

論文96-33A-12-6

AlGaAs/GaAs HBT의 DC 파라미터에 미치는 온도영향의 해석

(Analysis of Temperature Effects on DC Parameters of AlGaAs/GaAs HBT)

金得永*, 朴宰弘*, 宋政根*

(Duk Young Kim, Jae Hong Park, and Chung Kun Song)

요 약

AlGaAs/GaAs HBT에 대해서 DC 파라미터의 온도 의존성을 95K부터 580K까지의 온도범위에 걸쳐서 조사하였다. DC 파라미터의 온도 의존성은 특정 온도에서 소자의 각종 전류성분들 즉 에미터 주입전류, 베이스 주입전류, 벌크 재결합전류, 표면 재결합전류, 이종접합 계면 재결합전류 그리고 콜렉터 공간전하영역의 열생성 전류, 충돌이온화에 의한 애벌런치전류등의 상대적인 크기에 의해서 결정된다. 본 논문에서는 여러가지 DC 파라미터들 즉 $V_{BE,ON}$, 전류이득, 입·출력 전류-전압특성, $V_{CE,OFF}$, R_E , R_C 들의 온도변화를 관찰하였고, 그 원인을 각종 전류성분들의 크기를 비교함으로써 분석하였으며, 온도의 변화에 대하여 안정된 소자의 조건을 정성적으로 도출하였다. 결론적으로, 온도변화에 안정된 HBT를 제조하기 위해서는 고온에서 베이스의 정공주입의 억제효과가 향상되도록 에미터 이종접합의 가전자대 에너지장벽이 커야 하고, 콜렉터접합 부근에서 재결합중심이 형성되지 않도록 해야 하며, 콜렉터와 에미터 접합의 면적이 동일해야 함을 알 수 있었다.

Abstract

In AlGaAs/GaAs HBT the temperature dependence of DC parameters was investigated over the temperature range between 95K and 580K. The temperature dependence of DC parameters depends on the relative contribution of each of the current components such as emitter-injection-current, base-injection-current, bulk recombination current, interface recombination current, thermal generation current and avalanche current due to impact ionization within the collector space charge layer in a specific temperature. In this paper we investigated the temperature effects on DC parameters such as $V_{BE,ON}$, current gain, input and output characteristics, $V_{CE,OFF}$, R_E , R_C , and analyzed the origins, and extracted the qualitative conditions for a stable HBTs against the temperature variation. Finally, in order to keep HBTs stable with respect to the variation of temperature, the valance-band-energy-discontinuity at emitter-base heterojunction should be large enough to enhance the effect of carrier suppression at a relatively high temperature. In addition the recombination centers, especially around collector junction, should be removed and the area of emitter and collector junction should be identical as well.

1. 서 론

HBT는 고속동작, 고출력, 저잡음 등 우수한 전기적

특성 때문에 디지털과 아날로그 및 초고속파 응용 그리고 광전 집적회로의 전류구동소자 등으로 광범위하게 활용되고 있다^[1-3]. AlGaAs/GaAs HBT는 f_{max} 가 350GHz에 이르는 보고가 있었고^[4], 국내에서도 단위소자의 개발과 10 Gbps LD 구동 집적회로에 사용하기 위해서 연구되고 있다^[5]. 이 외에도 InP/InGaAs, InAlGaAs/InGaAs 등 다양한 화합물 반도체를 사용하여 고속과 특성과 광소자와의 호환성

* 正會員, 東亞大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Dong-A University)

接受日字: 1996年1月22日, 수정완료일: 1996年11月25日

을 향상시키는 연구가 활발히 이루어지고 있다¹⁶⁻¹⁸.

AlGaAs/GaAs HBT의 동작온도에 대한 전기적 특성의 변화는 HBT를 사용하는 MMIC 증폭기와 발진기등 온도에 민감한 집적회로의 설계에 중요한 자료가 된다. 이러한 온도 특성에 대한 연구는 전력 MMIC, 자동차, 우주항공, 산업체 전력제어등 고온에서 안정한 소자를 필요로 하는 분야에 활용하기 위해서 400K 이상의 높은 온도범위의 전기적 특성의 변화에 관한 연구가 주로 이루어지고 있다^{19,10}.

본 논문에서는 95K부터 580K까지의 넓은 온도범위에 걸쳐 AlGaAs/GaAs HBT의 $V_{BE,ON}$, 이상계수, 전류이득, 출력전류와 전압 특성등 DC 파라미터의 변화를 관찰하고 그 원인을 분석하였다. 이 결과는 HBT를 사용하는 회로의 실제에 가까운 성능을 예측하고, 온도의 변화에 안정된 전기적 특성을 갖는 소자의 설계와 제작에 필요한 자료가 될 것이다.

II. HBT의 구조

실험에 사용된 HBT는 (100) 절연 GaAs 기판 위에 MOCVD 기술을 사용하여 표1과 같이 에피층을 성장하였고, mesa 식각과 자기정렬 방식으로 제작된 단일 에미터 소자이다. 베이스에는 p형 도펀트로서 C을 농도 $4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 로 도핑하였고, 폭은 1200Å으로 하였다. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 에미터의 Al 몰비는 $x=0.3$, n형 도펀트로서 Si을 $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 로 도핑하였고, 면적은 $3 \times 10 \mu\text{m}^2$ 이다. 에미터와 베이스 사이에는 300Å의 grading ($x=0.3 \rightarrow x=0$) 영역을 삽입하였고, 옴저항을 줄이기 위하여 InGaAs 꺾층을 사용하였다. 완성된 소자는 단 위소자로 패키징하였다.

