

Bottom 컬렉터와 단일 금속층 구조로 설계된 SiGe HBT의 전기적 특성

Electrical Properties of SiGe HBTs designed with Bottom Collector and Single Metal Layer Structures

최아람¹, 최상식¹, 김준식², 윤석남², 김상훈³, 심규환^{1,a}

(A Ram Choi¹, Sang Sik Choi¹, Jun Sik Kim², Seok Nam Yoon², Sang Hoon Kim³, and Kyu Hwan Shim^{1,a})

Abstract

This paper presents the electrical properties of SiGe HBTs designed with bottom collector and single metal layer structure for RF power amplifier. Base layer was formed with graded-SiGe/Si structures and the collector place to the bottom of the device. Bottom collector and single metal layer structures could significantly simplify the fabrication process. We studied about the influence of SiGe base thickness, number of emitter fingers and temperature dependence (< 200 °C) on electrical properties. The feasible application in 1~2 GHz frequency from measured data $BV_{CEO} \sim 10$ V, $f_T \sim 14$ GHz, $\beta \approx 110$, $NF \sim 1$ dB using packaged SiGe HBTs. We will discuss the temperature dependent current flow through the e-b, b-c junctions to understand stability and performance of the device.

Key Words : SiGe HBT, SiGe, RPCVD, NF

1. 서론

세계적으로 SiGe 반도체는 HBT, BiCMOS, HMOS, SFET로 개발되고 있으며 시장규모의 증가가 기대되는 소자이다. 더욱이 빠른 동작특성, 선형성, 고주파잡음, 저주파잡음, 낮은 전류에서의 높은 전류이득으로 인한 특성이 매우 우수하여 수 GHz 대까지의 고주파 고속통신 분야의 RFIC나 광통신용 IC를 제조할 수 있는 이점이 있다[1-3].

그 중 높은 값의 f_T 와 f_{max} 뿐만 아니라 높은 transconductance, 낮은 $1/f$ noise, 높은 파괴전압, 대전류 구동능력, turn-on 전압의 작은 편차, 리소그라피 공정기술에의 적은 의존성등 많은 장점을

갖고 있는 HBT 구조와 Si의 공정기술이 결합하여 SiGe을 베이스 층으로 사용하는 Si/SiGe HBT 개발이 이루어졌다. 특히 SiGe HBT는 Si소자와 비교하여 높은 고주파 및 고속 특성을 갖고 있어 화합물 반도체가 주를 이루고 있는 광통신용 전자소자 분야등 그 범위가 확대되고 있다. Si/SiGe HBT를 이용한 고속 IC의 개발이 ST Micron, IBM, Hitachi 등에서 진행되었고, 현재 RF 통신용 부품으로 활용하기 위한 단순한 구조의 SiGe HBT는 중요한 관심의 대상이다[4,5].

본 논문에서는 단일 금속 배선과 bottom collector 구조의 단순화한 공정기술로 SiGe HBT를 제작하여 DC특성과 Noise 특성을 분석하였다. 특히, 소자제작에 이용된 베이스의 구조와 finger 수에 따른 특성 변화와 더불어 전력증폭기용으로 적합한 소자의 성능을 얻는데 주요 관점을 두었다.

2. 실험

본 실험에서는 비저항이 $3.5 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$, 도핑농도가 1×10^{19} , 도펀트가 Phosphorous인 n형 실리콘 웨이퍼

1. 전북대학교 반도체물성연구소
(전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14)
2. KEC 고주파 소자개발팀
3. ETRI Micro-Electronics Technology Laboratory
a. Corresponding Author : khshim@chonbuk.ac.kr
접수일자 : 2007. 3. 29
1차 심사 : 2007. 7. 16
심사완료 : 2007. 7. 23

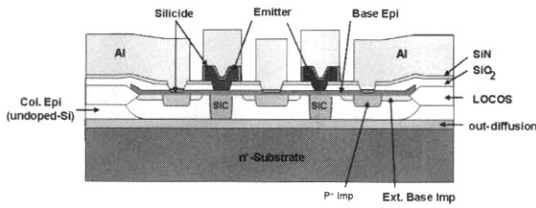


그림 1. SiGe HBT의 구조.
Fig. 1. Structure of SiGe HBT.

표 1. SiGe HBT의 베이스 구조.
Table 1. Base structure of SiGe HBT.

