

論文93-30A-12-7

CCl₄를 사용하여 베이스를 탄소도핑한 AlGaAs/GaAs HBT의 제작 및 특성

(Fabrication and Characteristic of C-doped Base AlGaAs/GaAs HBT using Carbontetrachloride (CCl₄))

孫正煥*, 金東旭**, 洪聖喆**, 權寧世**

(Jeong Hwan Son, Dong Wook Kim, Song Cheol Hong and Young Se Kwon)

要約

상압MOCVD에서 CCl₄를 사용하여 베이스층을 $4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 농도로 탄소도핑한 AlGaAs/GaAs HBT층을 성장시켰다. 성장된 시료는 이차이온 질량분석기를 사용하여 에미터-베이스접합의 계면특성을 측정하였고, 쌍결정 X선 회절 측정으로 베이스층의 도핑농도를 확인하였다. 습식 식각과 lift-off 공정을 이용하여 메사구조로 소자를 제작하였으며, TLM방법으로 측정된 베이스층의 면적저항은 $550 \Omega/\text{square}$ 였다. 제작된 HBT의 콜렉터-베이스접합 항복전압은 25V이고, $V_{CE}=2\text{V}$ 에서 임계 콜렉터 전류밀도는 $40 \text{kA}/\text{cm}^2$ 이었다. 에미터 면적이 $50 \times 100 \mu\text{m}^2$ 인 소자는 콜렉터 전류밀도가 $5 \text{kA}/\text{cm}^2$ 에서 공통에미터 DC전류이득이 30이었으며, 베이스 전류 이상계수는 1.4였다. 고주파동작 특성을 알기 위해 에미터 면적이 $5 \times 50 \mu\text{m}^2$ 인 소자를 주파수범위가 0.1~18.1GHz에서 on-wafer S-parameter 측정을 하였다. 측정된 S-parameter로 부터 전류이득 차단주파수는 27GHz, 최고 공진주파수는 16GHz의 결과를 얻었으며 Libra 소프트웨어를 이용하여 소신호 집중소자 등가회로의 소자변수값들을 추출하였다. 제작된 HBT는 고속, 전력용 소자 및 회로의 응용에 적합한 특성을 보였다.

Abstract

A $4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ carbon-doped base AlGaAs/GaAs HBT was grown using carbontetrachloride (CCl₄) by atmospheric pressure MOCVD. Abruptness of emitter-base junction was characterized by SIMS(secondary ion mass spectroscopy) and the doping concentration of base layer was confirmed by DXRD(double crystal X-ray diffractometry). Mesa-type HBTs were fabricated using wet etching and lift-off technique. The base sheet resistance of $R_{\text{sheet}}=550 \Omega/\text{square}$ was measured using TLM(transmission line model) method. The fabricated transistor achieved a collector-base junction breakdown voltage of $BV_{CE0}=25\text{V}$ and a critical collector current density of $J_C=40 \text{kA}/\text{cm}^2$ at $V_{CE}=2\text{V}$. The $50 \times 100 \mu\text{m}^2$ emitter transistor showed a common emitter DC current gain of $h_{FE}=30$ at a collector current density of $J_C=5 \text{kA}/\text{cm}^2$ and a base current ideality factor of $\eta_{\text{BE}}=1.4$. The high frequency characterization of $5 \times 50 \mu\text{m}^2$ emitter transistor was carried out by on-wafer S-parameter measurement at 0.1~18.1GHz. Current gain cutoff frequency of $f_T=27\text{GHz}$ and maximum oscillation frequency of $f_{\text{max}}=16\text{GHz}$ were obtained from the measured S-parameter and device parameters of small-signal lumped-element equivalent network were extracted using Libra software. The fabricated HBT was proved to be useful to high speed and power applications.

*學生會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科
(Dept. of Electrical Eng., KAIST)

** 正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科

(Dept. of Electrical Eng., KAIST)