표 1. AlGaAs/GaAs HBT의 구조
Table 1. Structure of AlGaAs/GaAs HBT.

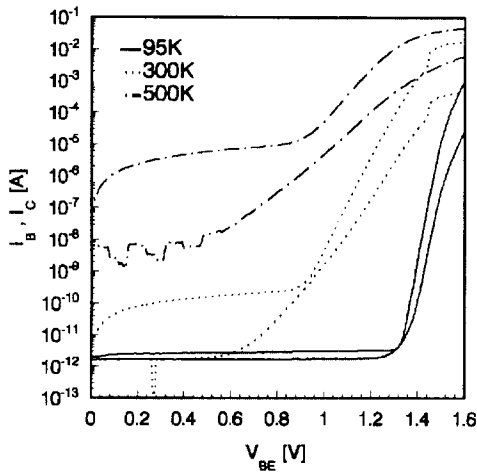
물 질	두께(Å)	몰비	불순물	농도(cm^{-3})
n-In _x Ga _{1-x} As	5000	0.5	Si	2×10^{19}
n-In _x Ga _{1-x} As	5000	0→0.5	Si	2×10^{19}
n-GaAs	500		Si	5×10^{18}
n-Al _x Ga _{1-x} As	300	0→0.3	Si	5×10^{17}
n-Al _x Ga _{1-x} As	1200	0.3	Si	5×10^{17}
n-Al _x Ga _{1-x} As	300	0.3→0	Si	5×10^{17}
p-GaAs	1200		C	4×10^{19}
n-GaAs	10000		Si	2×10^{16}
n-GaAs	6000		Si	5×10^{18}

III. DC 파라미터의 온도 의존성

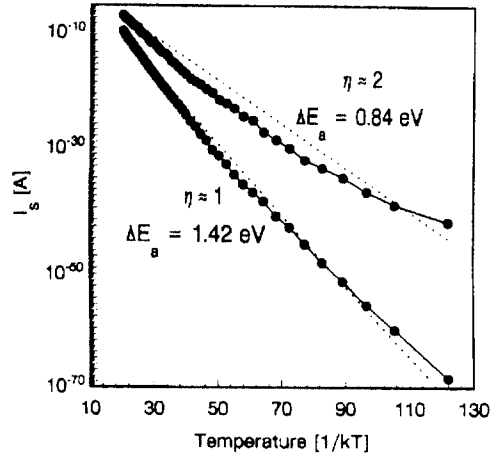
저온 탐침장치를 사용하여 소자의 온도를 95K로 냉각시킨 후 580K까지 10K씩 증가시키면서 여러 가지 DC 파라미터의 변화를 관찰하였다. 다음 각 절에서 Gummel 도표로부터 $V_{BE,ON}$, 이상계수, 전류이득의 변화를 분석하였고, 출력전류-전압 특성과 에미터 및 콜렉터 직렬저항의 온도에 대한 변화의 형태와 그 원인에 대하여 설명하였다.

1. Gummel 도표

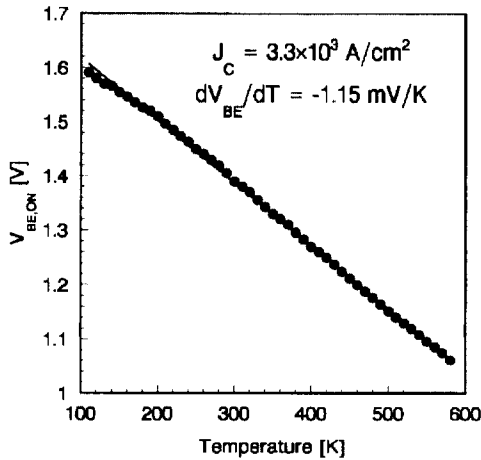
그림 1(a)는 95K, 300K, 500K에서 V_{BE} 에 대한 I_C 와 I_B 를 나타낸 Gummel 도표이며, 이때 $V_{BC}=0V$ 이다. $J_C=3.3 \times 10^3 \text{A/cm}^2$ 에서 측정된 $V_{BE,ON}$ turn-on 전압은 300K에서 약 1.38V이었고, 온도가 증가함에 따라 그림 1(b)와 같이 감소하였으며, 온도계수는 -1.15mV/K 이었다. 이것은 온도가 증가함에 따라 진성 캐리어와 에미터 및 베이스 주입 캐리어 농도가 증가하여 p/n 접합의 내부전위가 감소하기 때문이다. 콜렉터전류가 지수함수로 증가하기전 작은 전압영역의 누설전류는 온도에 따라 증가하였는데, 이것은 콜렉터전류를 구성하는 에미터 주입전류와 콜렉터접합의 공간전하영역에서 열생성된 캐리어가 온도에 따라 증가하기 때문이다. 누설전류의 활성화에너지가 GaAs 콜렉터의 재결합중심의 에너지에 가까운 약 0.67eV인 것은 콜렉터접합의 재결합중심을 통한 열생성전류가 압도적임을 의미한다. 그리고, V_{BE} 의 작은 전압 영역에서의 누설전류는 주변부를 포장하고 있는 유전체를 통하여 흐르고¹¹¹, 반도체와 유전체 사이에는 쇼트기장벽이 형성되며, 누설전류와 전압은 $\log(I_C) \propto \sqrt{V_{BE}}$ 관계를 보여주므로 작은 전압영역에서 에미터장벽은 인가전압에 대하여 쇼트키방출과 같이 $\sqrt{V_{BE}}$ 로 감소함을 알 수 있었다. 높은 전압 V_{BE} 에서 I_C 가 감소하는 것은 콜렉터의 직렬저항에 의한 전압강하가 발생하여 베이스 콜렉터접합이 순방향 바이어스 되기 때문이다. 그림 1(a)의 300K 그래프에서 약 $V_{BE}=1.43V$ 일때 I_C 와 I_B 의 급격한 증가를 볼 수 있다. 이러한 증가는 편의상 나타내지 않았지만 400K 이하의 모든 온도에서 나타났고, 그 크기와 발생지점의 전압은 온도가 증가할수록 감소하였다. 그 원인은 아직 명확하게 알 수 없으나 다음과 같은 원인 때문인 것으로 추정된다. 콜렉터접합은 $V_{BC}=0V$ 로 일정하므로 전자의 속도는 전류의 크기와 상관없이 일정하여 큰 전류에서도 에미터에서