No.	Name of Layer	Doping	X _{Ge}	Thickness
1	Si	undoped	-	35 nm
2	SiGe	undoped	0.02	5 nm
3	SiGe	undoped	0.02-0.05	5 nm
4	p-SiGe	Boron, 5e19 cm ⁻³	0.05-0.13	VSM 1, 3 = 25 nm VSM 5 = 20 nm
5	SiGe	undoped	0.13-0.15	15 nm
6	SiGe	undoped	0.15	5 nm
7	Si	undoped	-	40 nm

(100)에 1000 °C에서 900분간 열산화로 LOCOS 필드를 12,000 Å형성한 후 각각의 영역을 정의해가며 에피박막을 성장하였다. 12,000 Å의 컬렉터 층을 형성하고 Phosphorous를 에너지 140 keV, Dose량 6.0 X 10¹¹ cm⁻²로 이온 주입하여 도핑농도를 맞춰 주었다. 그 위에 두께 900 ~ 950 Å의 SiGe 베이스 층을 형성하였고 Boron을 in-situ로 도핑하였다. 베이스 영역을 기준으로 컬렉터 쪽과 에미터 쪽에 400 Å정도의 씨앗층과 capping layer를 형성시켰다. 에미터는 poly-Si을 이용, Phosphorous을 도핑하고 Al의 단일 금속접합을 형성하였으며, 에피성장은 RPCVD법으로 이루어졌다. 제작된 HBT의 구조는 그림 1과 같으며, 측정되어진 소자의 에미터 폭은 1 μm를 사용하였다.

각 그림에 표시한 SG1, SG3, SG5은 구조에 따른 샘플 분류군으로써 SG1과 SG3는 베이스 영역에 25 nm 두께로 B 을 도핑하였고, Finger 수가 SG1은 4개, SG3는 9개로 서로 다르며, SG5는 베이스 영역에 20 nm 두께로 B 을 도핑하였고, Finger 수는 9개이다. 베이스 구조를 표 1에 비교, 표시하였다.

제작된 HBT를 패키징하여 DC와 f_T, Noise 특성을 분석하였다. 본 연구에서는 HP사의 4156 Parameter Analyzer, Network Analyzer를 IC-CAP과 Cascade사의 SUMMIT11741B-6 probe station을 이용하여 측정하였다.

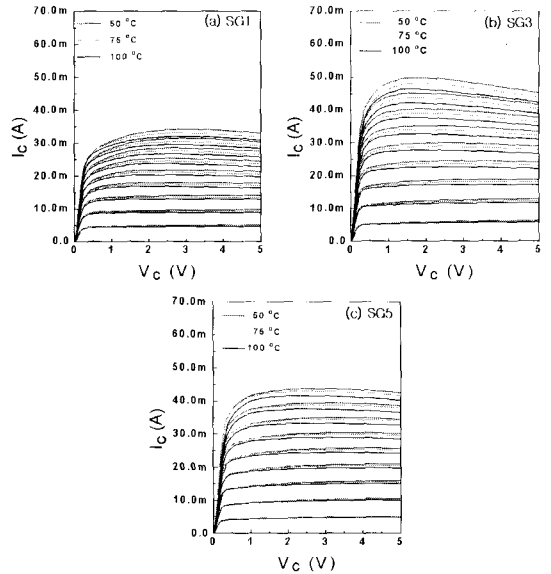


그림 2. 온도에 따른 (a) SG1, (b) SG3, (c) SG5의 Ic-Vc.
Fig. 2. Ic-Vc curves of (a) SG1, (b) SG3, (c) SG5 with different temperatures.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 측정된 Ic-Vc 그래프이며 측정 조건은 컬렉터에 0 ~ 5 V, 50 mV 간격으로 전압을 인가하고, 베이스에 0 ~ 450 μA, 50 μA 간격으로 전류를 인가해주며 컬렉터 전류를 측정하였다. 이때의 에미터 전압은 0 V이다. 포화영역에서 베이스 전류가 250 μA일 때 까지 컬렉터전류가 일정하게 유지되지만 베이스 전류를 250 μA이상, 컬렉터 전압을 4 V 이상 걸어주는 경우 열문제에 의한 전류감소 현상이 보였다. 또한 같은 전압, 전류 조건에서 온도가 증가할수록 컬렉터 전류량이 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 온도가 증가하여 소자 내부 열저항이 증가하기 때문인 것으로 보인다.