接受日字: 1993년 2월 28일

I. 서론

동작속도와 전력면에서 고성능인 HBT를 구현하기 위해서는 베이스층의 두께가 얇고 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 이상의 고농도 도핑이 이루어져야 한다. AlGaAs/GaAs HBT의 베이스층 도펀트로서 MBE에서는 베릴륨, MOCVD에서는 아연, 마그네슘 등이 주로 사용되어 왔다. 그러나 이들 도펀트들은 높은 확산계수로 인해 결정성장중이나 이온주입공정같은 고온공정에서 p형 도펀트가 에미터층으로 확산이 되어 소자의 성능을 저하시키며, 특히 MOCVD에서 아연원료로 사용되는 DEZn(dieethylzinc)는 결정성장시 반응관에 흡착되어 결정성장층에 계속 영향을 주는 memory 효과가 심하다.^[1] 또한 MBE에서 베릴륨은 고농도 도핑되었을때 표면조각이 나빠지며, 제작된 소자에서 동작전류에 의해 베릴륨이 확산되어 소자의 특성을 저하시킨다.^[2] 이러한 기존의 p형 도펀트들의 단점을 보완하기 위해 최근에는 탄소가 많이 사용되고 있다. 탄소는 4족원소로서 실리콘, 게르마늄과 같지만 결정성장의 방법과 조건에 따라 donor 또는 acceptor로 amphoteric하게 작용하는 이들과는 달리 GaAs의 경우 결정성장중에 대부분 As자리로 들어가서 acceptor로 작용하게 되며, LPE로 성장시킨 GaAs의 경우 As자리의 탄소양과 Ga자리의 탄소양의 비율이 1.5×10^6 정도이다.^[3] 탄소는 확산계수가 아연이나 베릴륨등에 비해 현저히 낮아서 결정성장중이나 고온공정에서 확산이 거의 일어나지 않으며, 고농도 도핑에서도 박막의 성질이 저하되지 않고, memory효과를 주지않는 등 여러가지 장점들을 가지고 있다. 이러한 탄소를 도핑하기위해서 MBE에서는 가열된 graphite 필라멘트를 사용하고^[4], MOMBE에서는 주로 TMG(trimethylgallium)가 사용되며 GaAs의 경우 $1.5 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 까지 탄소도핑한 결과가 보고되어 있다.^[5] MOCVD에서는 상압보다 저압일때 탄소도핑이 잘되며 TMG, TMAs(trimethylarsenic) 같은 유기금속원료를 사용하기도 하고^[6], CCl₄와같은 halomethane 가스를 사용하기도 한다.^[7] 저압 MOCVD로 탄소도핑한 HBT의 경우 $f_T = 42 \text{ GHz}$, $f_{\text{max}} = 117 \text{ GHz}$ 의 특성이 보고 되어 있다.^[8] 국내에서도 상압 MOCVD를 이용하여 TMG를 사용한 경우와^[9], CCl₄를 사용한 경우가 보고되어 있다.^[10]

본 논문에서는 CCl₄를 사용하여 상압 MOCVD 장비로 성장시킨, 베이스층을 탄소도핑한 AlGaAs/GaAs HBT층을 이차이온 질량분석과 쌍결정 X 선 회절 측정을 하여 그 특성을 알아보았으며, 소자를 제작하여 DC, RF 특성을 측정, 조사하였다.

II. 탄소도핑의 특성

베이스를 탄소도핑했을때의 에미터-베이스접합의 계면특성을 조사하기 위해 이차이온 질량분석(SIMS)을 하였다. 표1에 측정한 시료의 수직 층구조를 보이고 있다. 베이스층을 $4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 로 도핑한 다음 spacer층 없이 바로 에미터층을 성장시켰다. Cameca IMS-4f spectrometer를 사용하여 측정한 결과가 그림1에 나타나 있다. Cs⁺이온을 입사이온으로 하여 C⁻, Al₂⁻, Si⁻, Ga⁻ 등의 음이온들을 검출 하였으며 이때 이온의 입사에너지는 14.5keV이고 이온전류는 0.01 μA 이며 빔의 크기는 $125 \times 125 \mu\text{m}^2$ 이다. 표준시료가 없어서 식각깊이와 농도등 정량화는 하지 못했다. 에미터-베이스접합 부근에서 탄소와 알루미늄의 분포를 볼때 탄소가 에미터로의 확산이 전혀 이루어지지 않은것을 알 수 있다. 즉 탄소를 도핑한 경우는 spacer층이 없어도 AlGaAs/GaAs의 이

표 1. SIMS 와 DXRD 측정을 위한 HBT의 층구조

Table 1. HBT layer structure for SIMS and DXRD measurement.

Layer	Thickness [μm]	Doping [cm ⁻³]	Growth temp. [°C]
n ⁺ - GaAs	0.05	5×10^{18}	700
N - Al _{0.3} Ga _{0.7} As	0.3	5×10^{17}	700
p ⁺ - GaAs	0.2	4×10^{19}	650
n - GaAs	0.5	1×10^{17}	650
n - GaAs	0.5	5×10^{16}	650
n - GaAs	0.5	3×10^{16}	650
n ⁺ - GaAs	0.5	5×10^{18}	700
n-GaAs substrate			

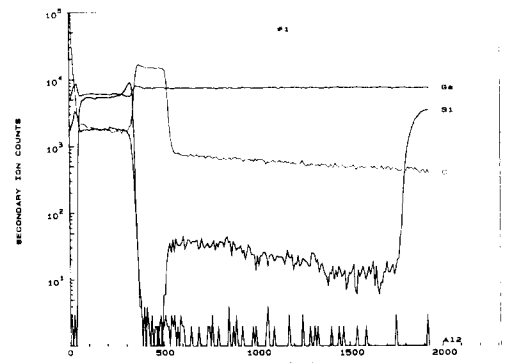


그림 1. HBT 층의 SIMS profile

Fig 1. SIMS profile of HBT layer.

중첩함과 p-n접합이 일치하는 양질의 에미터-베이스 접합을 얻을 수 있다. 에미터-베이스 접합부근의 알루미늄과 탄소의 농도가 조금씩 높아진 것은 성장중에 반응관과 vent와의 압력차이에 의해 MFC(mass flow controller)가 스위치작용할때 생기는 역류에 의한 것으로 보인다. 베이스층을 제외한 나머지영역에서도 탄소가 많이 검출되는 것은 SIMS 분석관내에 탄소가 10^{17}cm^{-3} 이상으로 존재하기 때문이다.