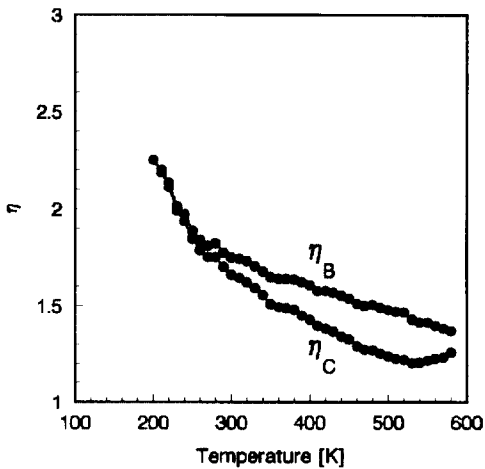
(a)



(d)



(b)



(c)

그림 1. (a) 95K, 300K, 500K에서의 Gummel 도표 ($V_{BC}=0V$), (b) 온도에 대한 $V_{BE,ON}$ ($J_c=3.3 \times 10^3 A/cm^2$)의 변화, (c) 온도에 대한 η_C 와 η_B 의 변화, (d) 온도에 대한 포화전류, I_{S1} ($\eta \approx 1$)과 I_{S2} ($\eta \approx 2$)의 변화

Fig. 1. (a) Gummel plot at three different temperatures of 95K, 300K, and 500K, Temperature dependence (b) of $V_{BE,ON}$ ($J_c=3.3 \times 10^3 A/cm^2$), (c) of η_C and η_B , (d) of I_{S1} ($\eta \approx 1$) and I_{S2} ($\eta \approx 2$).

주입된 전자들이 빨리 콜렉터로 수집되지 못하기 때문에 베이스에 축적된다. 또한 큰 전류에서는 콜렉터 직렬저항에 의한 전압강하 때문에 베이스-콜렉터접합이 순방향되므로 콜렉터에서도 전자가 주입되어 베이스에 전하축적이 발생한다. 그러므로, 베이스의 재결합전류가 증가하여 베이스전류가 증가한 것으로 생각된다. 이와 유사한 현상이 보고된 바 있으나¹⁰⁾, 이 경우 단지 베이스전류만 증가하였고 콜렉터전류는 증가하지 않은 차이점이 있었다. 그리고, 큰 전류가 흐를 때 발생하는 열에 의해서 전류가 증가하는 현상이 보고되었으나¹²⁾, 이 결과에 적용되는지는 분명하지 않다.

각 온도의 $V_{BE,ON}$ 에서 측정된 콜렉터와 베이스전류의 이상계수를 그림 1(c)에 나타내었다. 이상계수의 크기로써 전류전도도기구를 추측할 수 있다. 베이스 (η_B)와 콜렉터 (η_C)의 이상계수는 모두 온도가 감소함에 따라 증가하였다. 이것은 저온에서 캐리어가 동결되어 베이스에서 에미터로 주입되는 정공 확산전류가 감소하고 재결합전류는 증가하기 때문이다. 고온에서 콜렉터접합의 포화전류가 증가하므로 η_C 는 다시 증가하였

다. 이것은 그림 2(a)의 온도에 대한 전류이득의 변화와 일치한다.