그림 3은 Gummel plot 이다. Gummel 측정은 컬렉터와 베이스에 0 V, 에미터에 0 ~ -1 V 전압을 20 mV 간격으로 걸어주고 컬렉터와 베이스 전류를 측정하였다. 베이스 전류는 10 nA 정도의 누설전류를 나타냈고, SG3와 SG5는 에미터 전압이 0.9 V일 때 컬렉터 전류가 100 mA로 포화되는 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 컬렉터 전류에 대한 이득의 특성 곡선으로 각 소자를 비교해보면 SG1 소자는 컬렉터 전류가 10 mA 일 때, SG3는 30 mA, SG2는 20 mA일

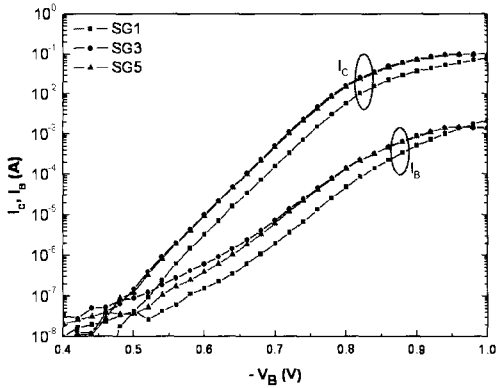


그림 3. SG1, SG3, SG5의 Gummel plots.
Fig. 3. Gummel Plots for SG1, SG3, and SG5.

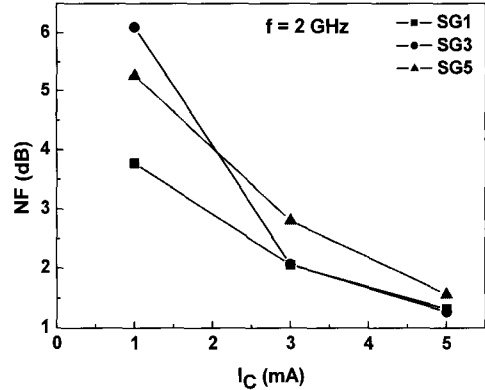


그림 5. 컬렉터 전류에 따른 NF 특성.
Fig. 5. Noise figure (NF) versus I_c characteristics.

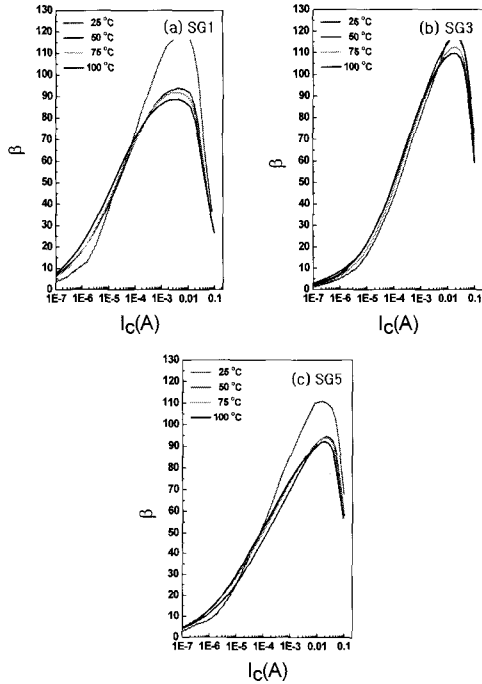


그림 4. 온도와 컬렉터 전류에 따른 이득 특성
(a) SG1, (b) SG3, (c) SG5.
Fig. 4. Gain(B) versus I_c characteristics and temperature of (a) SG1, (b) SG3, (c) SG5.

때 전류 이득 값이 가장 컸다. 이득 특성 또한 온도가 증가함에 따라 감소하는 현상을 볼 수 있었다.

그림 5에는 $f = 2$ GHz 일 때의 컬렉터 전류에 따른 NF 그래프를 나타내었다. NF는 컬렉터 전류가

표 2. BV_{CEO} , V_A , R_E , R_B , Gain, f_T 측정값.

Table 2. Measurement data of BV_{CEO} , V_A , R_E , Gain, and f_T .