GaAs에서 탄소도핑이 되면 비소가 탄소로 치환되는데, 고농도 도핑의 경우는 격자상수가 작아지면서 tensile strain 이 발생하게 된다. 이 때 Vegard의 법칙에 의해, 격자상수의 감소는 탄소의 농도에 비례하게 된다. 도핑농도와 격자상수와의 관계를 구하기 위해, 탄소도핑된 시료들을 Van der Pauw Hall 측정하여 정공농도를 구하고, 쌍결정 X선 회절측정으로 격자부정합($\Delta a/a$)을 구한 결과가 그림2에 나타나 있다.

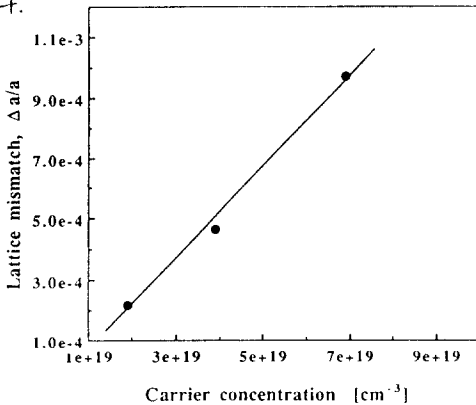


그림 2. 정공농도에 따른 격자부정합

Fig 2. Lattice mismatch as a function of hole concentration.

CuK α_1 의 X선을 사용하고 1차 결정은 (100)Si의 (400)반사를 이용했다. 격자부정합과 정공농도와의 관계는 아래식과 같이 구해졌다.

$$\Delta a/a = -1.6 \times 10^{-23} (p - 8.1 \times 10^{18}) \quad (1)$$

여기서 a는 GaAs의 격자상수이고, Δa 는 탄소도핑된 GaAs와 도핑되지 않은 GaAs의 격자상수 차이이며 p는 정공농도이다. 표1의 시료를 쌍결정 X선 회절측정한 결과가 그림3에 나타나 있다. 측정 결과에서 보듯이 탄소도핑된 GaAs의 격자부정합은 -5.1×10^{-4} 으로서 정공농도가 $4 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 임을 알수있고, 에미터층의 Al조성은 26%로 나타났다. 즉 탄소도핑의 경우는 쌍결정 X선 회절측정과 같은 비파괴검사

로 베이스층의 도핑농도를 측정할 수 있다.

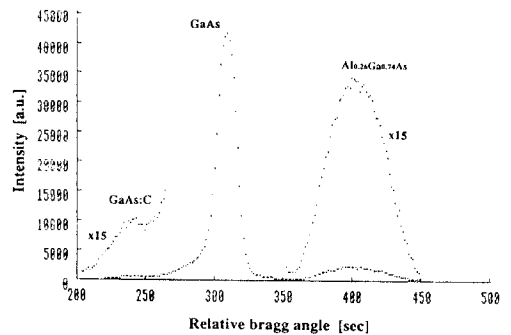


그림 3. 표1 시료의 DXRD peak

Fig 3. DXRD peak of table 1.

Ⅲ. HBT의 설계및 제작

표2에 설계된 HBT의 수직 층구조를 보이고 있다. 고속, 전력용 HBT의 설계에 있어 중요한 변수들은 동작주파수, 출력전력, 전력효율, 동작전압등 여러가지가 있으며, 시스템에서 요구되는 사양에 맞게 구조를 최적화 하여야 한다. 그중에서 베이스와 콜렉터층의 설계가 가장 중요하다. 베이스층은 주행시간을 줄이기 위해 두께를 얇게 하며 그로인한 저항의 증가를 막기위해 고농도로 도핑하여야 한다. 그러나 베이스층을 ~ 0.1 이하로 하면 매사구조에서는 베이스층을 찾기위한 식각조절이 어렵게 되며, $1 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 이상의 도핑을 하면 고농도 도핑에 따른 결함의 증가에 따라 베이스층의 특성이 저하된다. 설계된 베이스층의 면적 저항(R_{sheet})은 $200\Omega/\text{square}$ 이며, 베이스 주행시간은 2ps이다. 콜렉터층의 농도 및 두께는 소자의 동작전류와 항복전압을 결정하는데, 전력용소자

표 2. 설계된 HBT 의 수직층구조

Table 2. Designed HBT layer structure

Layer	Thickness [μm]	Doping [cm ⁻³]	Growth temp. [°C]
n ⁺ - GaAs	0.05	5×10^{18}	700
N - Al _{0.3} Ga _{0.7} As	0.1	5×10^{17}	700
Graded layer	0.02	10^{17}	650~700
p ⁺ - GaAs	0.1	4×10^{19}	650
n - GaAs {C1}	0.2	5×10^{16}	650
n - GaAs {C2}	0.4	2×10^{16}	650
n ⁺ - GaAs	1.0	5×10^{18}	700
S.I.-GaAs substrate			

는 높은 전류밀도와 항복전압을 갖도록 설계해야 한다. 그러나 전류밀도와 항복전압은 서로 상반된 조건을 갖으며, 컬렉터층 도핑농도와 두께에 따라 그 값들이 변화된다. 따라서 항복전압을 낮추지 않으면서 전류밀도를 높이기 위해 이중 컬렉터 구조를 채택하였으며, Kirk효과에 의한 임계 컬렉터 전류밀도(J_{O_c})는 아래와 같이 주어진다. [11]

$$J_{O_c} = qv_d [2\epsilon_s \epsilon_0 V_{CB} / qW^2 C_2 + N_{C2}] \quad (2)$$

여기서 ϵ_s 는 비유전율, W_{C2} 는 컬렉터 (C2)층의 두께, N_{C2} 은 도핑농도 이고 vd 는 컬렉터 공핍층에서 전자의 포화속도이다. 전계가 50kV이고 온도가 300K에서 $v_d = 8.3 \times 10^6$ cm/s로 주어지며 $V_{CB} = 1$ V 일 때 $J_{O_c} = 39$ kA/cm²로 예상된다. 컬렉터-베이스 접합의 항복전압(BV_{CBO})는 아래와 같이 주어진다.