그림 1(d)는 그림 1(a)의 $\eta \approx 1$ (확산전류)과 $\eta \approx 2$ (재결합전류) 지점에서 외삽하여 전류축과 만나는 절편 즉, 포화전류의 Arrhenius 도표이다. 확산전류 ($\eta \approx 1$)는 n_i^2 에 비례하므로 활성화에너지는 GaAs의 에너지 갭에 가까운 $E_a=1.42\text{eV}$ 이었다. 만약 에미터가 계단결합이면 활성화에너지는 AlGaAs의 에너지 갭에 가까운 값을 가질 것이다. 재결합전류 ($\eta \approx 2$)는 식 (2)와 같이 n_i 에 비례하므로 활성화에너지는 GaAs의 에너지 갭의 절반에 가까운 $E_a=0.84\text{eV}$ 이었다.

2. 전류이득의 온도 의존성

그림 2(a)는 전류이득과 온도와의 관계를 보여준다. 전류이득은 170K까지 온도가 감소함에 따라 증가하다가 다시 감소하였다. 전류이득은 에미터 주입효율 γ 와 베이스의 벌크 재결합전류 및 공간전하영역 재결합전류에 의해 좌우된다. HBT는 큰 대역폭 에미터를 사용하므로 가전자대 에너지장벽이 베이스의 정공주입을 억제하여 에미터 주입효율이 동종접합과 비교하여 식 (1)과 같이 증가한다^[13,14].

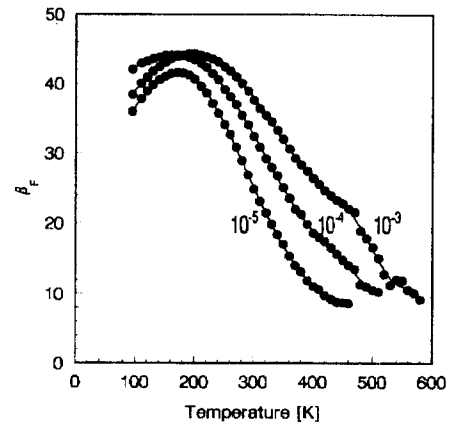
$$\gamma_{\text{이동결합}} \propto \gamma_{\text{동종결합}} \exp\left[\frac{\Delta E_V + \Delta E_I}{kT}\right] \quad (1)$$

여기서, ΔE_V 는 가전자대 에너지장벽의 크기이고, ΔE_I 는 에미터 grading에 의한 전도대 에너지장벽의 감소가 가전자대 에너지장벽의 증가로 나타난 양을 나타낸다. 식 (1)에 의하면 온도가 감소함에 따라 주입효율은 증가함을 알 수 있다. 그리고 베이스에서 전자의 수명은 온도가 감소함에 따라 감소하고^[14], 공간전하 재결합전류는 SRH 모델에 의하면 식 (2)와 같으므로^[15].

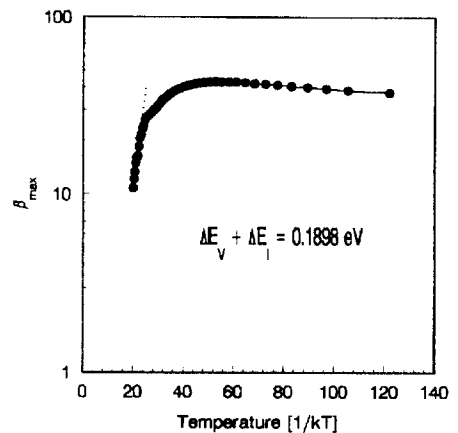
$$J_{kr} = \frac{\pi kT}{2 \tau_n E} n_i \exp\left[\frac{qV_{BE}}{2kT}\right] \quad (2)$$

온도가 감소함에 따라 재결합전류는 증가한다. 그러므로, 온도에 대한 전류이득의 변화는 에미터 주입효율과 재결합전류의 온도에 대한 상대적 크기에 의해 좌우된다. 그림 2(a)에서 보듯이 170K까지 온도가 감소할수록 전류이득이 증가한 것은 주입효율의 증가가 재결합전류의 증가를 압도하였기 때문이다. 그리고, 170K 이하에서는 캐리어가 동결되므로 주입효율이 전류이득에 미치는 영향은 온도가 감소하더라도 거의 변화없이 일정한 반면에, 재결합전류는 증가하므로 전류이득은 다

시 감소하여 전류이득이 170K에서 최대값을 갖는다. 콜렉터전류가 증가할수록 최대값이 발생하는 온도가 증가하는 것은 베이스에 주입되는 전자가 증가하면 벌크와 표면 재결합전류가 증가하여 재결합전류가 압도하는 온도가 높아지기 때문이다. 적온에서 전자의 확산 계수가 감소하는 것도 전류이득 감소의 또 다른 원인이 된다. 400K 이상에서 다소 증가하는 것은 콜렉터전류를 구성하는 콜렉터접합의 포화전류가 열생성과 충돌이온화에 의해 증가하기 때문이다. $I_C=10\text{mA}$ 일때 모든 온도에서 전류이득은 최대가 되었으며, 그림 2(b)와 같이 전류이득은 온도가 감소함에 따라 200K까지 증가하다가 다시 점차 감소하였다.