구분	측정조건	SG1	SG3	SG5
BV_{CEO}	$I_B = 300 \mu A$	9.4 V	10.8 V	10.6 V
V_A (V)	$V_C = 3$ V, $I_B = 100 \mu A$	30.58 V	22.48 V	29.34 V
R_E	$I_B = -1 \sim 30$ A, $I_C = 0$ A, $V_E = 0$ V	15 ohm	15.5 ohm	11.5 ohm
β_{MAX}	-	119	115	111
f_T	3 V / 15 mA (package after)	13.5 GHz	14.5 GHz	12 GHz

증가할수록 감소하는 경향을 보였고, 그중 SG1 소자의 잡음 특성이 4 dB 이하의 가장 작은 특성을 보였다. 세 종류의 소자 중 SG1과 SG3 소자는 컬렉터 전류가 5 mA 일 때 1.3 dB 수준까지 측정되었으며, 기존의 1 μm SiGe HBT 소자에 비교하여 0.3~0.4 dB 정도 우수한 잡음 특성을 보였다[6]. $I_c = 0 \sim 15$ mA 까지 적정동작 조건이므로 I_c 를 높이면 1 dB 대의 NF를 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 표 2와 같이 BV_{CEO} , V_A , R_E , R_B , β_{MAX} , f_T 의 측정조건과 결과에 대해 요약하였다. 항복전압 BV_{CEO} 는 I_B 가 300 μA 일 때의 V_C 전압을 측정한 값이다. BV_{CEO} 특성은 SG1이 9.4 V로 가장 낮은 전압에서 측정되었고, SG1과 같은 베이스 구조를 갖는 SG3가 10.8 V로 가장 높은 전압에서 측정되었다. 이로 보면 finger의 수가 BV_{CEO} 에 영향을 준 것으로 보인다. 그 이유는 같은 베이스 전류를 흘려준다고 하여도 각 베이스에 전달되는 전류의 양이 finger 수가 적을수록 더 많이 흐르기 때문인 것으로 보인다. V_A 는 V_C 가 3 V, I_B 가 100 μA 일

때의 V_C 의 값을 측정된 값으로 SG1이 30.58 V로 가장 높았다. V_A 는 베이스 컬렉터 사이의 피드백에 관련된 파라미터이기 때문에, 큰 값을 가질수록 트랜지스터는 전기적 특성이 우수해진다. 소자구조가 V_A 에 미치는 영향에 대한 수식을 나타내보면 다음과 같다[7,8].

$$V_A = \frac{q}{C_{JC}} n_i^2(W_B) D_n(W_B) \left(\int_0^{W_B} \frac{N_B(x)}{n_i^2(x) D_n(x)} dx \right) \quad (1)$$

여기에서 C_{JC} 는 컬렉터-베이스 접합 커패시턴스이고, $n_i(W_B)$ 는 컬렉터 쪽에 존재하는 베이스의 neutral한 영역의 끝의 intrinsic carrier 농도, $D_n(W_B)$ 는 전자의 확산계수, $N_B(x)$ 는 베이스 영역의 도핑농도이다. SG1과 SG3를 비교해보면 SG1의 V_A 값이 SG3에 비해 큰 것을 볼 수 있다. 이는 식(1)에 의하여 finger의 수가 증가 할수록 병렬로 연결된 각각의 컬렉터 베이스 접합 커패시턴스 수가 증가하여 실제 V_A 값에 영향을 미치는 C_{JC} 값이 작아지고, V_A 값이 증가하는 것으로 생각된다. 또한 베이스 영역이 두꺼워지면 V_A 값이 더 커진다. 따라서 SG3과 SG5을 비교했을 때 SG5의 V_A 가 더 큰 것은 베이스 도핑영역이 두꺼워져 실제 베이스의 두께가 두꺼워졌기 때문인 것으로 사료되어진다. β_{MAX} 값은 그림 4 결과에서 상온에서 측정된 데이터의 최대값을 나타낸 것으로, SG1이 119로 가장 높은 이득특성을 보였다. f_T 는 $V_{CE} = 3$ V, $I_C = 15$ mA, $f = 2$ GHz 일 때의 차단 주파수를 나타낸 값으로 SG3가 14.5 GHz로 가장 좋은 특성을 보였다. SG3과 SG5를 비교해보면 f_T 의 값이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 베이스 두께가 두꺼워져 전자가 베이스 층을 통과하는데 걸리는 시간이 길어졌기 때문으로 생각된다. 소자구조가 f_T 에 미치는 영향에 대한 수식을 다음에 표시하였다[8].

$$f_T = \frac{1}{2} \left(\frac{kT}{qI_C} (C_{JE} + C_{JC}) + \frac{W_B^2}{\alpha D_n} + \tau_e + \tau_b + \frac{W_C}{2v_{sat}} + R_C C_{JC} \right)^{-1} \quad (2)$$

여기에서 C_{JE} 는 에미터-베이스 접합 커패시턴스이고, W_{JC} 는 컬렉터-베이스 접합 폭, R_C 는 컬렉터 저항을 나타낸다.

