한국전기전자재료학회 2002년도 하계학술대회 논문집

고온 특성을 위한 AlGaAs/GaAs HBT의 설계에 관한 연구

Ohmic Resistance of AlGaAs/GaAs HBT at High Temperature

이준영*, 신훈법*, 안형근*, 한득영*
(Jun-Young Lee*, Shin-Hun-Bum*, Hyung-Keun Ahn*, Deuk-Young Han*)

Abstract

GaAs has become a very popular material for the fabrication of high frequency, low noise and microwave power devices. GaAs devices are also well suited for high temperature operation because of the large band gap of this material. The standard GaAs technology and device structures have to be modified for stable operation at high temperature. In this paper, AlGaAs/GaAs HBT considering stable ohmic contact at high temperature as well as thermal effect such as self-heating effect are introduced. All the data obtained study will be used as input data for the simulator and the result will be compared with an analytical model available in this study.

Key Words : Heterojunction Bipolar Transister, Ohmic contact, Self-heating effect, Thermal coupling

1. 서 론

저 전력 무선통신 시스템에 대한 폭발적인 요구와 함께 RF기술개발의 진보를 이루어 왔으며 저비용, 고효율, 고도의 집약된 기술은 하나의 칩으로 무선통신 시스템 구현하는데 있어 반드시 필요하다고 말할 수 있다.

HBT(heterojunction bipolar transister)의 개념은 1948년 William Schockley에 의해 처음 소개되었으며 이에 대한 이론은 1957년 Kroemer에 의해 발전되었다. 또한 Ⅲ-Ⅴ족 반도체 공정기술에 있어 LPE를 거쳐 MOCVD와 MBE기술에 의해 급격한 발전을 이룰 수 있었다.

BJT와 비교해 볼 때 HBT의 장점은 높은 밴드갭의 에미터 구조를 가지므로 전도대역의 Offset은 베이스로부터 에미터로의 정공의 주입을 차단 할 수 있으며 이로 인해 높은 전류를 얻을 수 있다.

* : 건국대학교 전기공학과
서울시 화양동 1번지,
Fax: 02-447-9186
E-mail : leejye2@hanmail.net

HBT는 MESFET이나 HEMT에 비해 완성된 기술이 확립되어 있지 않으나 GaAs HBT는 고주파, 저잡음 특성 그리고 microwave전력용 소자제작에 있어 각광받고 있는 물질이며 고온에서 안정성을 보장하기 위해 필요한 Si에 비해 큰 밴드갭을 가지고 있다.

하지만, 기본 GaAs의 공정기술과 소자구조 설계는 고온에서 안정적인 동작을 보장하기 위해 수정되어야 한다. 이를 위해 두 가지가 고려되어야 한다.

첫째, 모든 온도범위에서 안정적인 전기적 특성을 유지해야한다. 다시 말해 일정한 전류. 전압이득, 일정 입. 출력 임피던스 그리고 동작 온도범위에서 최소의 노이즈 특성을 말한다.

이러한 전기적 안정성은 오믹(Ohmic)접촉의 경우에 접촉저항이 온도변화에 따라 변화하지 않는다는 것을 의미한다.

둘째, 소자의 특성저하 이다. (1)식의 Arrhenius 법칙에 따르면 소자의 특성저하는 온도에 따라 지수적으로 증가하며 이러한 소자의 특성저하는 고온에서 소자의 신뢰성 문제를 발생 시킨다.

$$D = D_0 e^{(E_a/kT)} \quad (1)$$

여기서, D는 확산계수 그리고 E_a는 활성화 에너지이다.

HBT는 전류 수용능력이 우수한 반면 S.I GaAs 기판으로 사용한 HBT의 경우에 표1.에 제시된 바와 같이(Si열전도도의 1/3) S.I. GaAs의 낮은 열전도도에 의해 Self-Heating효과를 나타낸다.