(a)



(b)

그림 2. (a) 온도에 대한 전류이득의 변화 ($I_C=10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ [A]), (b) 최대 전류이득 ($I_C=10^{-2}$ [A])의 변화

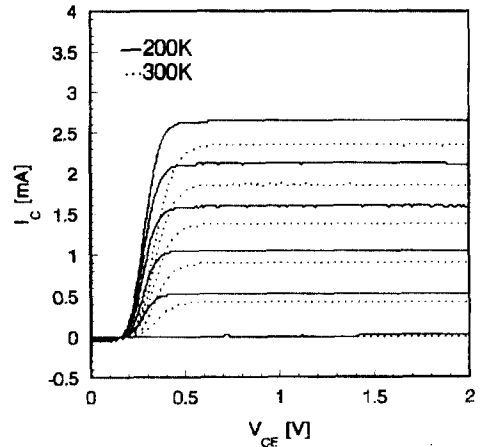
Fig. 2. Temperature dependence (a) of current gain at $I_C=10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ [A], (b) of maximum current gain ($I_C=10^{-2}$ [A]).

식 (1)에 의해서 β_{max} 의 활성화에너지, $\Delta E_v + \Delta E_i$, 는 온도범위 95K~190K에서 -0.00225eV , 330K~580K에서 0.1898eV 이었다. $\Delta E_v + \Delta E_i = 0.1898\text{eV}$ 는 grading된 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ 의 가전자대 에너지장벽의 크기 즉, 0.19eV 와 일치하였다.

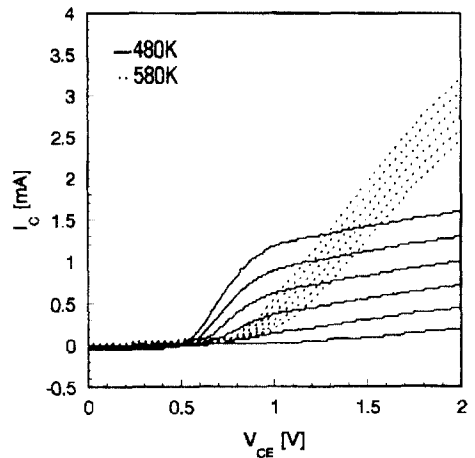
베이스전류의 정공 확산전류는 온도가 감소함에 따라 감소하는 반면에 재결합전류는 증가하는 서로 상반된 특성을 보여주므로, 에미터의 적합한 Al 물비를 선택하면 전류이득의 온도변화를 감소시킬 수 있을 것이다. 즉, Al 물비가 크면 가전자대 에너지장벽이 커서 정공의 에미터 주입이 높은 온도에서 억제될 것이고, 또한 이중접합 계면에 재결합중심이 많아지므로 재결합전류가 증가할 것이다. 따라서, 온도에 대한 전류이득의 최대값이 높은 온도에서 형성되므로 전류이득의 온도변화는 감소하여 온도변화에 대한 안정된 전류이득을 얻을 수 있을 것이다.

3. 출력전류와 전압 특성의 온도 의존성

온도에 대한 출력특성이 그림 3에 나타나 있다. 앞에서 살펴본 바와 같이 온도가 증가할 수록 I_B 는 증가하므로 일정한 I_B 를 유지하기 위해서 입력전압 V_{BE} 가 감소하게 되고, 출력전류 I_C 는 그림 3(a)와 같이 감소하게 된다. 그림 3(b)에서 보듯이 480K 이상에서 I_C 는 전압에 대하여 포화되지 않고 증가하였으며 (이하 "비포화"라고 함), 에미터공통 파괴전압 BV_{CEO} 는 감소하였다. 그 원인으로 세 가지를 생각할 수 있다. 베이스-콜렉터 공간전하영역의 열생성전류와 자체발열효과 그리고 고전계 콜렉터 공간전하영역에서 발생하는 애벌런치파괴등이다. 열생성전류는 공간전하영역폭에 비례하므로 콜렉터전압에 대하여 $\sqrt{V_{CE}}$ 의 관계를 가지기 때문에 한 원인이 될 수는 있지만 주된 원인은 될 수 없다. 그리고 이상계수 η_C 가 η_B 보다 작기 때문에 $I_C \sim \exp(\frac{V_{BE}}{\eta_C K T})$ 와 $I_B \sim \exp(\frac{V_{BE}}{\eta_B K T})$ 에 의해서 V_{CE} 가 증가함에 따라 발생하는 열의 영향은 I_C 를 오히려 감소시키므로 전류증가의 원인이 될 수 없다. 마지막으로, 애벌런치파괴는 일반적으로 전계가 이온화 문턱전계보다 작을 때는 콜렉터전류에 영향을 주지 않고 문턱전계에 도달할 때 강한 충돌이온화가 발생하여 전류가 급격히 증가하는 애벌런치파괴에 이른다. 그리고 충돌이온화율은 온도가 증가할 수록 포논 산란의 증가에 의해서 감소하므로 BV_{CEO} 는 온도에 대하여 증가하는 것으로 알려져 있다. 이것은 측정결과와 반대이지만



(a)



(b)

그림 3. (a) $T=200\text{K}$, 300K 의 I_C - V_{CE} 출력특성, (b) $T=480\text{K}$, 580K 의 I_C - V_{CE} 출력특성

Fig. 3. I_C - V_{CE} characteristics (a) at $T=200\text{K}$, 300K , (b) at $T=480\text{K}$, 580K .