이상과 같은 측정분석 결과를 보면 베이스 전류가 낮고, BV_{CEO} 도 10 V대로 높으며, 잡음특성도 우수하여 본 연구에서 제작된 단일급속과 Bottom Collector 구조로 단순화된 구조의 SiGe HBT 소자

가 1-2 GHz 대역의 전력증폭기의 개발에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

소형의 전력증폭기에 응용하기 위하여 극히 단순화 구조의 SiGe HBT를 제작하였으며, DC & RF 특성을 측정 분석하였다. SiGe 베이스층은 Ge 함유량을 점차적으로 변화시키는 다층 구조의 형태로 제작하였고, 단일급속 공정과 bottom collector 구조를 채택하여 제작공정을 단순화하였다. 측정된 DC 특성에서 BV_{CEO} 는 9.4~10.8 V, 최대이득은 111~119를 보였고, 주파수 2 GHz에서 NF는 1.3~1.6 dB인 특성을 나타냈다. 이와 같이 SiGe HBT 소자의 전기적 특성으로부터 1~2 GHz 주파수에 전력증폭기로 적합한 성능을 갖고 있어 적용이 가능함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Y. Shiraki and A. Sakai "Fabrication technology of SiGe hetero-structures and their properties", Surface Science Reports, Vol. 59, p. 153, 2005.
- [2] B. M. Haugerud, M. M. Pratapgarhwal, J. P. Comeau, A. K. Sutton, A. P. Gnana Prakash, J. D. Cressler, P. W. Marshall, C. J. Marshall, R. L. Ladbury, Monir El-Diwany, C. Mitchell, L. Rockett, T. Bach, R. Lawrence, and N. Haddad, "Proton and gamma radiation effects in a new first generation SiGe HBT technology", Solid State Electronics, Vol. 50, p. 181, 2006.
- [3] 이근호, 김남영, 이제영, "정보통신 시스템을 위한 SiGe 트랜지스터 기술 동향", 전기전자재료학회지, 13권, 9호, p. 24, 2000.
- [4] B. Mheen, D. W. Suh, H. S. Kim, S.-Y. Lee, C. W. Park, S. H. Kim, K.-H. Shim, and H.-Y. Kang, "RF performance tradeoffs of SiGe HBT fabricated by reduced pressure chemical vapor deposition", IEEE MTT-S Digest, Vol. 1, p. 413, 2002.
- [5] 심규환, 김상훈, 송영주, 이내용, 임정욱, 강진영, "저압화학증착을 이용한 실리콘 게르마늄 이중접합구조의 에피성장과 소자제작 기술 개

- 발”, 전기전자재료학회논문지, 18권, 4호, p. 285, 2005.
- [6] S. H. Park, T. W. Lee, and M. P. Park, “Technology trend of high-speed electronic devices for terabit optical communication”, E-Trends, Vol. 13, p. 1, 1998.
- [7] J. D. Cressler, “SiGe HBT technology: A new contender for Si-based RF and microwave circuit applications”, IEEE Transaction On Microwave Theory and Techniques, Vol. 46, p. 572, 1998.
- [8] B. K. Mheen, D. W. Suh, S. H. Kim, K.-H. Shim, J.-Y. Kang, and S. C. Hong, “The enhancement of Q factor in RPCVD SiGe varactors by the structural modification of the base collector junction”, IEEE electron device letters, Vol. 24, No. 4, 2003.
- [9] S.-Y. Lee, H.-S. Kim, S.-H. Lee, K.-H. Shim, J.-Y. Kang, and M.-K. Song, “The behavior of Ti silicidation on Si/SiGe/Si base and its effect on resistance and f_{max} in SiGe hetero-junction bipolar transistors”, Journal of Materials Science : Materials in Electronics, Vol. 12, p. 467, 2001.
- [10] W. E. Ansley, J. D. Cressler, and D. M. Richey, “Base-profile optimization for minimum noise figure in advanced UHV/CVD SiGe HBT’s”, IEEE, Transaction On Microwave Theory and Techniques, Vol. 46, p. 653, 1998.
- [11] C. K. Maiti and G. A. Armstrong, Handbook of Applications of Silicon-Germanium Heterostructure Devices, Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 2001.
- [12] H. T. Han and K. Y. Seo, “A study on the fabrication and characteristics of an SiGe HBT”, Major in Semiconductor Device Physics Dept. of Electronic Materials Engineering The Graduate School, Kwangwoon University, A doctoral thesis, 2004.