

정보통신 시스템을 위한 SiGe 트랜지스터 기술 동향



이근호
(정보통신부 전파연구소 공업 연구관)



김남영
(광운대학교 전자공학부 부교수
RFIC 센터 센터장
미션 테크놀로지 중앙 연구소)



이제영
(광운대학교 전자공학과 대학원
RFIC 센터 연구원
미션 테크놀로지 중앙 연구소)

1. 서론

PCS로 대표되는 최근의 무선통신 시장의 급속한 성장은 저 가격, 고성능의 소형 무선 단말기의 개발에 관한 관심을 증폭시키고 있고 인터넷 이용자의 급증은 광대역 정보통신망의 핵심기술인 고성능 초고속 교환기의 신기술 개발을 필요로 하고 있다. 실리콘 게르마늄(SiGe) 트랜지스터는 이러한 기술 개발 요구를 충족시킬 수 있는 정보통신 시스템의 핵심 반도체 기술로 최근에 많은 주목을 받고 있다.

현재까지의 SiGe 트랜지스터 기술의 벤치마크를 살펴보면 이중 접합 쌍극자 트랜지스터(Heterojunction Bipolar Transistor: HBT)의 경우 차단주파수 $f_T = 130 \text{ GHz}^{(1)}$, 최대 진동주파수 $f_{max} = 160 \text{ GHz}^{(2)}$, 7.7 ps의 ECL(Emitter-Coupled-Logic) 게이트 지연시간⁽³⁾으로, 기존의 실리콘 Bi-CMOS 공정을 그대로 이용함으로써 저주파 대역의 아날로그 및 디지털 회로와 고주파 회로를 하나의 칩에 구현하여 고성능을 유지하며 높은 집적도와 저 가격을 유지할 수 있는 무선통신 시스템의 개발을 가능케 한다.

특히 GPS, PCS, IMT-2000, WLAN, Bluetooth, WLL 등 1-5 GHz 대역에 편중되어 있는 현재의 무선통신 서비스는 이 대역에서 갈륨비소(GaAs)에 버금가는 성능을 유지하며 실

리콘과 같은 공정에 의한 대량생산을 통해 저가격을 형성할 수 있는 SiGe 트랜지스터 기술을 가장 상용성이 있는 무선통신 시스템의 핵심 반도체 기술로 자리를 굳히게 하고 있다.

2. SiGe 물성

실리콘과 게르마늄은 같은 다이아몬드 격자구조를 가지므로 일관된 원자배열을 유지하며 한 물질의 층을 다른 물질의 층에 놓을 수 있다. 그러나 게르마늄의 격자상수는 실리콘보다 약 4% 정도가 크므로 실리콘 기판(substrate)에 놓인 게르마늄 층은 격자 불일치에 의하여 접합 면에서 변형력(strain)을 받아 반도체로써 결함을 갖게된다. 이에 대한 해결 방안으로 제시된 것이 SiGe 혼합물을 실리콘 기판에 성장시키는 방법으로 보통 30% 이내의 게르마늄을 사용한다.

게르마늄의 전자 및 정공 이동도는 $1500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 와 $450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 인 실리콘에 비하여 각각 $3900 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 와 $1900 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 로 SiGe의 적절한 혼합물은 실리콘의 두 배에 가까운 이동도를 갖을 수 있다. 게르마늄의 에너지 밴드갭은 0.66 eV(실리콘의 경우 1.12 eV)로, 1%의 게르마늄을 혼합함으로써 약 7.5 meV의 밴드갭을 낮출 수 있으므로 게르마늄의 혼합비를 조정 밴드갭을 변화시킬 수 있는 밴드갭 엔지니어링

을 가능케 한다. 이러한 특성의 SiGe를 전계 효과 트랜지스터의 채널 영역 및 쌍극성 트랜지스터의 베이스 영역에 도입함으로써 기존의 실리콘 트랜지스터보다 향상된 성능의 트랜지스터를 개발할 수 있다.

3. SiGe HBT 공정 기술

초기의 SiGe HBT 공정기술은 에피층을 형성시키기 위하여 전형적인 분자빔 에피택시(Molecular Beam Epitaxy: MBE)와 화학적 증착(Cheical Vapor Deposition: CVD) 방법이 사용되었다. 그러나 이 두 가지 방법은 실리콘기판을 섭씨 1100도 이상으로 가열하여야 하므로 긴장된(strained) SiGe층의 형성 및 많은 결함(defects)을 갖게 된다.