이 결과와 유사한 현상이 $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}$ 와 InP/InGaAs HBT에서 관찰된 보고가 있다^[16,17]. 이러한 비포화 현상은 문턱전계보다 작은 전계에서 발생하는 약이온화 때문이며, 전계가 문턱전계에 도달할 때까지 이온화율은 점진적으로 증가한다. 따라서, GaAs와 같은 화합물반도체의 전계에 대한 충돌이온화율의 관계는 식 (3)으로 표현할 수 있다^[16]. 여기서, ϵ_i 는 이온화 문턱전계이고 E_i 는 임계에너지이다. 전계 ϵ 가 ϵ_i 에 도달하면

$$\alpha(\epsilon) \cong \frac{q\epsilon}{E_i} \exp\left(-\frac{\epsilon_i}{\epsilon}\right) \quad (3)$$

α 가 급격히 증가하는 강이온화 ($m=1$)가 발생하고 이것이 애벌런치 파괴를 일으키며 그 전계가 BV_{CEO} 를 결정한다. 문턱전계 ϵ_r 보다 작은 전계에서는 이온화가 점진적으로 증가하는 약이온화 ($m<1$)가 발생하여 콜렉터전류의 비포화의 원인이 된다. 그리고 온도가 증가함에 따라 BV_{CEO} 가 감소하는 것은 공간전하영역의 열생성에 의해 캐리어가 증가하고, 에너지 갭이 감소하여 이온화 임계에너지 E_i 가 감소하므로 식 (3)에 의해 충돌이온화가 작은 전계에서 발생하기 때문에 그림 3(b)와 같은 결과를 보여준다.

$V_{CE,OFF}$ 는 에미터 베이스와 베이스-콜렉터접합의 turn on 전압의 차이 때문에 발생하고, 베이스-콜렉터 접합의 turn-on 전압이 에미터 베이스접합보다 작을 수록 커진다.

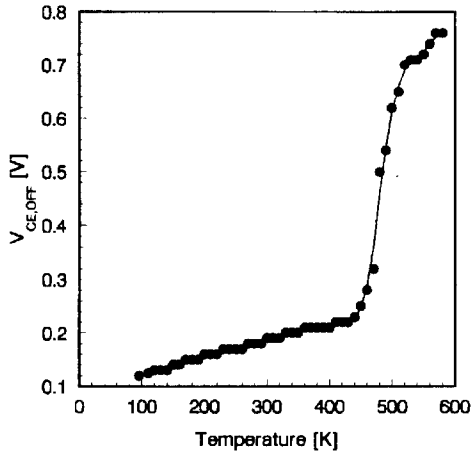


그림 4. $V_{CE,OFF}$ 의 온도 의존성

Fig. 4. Temperature dependence of $V_{CE,OFF}$.

그림 4에서 보듯이 $V_{CE,OFF}$ 는 약 450K까지 온도에 따라 증가율 0.366mV/K로 증가하다가 450K 이상에서는 6.43mV/K로 급격한 증가를 보였다. $V_{CE,OFF}$ 는 식 (4)로 표현된다^[18]. 여기서, A_C 와 A_E 는 콜렉터와 에미터의 면적이고, J_{CS} 와 J_{ES} 는 콜렉터와 에미터접합의 포화전류, η 는 이상계수,

$$V_{CE,OFF} = R_E I_B + \eta \left[\ln\left(\frac{A_C}{A_E}\right) + \ln\left(\frac{J_{CS}}{\alpha_N J_{ES}}\right) \right] \frac{kT}{q} \quad (4)$$

α_N 은 순방향 전류이득이다. 450K까지 $V_{CE,OFF}$ 가 점진적 증가를 보이는 것은 식 (4)에서 A_C 와 J_{CS} 가 A_E 와 J_{ES} 보다 크기 때문이다. J_{CS} 가 J_{ES} 보다 큰 것은 역

방향 바이어스된 콜렉터의 공간전하영역의 폭이 순방향 바이어스된 에미터보다 넓고, 또한 GaAs 콜렉터의 에너지 갭이 AlGaAs 에미터의 에너지 갭보다 작아서 콜렉터 공간전하영역의 열생성율이 크기 때문이다. 450K에서 갑자기 증가하는 것은 콜렉터접합에서 발생하는 약이온화에 의해서 J_{CS} 가 증가하므로 콜렉터접합의 turn-on 전압이 에미터접합보다 훨씬 작아지기 때문에 $V_{CE,OFF}$ 는 급격히 증가한다. 그러므로, 이러한 약이온화 현상을 감소시키기 위해서는 콜렉터접합의 재결합중심을 제거함으로써 포화전류를 감소시켜야 할 것이다. 그리고 가전자대의 에너지장벽을 크게 함으로써 I_B 를 감소시키면 에미터 직렬저항에 의한 전압강하가 감소하여 $V_{CE,OFF}$ 가 줄어들게 된다. 또한, 콜렉터와 에미터의 면적을 동일하게 하면 $V_{CE,OFF}$ 를 더욱 줄일 수 있을 것이다.

4. 직렬저항의 온도 의존성

에미터저항, R_E 와 콜렉터저항, R_C 의 온도에 대한 변화를 그림 5에 나타내었다.