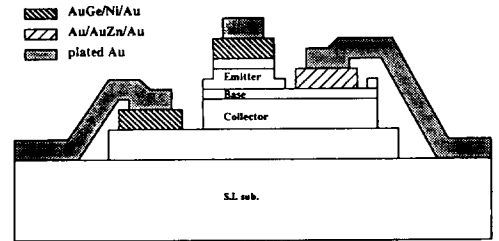
$$BV_{CBO} = E_{cr} (W_{C1} + W_{C2}) - (W_{C1}^2 + W_{C2}^2) q N_{C1} / 2\epsilon_s \epsilon_0 - W_{C2}^2 q N_{C2} / 2\epsilon_s \epsilon_0 - V_b \quad (3)$$

$$E_{cr} = 4.95 \times 10^7 N_c^{1/3} \quad (4)$$

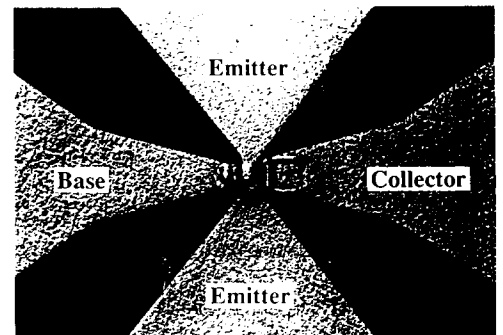
여기서 E_{cr} 은 임계 항복전계, V_b 는 built-in 전위이며 계산된 항복전압은 26V이다. 일반적으로 고속 동작을 위해 동작 전압에서 컬렉터층(C1+C2)을 모두 공핍층이 되게 하며, 그럴경우 계산된 컬렉터-베이스 커패시턴스(C_{CB})는 2×10^{-8} F/cm² 이고 컬렉터 주행시간은 3.6ps 이다. 표2에서 보듯이 에미터-베이스 접합에서 에미터층을 200Å 두께로 Al조성을 경사지게 하여 계단 접합일 때 발생하는 에미터의 장벽효과를 없앴다. 에미터 도핑농도로 부터 예상되는 에미터-베이스 커패시턴스(C_{EB})는 $V_{EB}=0$ V에서 2×10^{-7} F/cm² 이다.

결정 성장은 상압 MOCVD 장비로 하였으며 사용 원료는 TMG, TMA (trimethylaluminum), AsH₃ (10% in H₂) 이며, n 형과 p 형 도펀트로서 SiH₄ (60 ppm in H₂) 과 CCl₄ (200 ppm in H₂) 를 각각 사용하였다. 성장온도는 베이스층과 컬렉터층의 경우 도핑 농도 조절을 위해 650℃에서 성장시켰고, 다른 층은 700℃에서 성장시켰다. 소자는 일반적인 메사구조로 제작하였으며 공기중에 노출된 에미터-베이스접합은 공핍된 AlGaAs층으로 보호하였다. 에미터, 컬렉터 금속은 AuGe/Ni/Au로 하고, 베이스 금속은 Au/AuZn/Au로 하였으며, lift-off 공정으로 패터닝하고 RTA(Rapid Thermal Alloy)로 400℃에서 60 초간 열처리하여 저항성 접촉을 형성시켰다. 패드 금속은 air-bridge 공정중에 Au로

plating되었으며 plating seed 금속으로는 Ti/Au를 사용하였다. 제작된 소자의 단면도와 표면사진이 그림4에 나타나 있다.



(a)



(b)

그림 4. a) 제작된 소자의 단면도 b) 표면사진 (에미터면적 : $3 \times 6 \mu\text{m}^2$)

Fig 4. a) Cross-sectional view of fabricated device b) Surface photograph (emitter area : $3 \times 6 \mu\text{m}^2$).

IV. 결과 및 고찰

그림5에는 에미터 면적이 $50 \times 100 \mu\text{m}^2$ 인 소자의 I_c-V_{CE} 특성곡선이 나타나 있다. 동작전류에 의한 열 발생 때문에 컬렉터 전류밀도를 5kA/cm² 까지만 흘렸으며, 고전류에서 열에 의한 부저항 특성을 보이고 있다. 컬렉터 전류밀도(J_c)가 5kA/cm² 일때 공통에미터 DC 전류이득(h_{FE})은 30 이고 컬렉터-에미터 offset전압($V_{CE, offset}$)은 0.2V 이며, $BV_{CBO} = 25$ V로서 설계값과 거의 일치하였다. Early 전압은 고농도 베이스층의 영향으로 500V이상의 값을 가졌다. 그림6에는 RF 측정용 $5 \times 50 \mu\text{m}^2$ 의 에미터 면적을 갖는 소자의 DC 특성이 나타나 있다. $J_c = 40$ kA/cm²에서 $h_{FE} = 20$ 으로 $50 \times 100 \mu\text{m}^2$ 때보다 감소했는데,