표 1. Elemental과 화합물 반도체의 열전도도

Table 1. Thermal Conductivity of Elemental and Compound Semiconductors [13]

Semiconductor	k ($Wcm^{-1}K^{-1}$)
Si	1.5
Ge	0.6
AlP	0.9
AlAs	0.8
AlSb	0.57
GaAs	0.46
GaP	0.77
GaSb	0.39
InP	0.68
InSb	0.166
InAs	0.273

이러한 문제를 해결하기 위해 근래 마이크로웨이브 HBT의 경우 multi-에미터-finger구조를 가진 구조를 사용하고 있으며 이 구조를 채택할 경우 현저히 Self-heating effect를 줄인 것으로 나타냈다.

HBT가 고온(300K-600K)의 범위에서 동작하기 위해 열방출이 중요하며 구조상으로 extrinsic (sub-컬렉터, S.I GaAs)에 따라 small-area, large-area HBT로 구분되며 large-area HBT의 경우 Self-heating 효과는 해석 시 무시될 수 있다.

500℃ 이상까지 온도 상승 시 열전자-정공 발생에 따른 누설전류의 억제를 위해 1.4eV보다 큰 에너지 갭이 필요하며 고온 시 격자 온도에 의한 과잉 캐리어가 발생되지 않아야 하므로 전도대역에 큰 offset전압을 필요로 한다. 또한 베이스-컬렉터 접합에 역 바이어스 시 공핍영역에 전자-정공쌍의 발생은 에미터-컬렉터 전압에 대해 불포화 전류를 발생시키며 이를 해결하기 위해서는 컬렉터 부분에 넓은 갭을 적용한 DHBT(double-heterojunction bipolar transistor) 구조가 사용된다. 따라서 소자 설계시 이러한 모든 분야에 대해 고려되어야 한다.

2. 본 론

2.1 오믹(Ohmic)컨택

고온에 안정한 AlGaAs/GaAs HBT의 경우 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

- 낮은 접촉저항
- 접촉저항의 동질성
- Sub-micron구조에 적절한 형태
- 600K에 대해 안정성
- 공정시 Self-aligned한 습식식각 과정상에 있어서 금속 자체에서 촉매작용으로 유도된 가속화된 식각율의 문제를 피하기 위해 Au와 Pt와 같은 금속을 피해야 한다.
- 소자 공정 기술과의 조화
- 낮은 면 저항을 가져야 되며 이를 위해 top-layer에 Au를 사용하며 이는 상승된 온도에서 전자이동은 Au층의 전류수용을 제한한다.

(1) 에미터 오믹(Ohmic)접촉

에미터의 경우 오믹접촉(AuGe/Ni/Au), 리프트오프(lift-off)가 필요하다.

표 2. n-GaAs 고온에서 안정한 오믹(ohmic)접촉

Table 2. High temperature stable ohmic contact on n-GaAs

contact system	$T_F(t_F)$	ρ_C와 $R_C(N_D)$	thermal stability
Ge/Au/Ni	920K (5s)	$1\times10^{-5}\Omega cm^2$ ($1\times10^{17}\Omega cm^{-3}$)	670K (550h) [1]
Ni/Ge/Au	920K (30s)	$0.23\Omega mm$ ($6\times10^{13}\Omega cm^{-2}$)	670K (20h) [2]
Ni/In-Ni/Ni	1070K (7s)	$0.3\Omega mm$ ($3.5\times10^{13}\Omega cm^{-2}$)	670K (100h) [3]
Pd/Ge	720K (30s)	$4\times10^{-7}\Omega cm^2$ ($1\times10^{18}\Omega cm^{-3}$)	670K (50h) [4]

고온에서 안정한 n-type 오믹(ohmic)접촉은 표2에서 제시된 바와 같이 670K에서 550시간이상 안정된 특성을 보이는 Ge/Au/Ni 이 적절하다. 여기서 한가지 유의해야 할 점은 오믹(ohmic)접촉 설계시 낮은 면 저항을 위해 top layer로 Au층이 필요하나 Au의 Ga과 상호작용으로 인한 Au침투를 피하기 위해 Au 아래층에 W_5Si_2, LaB_6와 같은 Diffusion barrier가 필요하다는 것이다. [3]