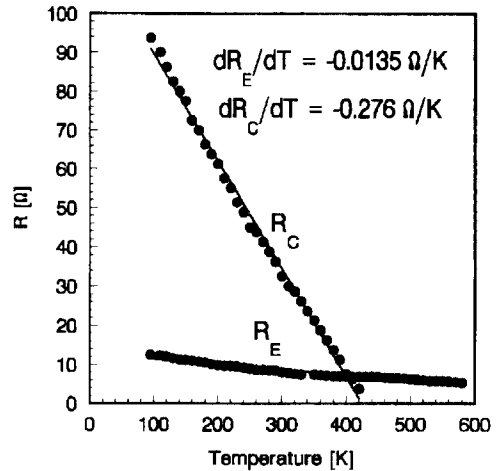


그림 5. 에미터저항, R_E 와 콜렉터저항, R_C 의 온도 의존성

Fig. 5. Temperature dependence of emitter resistance, R_E and collector resistance, R_C .

전도도 $\sigma = q\mu_n n$ 이고, 전자 이동도와 온도의 관계는 $\mu_n \propto T^{3/2}$ 이며, 전자의 농도와 온도의 관계는 $n \propto T^{3/2} \exp[-(E_C - E_F)/kT]$ 이다. 그러므로, 저항의 온도 계수는 $\frac{dR}{dT} \propto -(E_C - E_F)$ 이다. 따라서, 온도가 증가함에 따라 저항은 그림 5와 같이 감소하였다. AlGaAs 에미터는 $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 로 도핑되었기 때문에

$2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 로 도핑된 GaAs 콜렉터보다 $E_C - E_F$ 가 작으므로 온도가 증가할 수록 R_E 의 감소율 ($-0.013 \Omega/\text{K}$)은 R_C ($-0.276 \Omega/\text{K}$)보다 작았다. 그리고 에미터저항의 온도계수가 콜렉터보다 작은 다른 이유는 AlGaAs 에미터의 에너지 갭이 GaAs 콜렉터보다 크므로 온도에 대한 진성캐리어의 증가량 $\frac{dn_i}{dT} \propto \exp\left[-\frac{E_G}{2KT}\right]$ 이 콜렉터보다 작아지기 때문이다. 콜렉터저항의 온도변화를 줄이려면 도핑농도를 증가시켜 $E_C - E_F$ 를 감소시켜야 하지만, 접합용량이 증가하여 속도가 감소하므로 용도에 따라 적합한 선택이 필요하다.

IV. 결 론

MOCVD로 제작된 AlGaAs/GaAs HBT의 DC 파라미터의 온도 특성을 고찰하였다. 온도가 증가함에 따라 $V_{BE,ON}$ 은 -1.15mV/K 로 감소하였다. 콜렉터 누설 전류는 열생성에 의해 증가하였으며, 에미터-베이스 전압과 $\exp(\sqrt{V_{BE}})$ 관계를 보여줌으로써 작은 전압영역에서 캐리어는 확산보다 쇼트키방출에 의해 주입됨을 알 수 있었다. I_C 와 I_B 의 이상계수의 온도 의존성은 확산전류와 재결합전류의 온도변화에 좌우되고, 온도가 감소함에 따라 확산전류는 감소하는 반면에 재결합전류는 증가하므로 에미터와 베이스전류의 이상계수는 증가하였다. 전류이득은 170K 까지 온도감소에 따른 정공 확산전류의 감소로 인하여 증가하였지만, 170K 이하에서는 재결합전류가 증가하여 전류이득은 오히려 감소하여 170K 에서 최대값을 갖는다. 그리고, 400K 이상에서 다소 증가하였는데, 이것은 콜렉터 공간전하 영역의 열생성전류와 충돌이온화에 의한 캐리어의 증배가 고온에서 증가하기 때문이다. β_{max} 의 Arrhenius 도표로부터 $\Delta E_V \approx 0.19 \text{eV}$ 를 얻을 수 있었다. $I_C - V_{CE}$ 출력특성은 온도증가에 따라 전류이득이 감소하므로 I_C 는 감소하였고, 450K 부터 약이온화에 의해 콜렉터전류는 포화되지 않고 V_{CE} 에 대하여 증가하였으며, 에너지 갭의 감소로 인한 이온화 문턱에너지의 감소와 열생성율의 증가로 BV_{CEO} 가 감소하였다. $V_{CE,OFF}$ 는 온도가 증가할 수록 콜렉터 포화전류의 증가로 완만한 증가 (0.366mV/K)를 보였지만 450K 부터 약이온화에 의해 콜렉터접합의 turn-on 전압이 감소하여 급격히 증가 (6.43mV/K) 하였다. 에미터와 콜렉터의 직렬저항은 온도에 따라 감소하였다. 에미터저항의 감소율은 도핑

농도가 콜렉터보다 크기 때문에 $-0.013 \Omega/\text{K}$ 로서 콜렉터저항의 온도계수 $-0.276 \Omega/\text{K}$ 보다 작았다. 그러므로 온도의 변화에 대하여 안정된 전기적 특성을 갖는 소자를 제조하기 위해서는 에미터 이중접합의 가전자대 에너지장벽이 큰 반도체를 선택해야 하고, 에미터와 콜렉터접합, 특히 콜렉터접합 부근에서 재결합중심이 형성되지 않도록 공정시 주의해야 하며, 콜렉터면적이 에미터와 같아야 한다.