이는 에미터 면적을 줄이면서 (둘레길이/면적)의 비가 커지고 표면 누설전류의 영향에 의한 베이스전류의 증가 때문이다. 각 집합의 특성은 양호했으며 V_{BE} 에 따른 콜렉터 전류의 이상계수(η_{CB})는 1.07이고, 베이스 전류의 이상계수(η_{EB})가 1.4 였다. 소자의 turn on 전압은 $I_C=1\text{mA}$ 를 기준으로 할 때 $V_{BE}=1.24\text{V}$ 로서 $1.2 \times 1.2\text{cm}^2$ 크기의 웨이퍼 영역에서 균일하였다. 에미터, 베이스의 저항을 고려한 transconductance(g_m)은 아래와 같이 주어진다.

$$g_m = g_{m0} / \{g_{m0}(R_E + R_B/\beta) + 1\} \quad (5)$$

$$g_{m0} = qI_C / kT \quad (6)$$

여기서 β 는 소신호 전류이득이고 g_{m0} 는 내부 transconductance이며 그림에서 보듯이 $J_c=40\text{kA}/\text{cm}^2$ 에서 $g_m=200\text{mS}$ 이며 에미터 finger 길이로 나누면 $g_m = 4\text{S}/\text{mm}$ 이다. TLM (Transmission

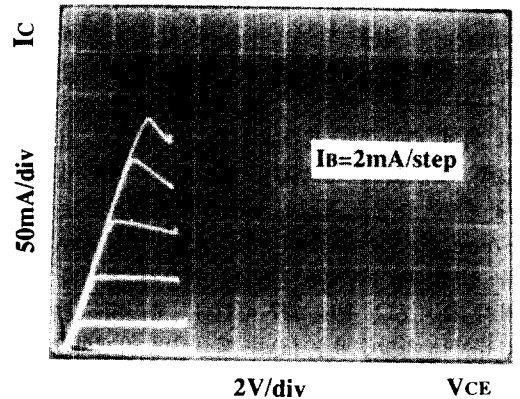
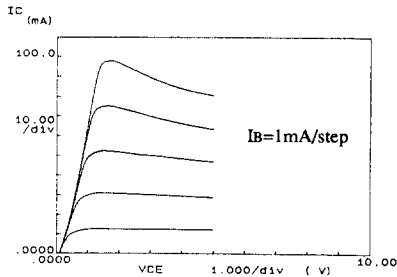
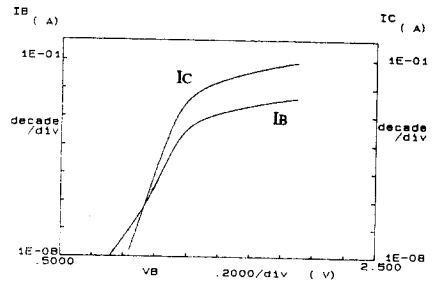


그림 5. 제작된 소자의 공통에미터 전류-전압 특성 (에미터면적 : $50 \times 100 \mu\text{m}^2$)

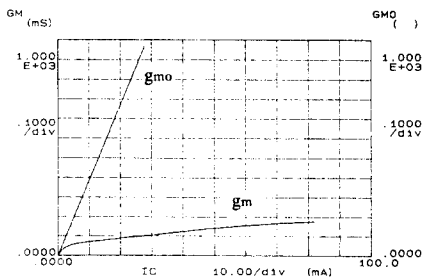
Fig 5. Common emitter I-V characteristic of fabricated device (emitter area : $50 \times 100 \mu\text{m}^2$).



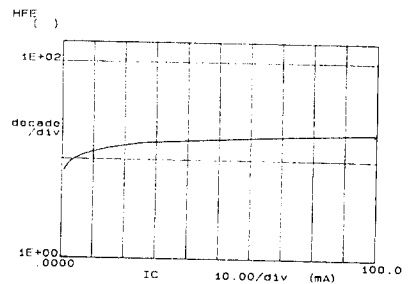
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 6. RF측정용 소자의 DC 특성 (에미터면적 : $5 \times 50 \mu\text{m}^2$)

a) I-V 특성 b) Gummel plot

c) 콜렉터전류에 따른 transconductance d) 콜렉터전류에 따른 DC 전류이득

Fig 6. DC characteristics of the device for RF measurement (emitter area : $5 \times 50 \mu\text{m}^2$).

a) I-V characteristic b) Gummel plot,

c) Transconductance as a function of collector current,

d) DC current gain as a function of collector current.

