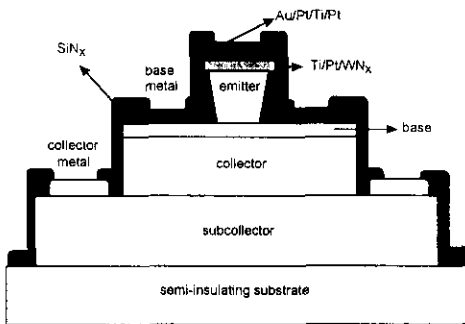


Fig. 1. Cross-section of the self-aligned AlGaAs/GaAs HBT.

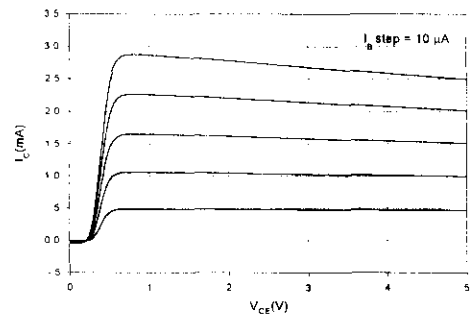


Fig. 2. Common emitter I-V characteristic of the self-aligned AlGaAs/GaAs HBT with the emitter area of $1.5 \times 10 \mu\text{m}^2$.

WN_x 에미터 전극을 사용한 HBT의 특성은 일반적인 HBT와 유사할 것으로 생각된다. 두 소자의 V_{BE} 증가에 따른 전류의 변화를 살펴보면 낮은 전압에서는 자기정렬 HBT의 I_C와 I_B가 더 큰 값을 갖는데 이는 트랜지스터가 작동되기 전 누설전류가 더 크게 나타남을 의미한다. 이러한 누설전류는 에미터 전극과 베이스 전극간의 간격이 감소함에 따라 증가한 것으로 생각 된다. V_{BE}가 증가하여 트랜지스터가 작동하게 되면 두 소자의 I_C는 일치함을 알 수 있다. I_B를 살펴 보면 약간의 차이가 나타나는데 비자기정렬 HBT의 I_B가 크게 나타난다. 이는 외부 표면 재결합에 의한 베이스 전류가 증가하기 때문이다. Gummel plot으로부터 J_C에 따른 전류이득을 구해보면 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 J_C가 증가함에 따라 전류이득은 증가하며 J_C가 3×10⁴ A/cm²일 때 최대이득 57을 얻는다. 최대이득을 얻기

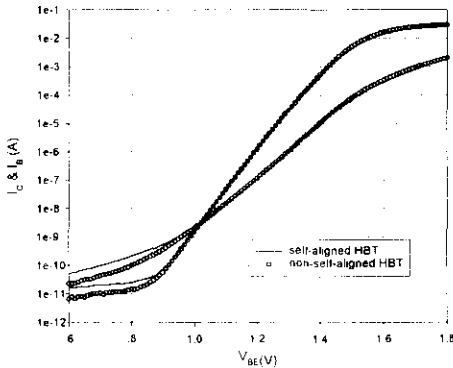


Fig. 3. Forward Gummel plot of the self-aligned and non-self-aligned AlGaAs/GaAs HBTs.

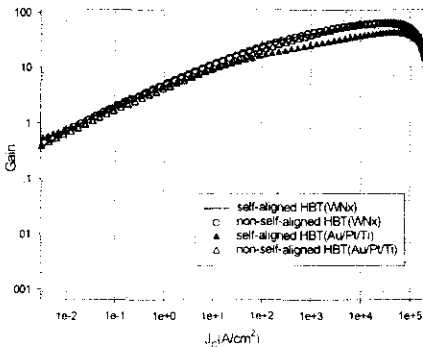


Fig. 4. Current gain as a function of collector current for the AlGaAs/GaAs HBTs.

전까지 자기정렬 HBT의 전류이득이 비자기정렬 HBT의 전류이득보다 큼을 알 수 있으며, 높은 컬렉터 전류밀도에서 전류이득이 감소하는 것은 Kirk effect에 의한 베이스 확장효과 때문이다. 에미터 전극으로서 Au/Pt/Ti을 사용한 HBT와 비교해보면 전류이득에 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 한편, V_{BE}가 큰 영역에서는 에미터 저항(R_E)과 베이스 저항(R_B)에 의한 전압강하에 의해 I_C와 I_B의 변화가 나타나게 된다. 특히, 자기정렬 HBT의 경우는 비자기정렬 HBT와 비교해서 베이스 저항값이 감소하여 고속특성이 향상될 것으로 기대되므로 정확한 저항값의 결정이 필요하다. 일반적으로 에미터의 저항을 구하기 위해서는 개방 컬렉터법을 사용하며, 베이스의 저항을 구하기 위해서는 입력 임피던스 반원법이 사용된다. 하지만 개방 컬렉터법에서 결정되는 에미터 저항값은 베이스 전류의 영향을 많이 받으며 에미터 저항이 작을 때는 정확한 값을 결정하기가 어렵다. 일반적으로 이 방법에 의해 추출된 저항값은 실제보다 크다고 알려져 있다. 입력 임피던스 반원법으로는 베이스 저항과 에미터 저항의 합을 구하게 되는데 이 값을 측정시 가해주는 전류값에 따라 변화가 심하므로 정확한 값을 구하기가 어렵고 에미터 저항을 정확히 알고 있어야 한다는 단점이 있다. 따라서, Gummel plot에서 저항으로 인한 전압강하가 일어나는 고전류 영역에서의 전류값의 변화로부터 저항값을 결정하였다. 이때 전압강하는 다음과 같다.