(2) 베이스 오믹(Ohmic)접촉

베이스의 경우 베이스 저항을 줄이기 위해 에미터에 가능한 한 가깝게 설계해야 하며 N^+pn 소신호 HBT의 경우 P타입의 경우 AuBe, AuZn, AuMg가 사용되나 베이스층이 매우 얇기 ($\leq 0.1\mu m$) 때문에 Au가 베이스 층을 침투하여 컬렉터-베이스가 단락 되는 현상이 있으므로 베이스 저항이 증가 하는점을 감수하더라도 단락을 피하기 위해 Ti/Pt/Au가 사용된다.

contact system	$T_F(t_F)$	ρ_C와 $R_C(N_D)$	thermal stability
Ti/Pt/Au	920K (30s)	$1\times10^{-5}\Omega cm^2$ $(3\times10^{19}\Omega cm^{-3})$	670K (1200h) [5]
Pd/Mn/Sb /Pd	770K (10s)	$2\times10^{-6}\Omega cm^2$ $(2.5\times10^{18}\Omega cm^{-3})$	670K (20h) [6]
Pd/Ge/Ti /Pt	720K (10s)	$6.4\times10^{-7}\Omega cm^2$ $(5\times10^{19}\Omega cm^{-3})$	570K (20h) [7]
Ni/In-Mn /W	1070K (2s)	$0.6\Omega mm$ $(1\times10^{15}\Omega cm^{-3})$	670K (30h) [7]

표 3. p-GaAs 고온에서 안정한 오믹(ohmic)접촉

Table 2. High temperature stable ohmic contact on p-GaAs

고온에서 안정한 p-type 오믹(ohmic)접촉은 표3에서 제시된 바와 같이 낮은 저항과 더불어 670K에서 1200시간이상 안정된 특성을 보이는 Ti/Pt/Au가 적절하다.

2.2 Self-heating 효과

서론에서 제시한 바와 같이 S.I GaAs의 낮은 열전도도로 인해 온도상승에 따른 Self-heating효과가 발생함과 동시 이로 인한 컬렉터-베이스 전압 증가로 전류이득의 감소와 아날로그 회로의 경우 응답에 상당한 영향을 주게된다. 특히 전력용HBT의 경우 이러한 현상은 가장 큰 문제가 된다.

$$P_s = J_C V_{CE} A_E \qquad (2)$$

여기서, P_s는 intrinsic HBT에서 발생한 열이다

$$\triangle T = T - T_0 = P_S R_{th} \qquad (3)$$

여기서, T 격자온도, T_0 외부온도(300K), 그리고 R_{th}는 온도에 따라 변하는 열저항 이다.

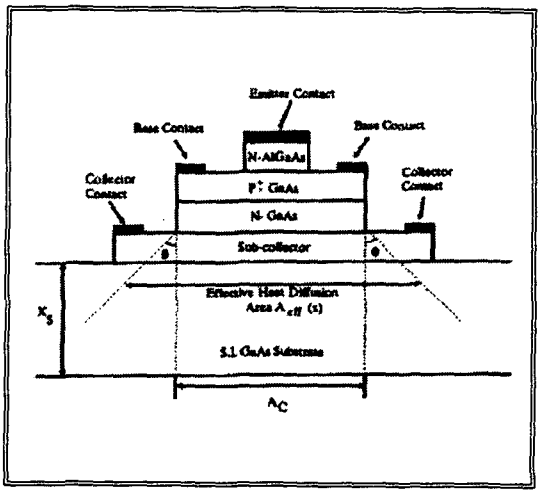

그림 1. S.I 기판을 통한 HBT의 열확산 [8]

Fig 1. Heat diffusion of an HBT throughout the S.I substrate

그림1에 보여진 θ는 열 확산을 나타내며 GaAs의 열전도도에 비례하는 $(T/T_0)^{-b}$ 에 의해 Kirchhoff transformation [9]로 부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$R_{th} = \frac{\eta - T_0}{P_S} \qquad (4)$$

이때, $\eta = [\frac{1}{T_0^{b-1}} - \frac{(b-1)R_{th0}P_S}{T_0^b}]^{-1/b-1}$

여기서, R_{th_0}는 온도변화에 대해 독립적인 열저항 이다.