Line Model) 측정으로 베이스층의 $R_{sheet} = 550\Omega/\text{square}$ 의 값을 얻었으며 설계 값보다 크게 측정된 것은 에미터층을 식각할 때 베이스층도 일부가 식각되어 두께가 얇아진 것과 결합에 의한 정공이동도의 저하 때문으로 생각된다. 또한 베이스 전극의 비접촉 저항(ρ_c)은 $3 \times 10^{-5}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 로서 개선이 필요하다. C-V 측정을 통하여 $V_{CB}=3V$ 일때 $C_{BC} = 3 \times 10^{-8} \text{F/cm}^2$ 와 $V_{EB}=0V$ 에서 $C_{EB} = 3.4 \times 10^{-7} \text{F/cm}^2$ 의 값을 얻었으며, 측정된 에미터 저항과 컬렉터 저항은 각각 $R_E = 6\Omega$, $R_C = 2\Omega$ 이었다. 측정된 값으로부터 전류이득 차단주파수(f_T)를 계산하면 아래와 같다.

$$f_T = (2\pi)^{-1}(\tau_e + \tau_b + \tau_c + \tau_{cc})^{-1} \\ = (2\pi)^{-1} \left\{ \left[\frac{kT}{qI_c} (C_{EB} + C_{BC}) \right] + \left[\frac{W_b}{2D_n} \right] + \left[\frac{W_c}{2V_d} \right] + \left[C_{BC} (R_E + R_C) \right] \right\}^{-1} \quad (7)$$

여기서 τ_e 는 에미터 충전시간, τ_b 는 베이스 주행시간, τ_c 는 컬렉터 주행시간, τ_{cc} 는 컬렉터 충전시간이며, W_b 는 베이스층 두께, W_c 는 컬렉터층 두께, D_n 는 베이스층에서 전자의 확산계수를 나타낸다. 에미터 면적이 $5 \times 50 \mu\text{m}^2$ 이고 베이스 면적이 $15 \times 50 \mu\text{m}^2$ 인 소자에서 I_c 가 100mA일 때 f_T 는 약 20GHz가 된다.

RF 특성을 조사하기 위해 Cascade Microtech. probe와 HP 8510B automatic network analyzer를 이용하여 에미터 면적이 $5 \times 50 \mu\text{m}^2$ 인 소자를 측정하였다. 측정된 S-parameter가 그림 7에 나타나 있다. S_{21} 은 크기를 10으로 나누어 표시하였다. f_T 와 최고 공진주파수(f_{max})는 각각 단락회로 전

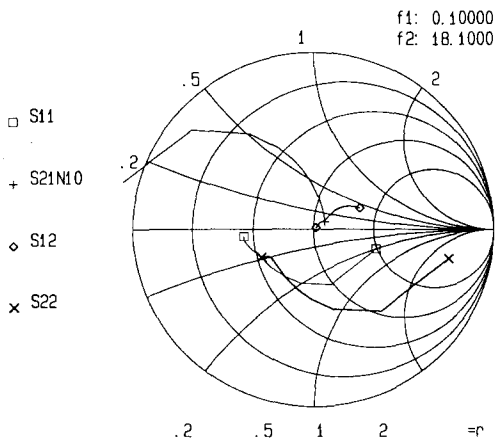


그림 7. 측정된 S-parameter (주파수범위 : 0.1 ~ 18.1 GHz)

Fig. 7. Measured S-parameter (frequency range : 0.1 ~ 18.1 GHz).

류이득(h_{21})과 전력이득(G_{max})이 1 이되는 주파수이며, h_{21} 과 G_{max} 는 아래식과 같이 주어진다.

$$h_{21} = -2S_{21} / \{ (1 - S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21} \} \quad (8)$$

$$G_{max} = |S_{21}| / |S_{12}| \{ K - (K^2 - 1)^{1/2} \} = MAG \quad \text{for } K > 1 \quad (9a)$$

$$= |S_{21}| / |S_{12}| = MSG \quad \text{for } K > 1 \quad (9b)$$

$$K = (1 + |D|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2) / (2|S_{12}||S_{21}|)$$

$$D = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$$

여기서 K는 안정화 계수이다. G_{max} 는 K값이 1보다 크면 MAG(maximum available gain)로 계산이 되고, K값이 1보다 작으면 MSG(maximum

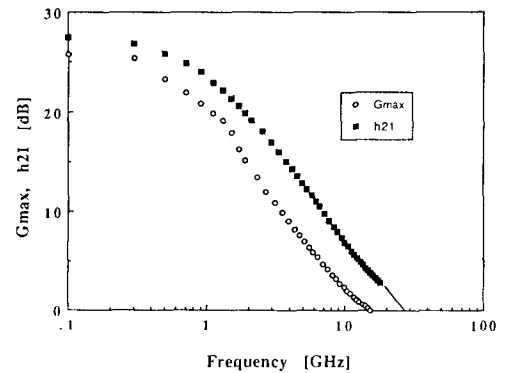


그림 8. 주파수에 따른 전류이득(h_{21})과 (G_{max})
Fig. 8. Current gain (h_{21}) and power gain (G_{max}) as a function of frequency.

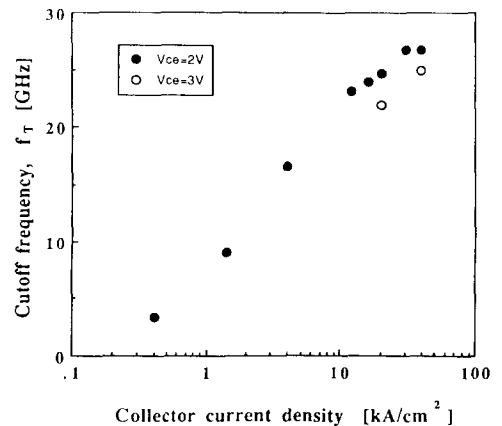


그림 9. 컬렉터 전류밀도에 따른 전류이득 차단주파수

Fig. 9. Current gain cut-off frequency as a function of collector current density.