$$\Delta V = V_{BE}^* - V_{BE} = (I_B + I_C)R_E + I_B R_B$$

여기서 V_{BE}^{*}는 인가 전압이며, V_{BE}는 실제 베이스와 에미터 사이에 걸리는 전압이다. 이 식으로 결정된 자기정렬 HBT의 R_E = 5.3 Ω, R_B = 38.2 Ω이었으며, 같은 방법으로 비자기정렬 HBT에 대해 구해보면 R_E = 3.3 Ω, R_B = 64.1 Ω으로 나타났다. 즉, 자기정렬 HBT의 경우 에미터 저항값은 약간 증가하였으나 베이스 저항값은 크게 감소한 것을 알 수 있다. 에미터 저항값이 자기정렬 HBT에서 증가한 것은 에미터 전극이 Au/Pt/Ti/Pt/Ti/Pt/WN_x의 여러 층으로 구성되어 저항

값이 커진 것으로 생각되며, 베이스 저항값의 감소는 extrinsic 베이스 저항값이 감소하기 때문이다. 따라서, 베이스 저항값이 크게 감소하는 자기정렬 HBT의 고속특성, 특히 f_{max} 가 더욱 우수할 것으로 기대된다. Fig. 3에서 고전류 영역에서의 두 소자의 전류값의 차이는 주로 에미터 저항에 관계된다. 즉, I_C 가 I_B 보다 훨씬 크므로 에미터 저항이 큰 자기정렬 HBT가 큰 전압강하를 나타낸다.

제작한 AlGaAs/GaAs HBT의 RF 특성을 조사하기 위해 0.5 ~ 39.5GHz의 주파수 영역에서 HBT 소자의 S-parameter를 측정하였다. $V_{ce} = 2V$, $I_B = 0.2mA$ 일 때 S-parameter로부터 구한 자기정렬 AlGaAs/GaAs HBT의 에미터 공통 전류이득(h21)과 전력이득(MSG)을 비자기정렬 HBT의 값과 비교해서 Fig. 5에 나타내었다. 외삽법으로 구한 자기정렬 HBT의 차단 주파수(f_T)는 72GHz, 최대 공진 주파수(f_{max})는 81GHz이었으며, 비자기정렬 HBT의 경우는 f_T 는 78GHz, f_{max} 는 63GHz이었다. 즉, 자기정렬 HBT가 f_T 는 약간 감소했지만 f_{max} 는 상당히 증가하여, 자기정렬의 효과가 나타난 것을 알 수 있다.

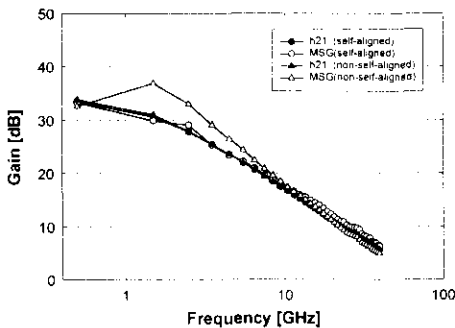


Fig.5. Frequency response of current gain(h21) and maximum stable gain(MSG) for the self-aligned and non-self-aligned AlGaAs/GaAs HBTs.

4. 결론

WN, 전극을 에미터 전극으로 사용하여 자기정렬 AlGaAs/GaAs HBT를 제작하고 그 특성을 연구하였다. 에미터 크기가 $1.5 \times 10 \mu m^2$ 인 소자의 DC 특성은 컬렉터 전류밀도가 $6 \times 10^4 A/cm^2$ 일 때 공통 에미터 전류이득 값은 45이었으며, Gummel plot으로부터 컬렉터 전

류의 이상계수는 1.18, 베이스 전류의 이상계수는 1.70이었다. 비자기정렬 HBT와 비교해 보면 베이스 전류가 감소함을 확인하였고, 따라서 컬렉터 전류밀도에 따른 전류이득도 크게 나타났다. 고전류의 전압강하 영역으로부터 결정한 에미터와 베이스의 저항은 각각 5.3 Ω , 38.2 Ω 이었으며, 비자기정렬 HBT와 비교해본 결과 에미터 저항은 약간 증가하나 베이스 저항의 감소가 두드러져 고속 특성의 향상이 기대된다. S-parameter의 측정으로부터 구한 소자의 RF 특성은 V_{ce} 가 2V일 때 차단 주파수는 72GHz, 최대 진동주파수는 81GHz이었다. 이러한 특성으로 볼 때 WN을 에미터 전극으로 사용한 자기정렬 AlGaAs/GaAs HBT는 20 Gb/s의 전송속도를 갖는 광대역 증폭기의 능동소자로서 충분히 응용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 박성호 외, "10-Gb/s 광통신시스템을 위한 GaAs HBT IC의 설계 및 제작", 전자공학회지, 제 34권, 제 3호, p.52, 1997.
- [2] 박성호 외, "DC-18GHz의 광대역 레이저 구동회로 제작 및 특성", 전자공학회지, 제 35권, 제 1호, p.34, 1998.
- [3] N. Uchitomi, et al., "Characterization of reactively sputtered WN_x film as a gate metal for self-alignment GaAs metal-semiconductor field effect transistors", J. Vac. Sci. Technol. Vol.84, No.6, p.1392, 1986.
- [4] S-H Park, et al., "An Au/Pt/Ti/WNx Ohmic Contact to n-InGaAs and Its Application to AlGaAs/GaAs HBT", 24th International Symposium on Compound Semiconductors, WF3, 1997.
- [5] J. J. Liou, "Principles and Analysis of AlGaAs/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors", Artech House, Ch.4, 1996.