※ 이 논문은 1994년 동아대학교 학술연구 조성비(공모과제)에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- [1] Christopher T. M. Chang, and H-T Yuan, "GaAs HBT's for high-speed digital integrated circuit applications", Proc. IEEE, vol.81, no.12, pp.1727-1743, 1993.
- [2] Bert K. Oyama, and Brian P. Wong, "GaAs HBT's for analog circuits", Proc. IEEE, vol.81, no.12, pp.1744-1761, 1993.
- [3] Burhan Bayraktaroglu, "GaAs HBT's for microwave integrated circuits", Proc. IEEE, vol.81, no.12, pp.1762-1785, 1993.
- [4] D. Deakin, W. J. Ho, E. A. Severo, and J. Higgins, "Power HBT for 44GHz operation", GaAs IC symposium, pp.371-373, 1993.
- [5] 박성호, 최인훈, 오웅기, 최성우, 박문평, 윤형섭, 이해린, 박철순, 박형무, "AlGaAs /GaAs HBT의 제작과 특성연구", 전자공학회논문지, 제31권 A편, 제9호, pp.104-113, 1994
- [6] William Liu, Ali Khatibzadeh, Timothy Henderson, S-K Fan, and Dave Davito, "X-band GaInP/GaAs power HBT", IEEE MTT S Digest, pp.1477-1480, 1993.
- [7] Jongin Song, Brian W-P. Hong, Chris J. Palmstrom, Bart. P. Van derGagg, and K. B. Chough, "Ultra-high-speed InP/InGaAs HBTs", IEEE Electron Device Lett., vol.15, no.3, pp.94-96, 1994.
- [8] Umesh K. Mishra et.al, "Self-Aligned AllInAs/GaInAs HBTs and Circuits", IEEE Electron Device Lett., vol.10, no.10, pp.467-469, 1989.

- [9] J. S. Yuan, "Comments on "AlGaAs/GaAs HBT for High-Temperature Application"", IEEE Trans. Electron Devices, vol.40, no.9, pp.1717-1718, 1993.
- [10] Klaus Fricke, Hans L. Hartnagel, Woo Yong Lee, and Joachim Wurfl, "AlGaAs /GaAs HBT for High-Temperature Applications", IEEE Trans. Electron Devices, vol.39, no.9, pp.1977-1981, 1992.
- [11] J. J. Liou, C. I. Huang, B. Bayraktaroglu, D. C. Williamson, and K. B. Parab, "Base and collector leakage currents of AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors", J. Appl. Phys., 76(5), pp.3187-3193, 1994.
- [12] Lee L. Liou, John L. Ebel, and Chern I. Huang, "Thermal Effects on the Characteristics of AlGaAs/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors Using Two-Dimensional Numerical Simulation", IEEE Trans. Electron Devices, vol.40, no.1, pp.35-43, 1993.
- [13] H. Kroemer, "Heterostructure Bipolar Transistors and Integrated Circuits", Proc. IEEE, vol.70, no.1, pp.227-239, 1982.
- [14] Naresh Chand, Russ Fischer, Tim Henderson, John Klem, William Kopp, and Hadis Morkoc., "Temperature dependence of current gain in AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors", Appl. Phys. Lett., 45(10), pp.1086-1088, 1984.
- [15] Sandip Tiwari, Steven L. Wright, and Alan W. Kleinsasser, "Transport and Related Properties of (Ga,Al)As/GaAs Double Heterostructure Bipolar Junction Transistors", IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-34, no.2, pp.185-198, 1987.
- [16] D. Ritter, R. A. Hamm, A. Feyngenson, and M. B. Panish, "Anomalous electric field and temperature dependence of collector multiplication in InP/Ga_{0.47}In_{0.53}As heterojunction bipolar transistors", Appl. Phys. Lett., 60(25), pp.3150-3152, 1992.
- [17] K. Yang, J. C. Cowles, J. R. East, and G. I. Haddad, "Theoretical and Experimental DC Characterization of InGaAs Based Abrupt Emitter HBT's", IEEE Trans. Electron Devices, vol.42, no.6, pp.1047-1058, 1995.
- [18] Naresh Chand, Russ Fischer, and Hadis Morkoc, "Collector-emitter offset voltage in AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors", Appl. Phys. Lett., 47(3), pp.313-315, 1985.

저자 소개



金得永(正會員)

1972년 10월 31일생. 1995년 2월 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1995년 3월 ~ 현재 동아대학교 대학원 전자공학과 석사과정. 주 관심분야는 화합물 반도체



朴宰弘(正會員)

1960년 7월 24일생. 1988년 2월 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1992년 2월 동아대학교 전자공학과 대학원 석사과정 학위취득(공학석사). 1994년 3월 ~ 현재 동아대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 주

관심분야는 화합물 반도체

宋政根(正會員) 第32卷A編第4號 參照
현재 동아대학교 전자공학과 조교수