stable gain)로 계산이 된다. S-parameter로 부터 $J_c = 40 \text{ kA/cm}^2$ 일때 $f_T = 27 \text{ GHz}$, $f_{\text{max}} = 16 \text{ GHz}$ 를 얻었으며 그림8에 나타나 있다. 측정된 f_T 가 계산값보다 크게 나온 것은 콜렉터 영역이 전부 공핍되지 않아 콜렉터 주행시간이 단축된 것과, 측정된 에미터와 콜렉터의 저항값이 실제보다 크게 측정되어서 결과적으로 계산된 f_T 값이 작게 나온 것으로 보인다. 그림에서 주파수가 1 GHz 이하에서는 G_{max} 가 10 dB/decade 의 기울기를 갖다가 1 GHz 이상에서는 기울기가 커진다. 이것은 주파수가 1 GHz 이상에서는 K 값이 1이상이고 1 GHz 이하에서는 K 값이 1이하가 되어 G_{max} 값이 각각 MAG와 MSG로 계산되며 MAG의 경우에 기울기가 커졌기 때문이다. J_c 에 따른 f_T 의 변화 곡선이 그림9에 나타나있다. f_T 는 J_c 가 증가함에 따라 증가하고 J_0 에서 최고값이 되며 J_0 보다 큰 값일 때 Kirk 효과에 의해 감소하게 된다. $V_{CE} = 2 \text{ V}$ 에서 $J_0 = 40 \text{ kA/cm}^2$ 로서 예상보다 큰값이 나왔는데, 이는 콜렉터층(C2)의 도핑농도가 설계치보다 컸던 것으로 보이며, 앞의 f_T 결과 분석에서 언급했듯이 콜렉터층이 전부 공핍되지 않은 원인이기도 하다. $V_{CE} = 3 \text{ V}$ 일때가 $V_{CE} = 2 \text{ V}$ 일때 보다 f_T 가 떨어짐을 알 수 있다. 이것은 V_{CE} 가 증가함에 따라 베이스-콜렉터 접합의 공핍층을 지나가는 시간이 증가하기 때문이다. 측정된 S-parameter로부터 소신호 집중소자 등가회로의 소자값을 추출하였다. 추출된 소신호 집중소자 등가회로는 그림10에 나타나 있다. 측정된 S-parameter 값과 추출된 소자값으로 부터 역계산된 S-parameter를 그림11에 비교하였다. 주파수범위는 $1 \sim 15 \text{ GHz}$ 이며 1 GHz 씩 15점에서 계산하였다. 측정값과 계산값의 오차는 아래식과 같이

least-squares 방법으로 주파수에 대하여 평균하였으며 그값은 0.01이다.

$$\text{error} = \frac{1}{15} \sum_{f=1}^{15} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left| S_{ij}(f)_{\text{meas.}} - S_{ij}(f)_{\text{calc.}} \right|^2 \quad (10)$$

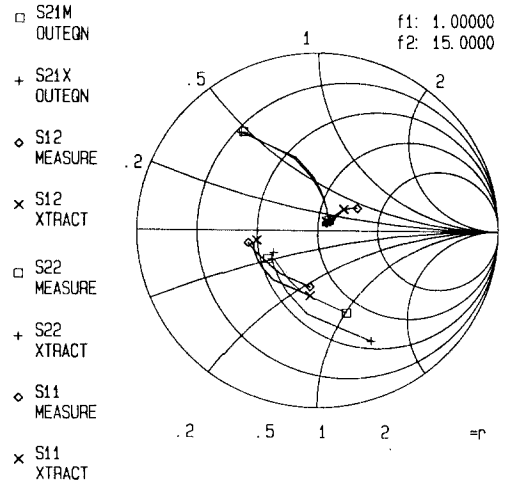


그림 11. S-parameter 의 측정값과 계산값
Fig. 11. Measured and calculated S-parameter.

여기서 i, j 는 port 를 나타내며, f 는 측정 한 주파수의 갯수이다.

V. 결론

CCl₄를 사용하여 상압 MOCVD로 베이스를 탄소 도핑한 AlGaAs/GaAs HBT층을 성장시켰다. SIMS측정으로 탄소도핑한 에미터-베이스접합의 계면특성을 알아보았고, 탄소도핑된 HBT의 경우 DXRD측정으로 베이스층의 도핑농도를 측정할 수 있음을 보였다. 메사구조로 소자를 제작하였고 베이스 도핑이 $4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 일때 면적저항(R_{sheet})은 $550 \Omega/\text{square}$ 이고 베이스 전류의 이상계수(η_{EB})는 1.4였다. 에미터 면적이 $50 \times 100 \mu\text{m}^2$ 인 소자에서 $J_C = 5 \text{ kA/cm}^2$ 에서 $\eta_{\text{FE}} = 30$ 이었고 $\text{BV}_{\text{CBO}} = 25 \text{ V}$ 였다. $5 \times 50 \mu\text{m}^2$ 소자를 on-wafer S-parameter 측정하여 $f_T = 27 \text{ GHz}$, $f_{\text{max}} = 16 \text{ GHz}$ 의 값을 얻었으며 $V_{\text{CE}} = 2 \text{ V}$ 에서 $J_O = 40 \text{ kA/cm}^2$ 였다. 측정된 S-parameter로부터 소신호 집중소자 등가회로의 소자 값들을 추출해 내었다.