Self-heating과 관련한 소자의 전기적 특성의 신뢰성을 살펴보면 전류이득을 감소시킬 뿐만 아니라 HBT의 차단주파수 역시 감소시킨다.

차단주파수의 감소원인은 Self-heating으로 인한 접합 부분에서의 온도상승에 따른 J_C의 감소 때문이다. [10]

이러한 Self-heating영향을 줄이기 위해 소자 설계시 multi-에미터 구조를 사용해야 하며 thermal coupling에 의한 multi-에미터간의 배열이 고려되어야 한다. [11]

$$R_C = \eta R_{th} (10/S)^{1.5} \qquad (5)$$

여기서, R_C는 multi-에미터에서 주변 에미터간의 thermal coupling으로 인한 열저항, R_{th}는 Self-heating에 의한 열저항, S는 multi-에미터 finger사이의 간격 그리고 η는 fitting 변수 이다.

위 식에서 보는바와 같이 S가 증가함에 따라서

R_C가 감소함을 알 수 있다.

또한 온도변화에 따른 전류이득의 변화는 Step접합보다 Graded 접합 구조를 가진 AlGaAs/GaAs HBT가 높고 안정한 전류이득을 얻을 수 있다. [12]

3. 소자설계구조

표 4. AlGaAs/GaAs HBT 에피구조

Table 4. A structure of epitaxial layer for AlGaAs/GaAs HBT

Structure	Composition	Thickness (μm)	Doping (cm^{-3})
Emitter cap	$n^+IN_xGa_{1-x}As$ (x=0.5)	0.02	2.0×10^{19}
Buffer Ⅲ	$n^+IN_xGa_{1-x}As$ (0→0.5)	0.02	0.5-2.0×10^{19}
Emitter	n^+GaAs	0.1	5×10^{18}
Emitter	n^+GaAs	0.07	5×10^{17}
Emitter	$n-Al_xGa_{1-x}As$ (0.3→0)	0.03	5×10^{17}
Emitter	$n-Al_xGa_{1-x}As$ (x=0.3)	0.07	5×10^{17}
Base	p^+-GaAs	0.07	5×10^{19}
Collector	n-GaAs	1.0	2×10^{16}
Sub-collector	n^+-GaAs	0.6	5×10^{18}
BufferⅡ	$i-Al_xGa_{1-x}As$ (x=0.3)	0.3	undoped
Buffer I	i-GaAs	0.3	undoped
Substrate	S.I.-GaAs	300	undoped

4. 결 론

HBT는 소자 특유의 장점 이외에도 FET에 비해 여러장점을 가지고 있으나 고온(300K-600K)에서도 소자의 특성저하를 최소화함과 동시에 소자의 신뢰성 문제점 해결에 대한 연구가 부족한 실정이다. 이번 논문에서는 고온에서 전기적 특성의 안정성을 보장하기 위한 오믹(ohmic)접촉과 GaAs의 낮은 열전도도에 의한 Self-heating효과에 대해 살표 보았다. 오믹(ohmic)접촉의 경우 표3에서 볼 수 있듯이 에미터, 컬렉터에 n-GaAs경우 Ge/Au/Ni이 670K에서 550시간이상을 안정성을 보이며 베이스에 사용되는 p-GaAs에서 Ti/Pt/Au가 670K에서 1200시간 이상 안정성을 보인다.