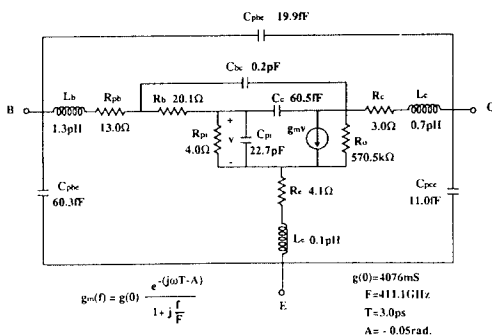


그림 10. S-parameter 로 부터 추출된 소신호 집
중소사 등가회로
Fig. 10. Small-signal lumped-element
equivalent network extracted from
S-parameter.

본 실험에서는 탄소도핑을 이용한 고속, 전력용 HBT의 제작과 특성을 보였다. 보다 더 향상된 성능의 HBT를 실현시키기 위해서는 층구조의 최적화와 self-aligned contact을 포함한 layout의 최적화등이 요구되며 단위공정을 개선시켜야 한다. 한편 탄소도핑의 원료인 CCl₄는 CFC 규제물질이 되므로 TMA등으로 교체되어야 할 필요성이 있다.

參 考 文 獻

- [1] P. M. ENQUIST, "Secondary ion mass spectroscopy depth profiles of heterojunction bipolar transistor emitter-base heterojunctions grown by low pressure OMVPE," *J. Cryst. Growth*, vol.93, pp. 637-645, 1988.
- [2] M. Uematsu and K. Wada, "Recombination-enhanced impurity diffusion in Be-doped GaAs," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 58, pp. 2015-2017, 1991.
- [3] I. Teramoto, *J. Phys. Chem. solids*, vol. 33, p. 2089, 1972.
- [4] R. J. Malik, R. N. Nottenburg, E. F. Schubert, J. F. Walker, and R. W. Ryan, "Carbon doping in molecular beam epitaxy of GaAs from a heated graphite filament," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 53, pp. 2661-2663, 1988.
- [5] T. Yamada, I. Tokumitsu, K. Saito, T. Akatsuka, M. Miyauchi, M. Konagai and K. Takahashi, *J. Cryst. Growth*, vol. 95, p.145, 1989.
- [6] T. F. Kuech, M. A. Tischler, P. J. Wang, G. Scilla, R. Potenski and F. Cardone, "Controlled Carbon doping of GaAs by metalorganic vapor phase epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, vol.53, pp.1317-1319, 1988.
- [7] B. T. Cunningham, G.E. Stillman and G. S. Jackson, "Carbon-doped base GaAs/AlGaAs heterojunction bipolar transistor grown by metalorganic chemical vapor deposition using carbon tetrachloride as a dopant source," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 56, pp. 361-363, 1990.
- [8] J. K. Twynar, H. Sato, and T. Kinosada, "High performance carbon-doped base GaAs/AlGaAs heterojunction bipolar transistor grown by MOCVD," *Electronics Letters*, vol.27, pp. 141-142, 1991.
- [9] 손정환, 전병태, 공명국, 조현룡, 권영세, "탄소 도핑된 베이스를 갖는 GaAs/ AlGaAs HBT의 제작 및 특성," *추계 종합 학술대회 논문집*, 제 14 권, 제 2호, pp.283-286, 1991.
- [10] 손정환, 전병태, 권영세, "MOCVD 에서 CCl₄를 사용한 AlGaAs 의 탄소도핑과 HBT에의 응용," *추계 종합 학술대회 논문집*, 제 15권, 제2호, pp. 337-339, 1992.
- [11] G. B. Gao, M. S. Unlu, J. Chen, B. Mazhari, K. Adomi, G. X. Liu, Z. F. Fan, and H. Morkoc, "Double-layer collector for heterojunction bipolar transistor," *Solid-State Electron.*, vol. 35, pp.57-60, 1992.

著 者 紹 介



孫 正 煥(學生會員)

1965年 12月 27日生. 1988年 2月
서강 대학교 이공대학 전자공학과
졸업. 1990年 2月 한국과학기술원
전기및 전자공학과 졸업. 1990年
2月 ~ 현재 한국 과학기술원 전
기및 전자공학과 박사과정. 주관

심 분야는 MOCVD, 광소자, 고속 전자소자 및 광전
집적회로 등임.

金 東 旭(正會員) 第 29卷 A編 第 7號 參照

1993年 2月 ~ 현재 한국 과학기술
원 전기및 전자공학과 박사과정

洪 聖 喆(正會員) 第 29卷 A編 第 7號 參照

1993年 2月 ~ 현재 한국과학기술
원 전기 및 전자공학과 조교수

.

權 寧 世(正會員)

1945年 12月 28日生. 1968年 2月 서울대학교 공과
대학 전자공학과 졸업 (공학사). 1972年 미국 오하이
오 주립대학교 전자공학과 졸업 (공학 석사). 1977년
미국 캘리포니아 주립대학교 버클리대학 전자공학과
졸업 (공학 박사). 1977-1979 미국 Duke 대학 국방
연구소 연구원. 1979-1981 한국과학기술원 조교수.
1981-1986 한국과학기술원 조교수. 1987- 현재 한
국과학기술원 교수. 주관심 분야는 화합물 반도체 공
정기술및 소자 개발 과 집적화 연구 등임.