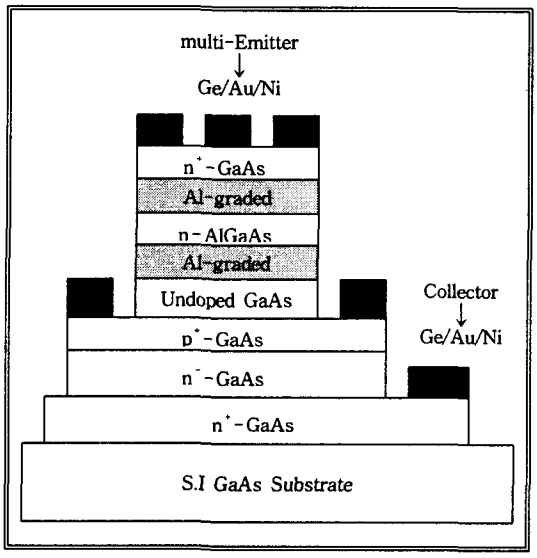

그림 2. 고온HBT의 단면

Fig 2. Cross section of the high-temperature HBT

또한 Self-heating효과와 thermal coupling 영향을 감소 시키기 위해 식(5)에 의한 multi 에미터 설계가 필요하다. 앞으로, 물리적 현상에 바탕을 둔 시뮬레이션 통한 고온에 적절한 HBT 모델제시가 필요하며 이를 위해 HBT설계시 전자와 정공의 제어를 위한 Bandgap-engineering, 과도현상 그리고 doping profile 고려가 필요하다.

따라서 본 연구에서 얻어지는 연구결과는 multi에미터 설계를 포함한 시뮬레이터의 입력데이터로 사용될 것이며 본 결과는 본 연구진이 보유한 해석적인 연구결과와 비교될 것이다.

참고 문헌

[1] Wurfl,J. "Herstellung und Untersuchung zuverlassiger Metallkontake auf GaAs zur Entwicklung von hochtemperaturstalien Halbeiterbauelementen", VDI Verlag, Dusseldorf

[2] Lustig, N., Murakami, M.,Norcott, M. and McGann,K.."Low Au content thermally stable NiGe(Au)W ohmic contacts to n-type GaAs", Appl. Phy. Lett, 58, 19, 2093-2095, 1991.

[3] Murakami, M., Price, W.H., Greiner, J.h., Feder, J.D. and Parks,C.C "Thermally stable ohmic contacts to n-type GaAs. V Metal-Semiconductor field-effect transistos with NiInW ohmic contacts", J. Appl. Phys, 65, 9, 3546-3551, 1989.

[4] Wang, L.C., Li, Y.Z., Kappes, M., Lau, S.S., Hwang, D.M., Schwarz, S.A. and Sands, T., "The Si/Pd(Si, Ge) ohmic contact on n-GaAs", Appl. Phys. Lett, 60, 24, 3016-3018, 1992

[5] Schweeger, G. "Technologie und Charakterisierung des Bipolar Mode Feldeffekt transistors auf GaAs", Verlag Shaker, Aachen, 1992.

[6] Han, C.C., Wang, X.Z., Wang, L.C., Marshall, E.D., Lau, S.S., Schwarz, S.A., Palmstorm, C.J., Harbison, J.P., Florez, L.T., Potemski, R.M., Tischler, M.A. and Kuech, T.F. "Nonspiking ohmic contact to p-GaAs by solid-phase regrowth", J. Appy. Phys, 68, 11, 5714-5781, 1990.

[7] Hallali, P-E, Murakami,M., Price, W.H and Norcott, M.H. "Thermally stable ohmic contacts to p-type GaAs. NiInW and NiIn(Mn)W contact metals, J. Appl. Phys, 70, 12, 7443-7448, 1991.

[8] D.P.Maycock, "Thermal conductivity of silicon, germanium, Ⅲ-Ⅴ compound and Ⅲ-Ⅴ alloys", Solid-State Electron., 10, 161, 1967.

[9] W.B.Joyce, "Thermal resistance of heat sink with temperature-dependent conductivity", Solid-State Electron, 18, 321, 1975.

[10] L. L. Liou, J. L. Ebel, and C. I. Huang, "Thermal effects on the characteristics of AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors using two-dimensional numerical simulation", IEEE Trans.Electron Devices, ED-40, 35, 1993.

[11] J. J. Liou, "Principles and Analysis of AlGaAs/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors, Artech House, Norwood, MA, 1996.

[12] C.-M.S.Ng, P.A.Houston, and D. Davito, "Temperature dependencies of current gains in GaInP/GaAs and AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors", IEEE Trans.Electron Devices, ED-40, 1583, 1993.

[13] William Liu, "Handbook of Ⅲ-Ⅴ Heterojunction Bipolar Transistors.", Wiley & Sons, 52, 1998