최근에는 이러한 단점을 보완하기 위하여 초진공 화학적 증착(Ultra High Vacuum Chemical Vapor Deposition: UHV/CVD) 방식으로 알려진 저온(550℃) 에피택셜 실리콘 증착 과정을 사용하여 표준 폴리 에미터 방식으로 SiGe 베이스 HBT가 제작되었다.^[9] 이 방식은 저온처리에 의하여 결함을 줄임으로써 대량생성이 용이하고 정확한 불순물 주입에 의한 정교한 소자 제작이 가능한 장점을 지니고 있다.

국내에서는 전자통신연구원에서 상압 화학 기상 증착(Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition: APCVD)를 이용한 SiGe HBT가 제작되었다. 이 소자는 고출력을 위해 LOCOS (Local Oxidation of Silicon) 산화막이 성장된 기판 상에 SiGe 베이스 박막을 성장하였고, 베이스 저항을 줄여 전력 이득을 증가시키기 위해 티타늄 실리사이드로 베이스 전극을 형성하였다.

4. SiGe HBT 소자기술

SiGe HBT는 Si와 SiGe의 에너지 대역간극 차이를 이용하여 이중 접합의 구조를 갖는다. 이중 접합의 에너지 대역 차이가 대부분 전도대에 형성되므로, 에미터에서 베이스로의 전자 주입은 증가하는 반면, 베이스에서 에미터로의 정공 주입이 감소되어 전류 이득이 증가하게 된다. 현재 상용화된 SiGe HBT는 크게 두 가지로 미국의 IBM사^[5]를 주축으로 개발된 표류 전계(drift field) BJT 방식과 독일의 Daimler사^[6]를 주축으로한 III-V HBT형 방식이 있다. 표류 전계 BJT 방식은 베이스 박막내의 게르마늄량을 에미터 접합 경계부터 컬렉터 접합면까지 선형적으로 증가시켜 에너지 대역 간극의 선형적인 변화로 말미암아 베이스로 주입된 전자가 표류 전계에 의해 가속되어 베이스 천이 시간(base transit time)의 감소와 그에 따른 전류이득의 증가도 얻을 수 있다.^[7]

III-V HBT형 방식은 실리콘 BJT의 불순물 농도 분포와는 달리 GaAs HBT와 같이 에미터보다 훨씬 큰 균일한 베이스

불순물 농도에 의한 얇은 베이스를 이용 저항과 천이 시간을 감소시킬 수 있고 베이스 폭 변조 효과(Early effect)를 줄일 수 있다.^[8] 그림 1 (a), (b)에 두 가지 방식의 SiGe HBT를 도식적으로 나타내었다.

5. SiGe BiCMOS 기술

앞서 언급한 바와 같이 SiGe 트랜지스터 기술의 가장 큰 장점으로는 향상된 초고주파, 초고속 특성을 갖는 HBT 공정 기술을 기존의 실리콘 CMOS 공정기술 과 결합 통시스템의 아날로그, 디지털, 그리고 RF 회로를 하나의 칩에 통합된 회로(systems-on-a-chip)로 구현이 가능한 Bi-CMOS 기술에 있다. 상용화에 가장 앞선 IBM사의 Bi-CMOS 기술을 살펴보면 200 mm (8 inch) 웨이퍼를 기반으로 $f_T = 50$, $f_{max} = 70$ GHz의 SiGe HBT 기술을 ASIC 가능한 CMOS 기술과 표준 CMOS 공정보다는 4단계, 표준 Bi-CMOS 공정보다는 한 단계 더 부가적 공정을 통하여 결합할 수 있다.^[9] 그림 2는 IBM사의 Bi-CMOS 기술을 보여주고 있다.^[10] 최근의 주요 SiGe Bi-CMOS 기술을 살펴보면 모토롤라의 경우 베이스의 도핑 안정성을 증가시킬 수 있도록 탄소 경계층을 이용하는 무 에피층 SiGe:C HBT를 0.25- μ m CMOS와 결합하였고^[11] 루슨트/벨 연구소에서는 SiGe HBT를 0.25- μ m CMOS 공정에 단지 4단계 더 부가적인 리소그래피 공정을 이용하여 결합 공정 단가를 대폭적으로 줄일 수 있는 기술을 개발하였다.^[12]

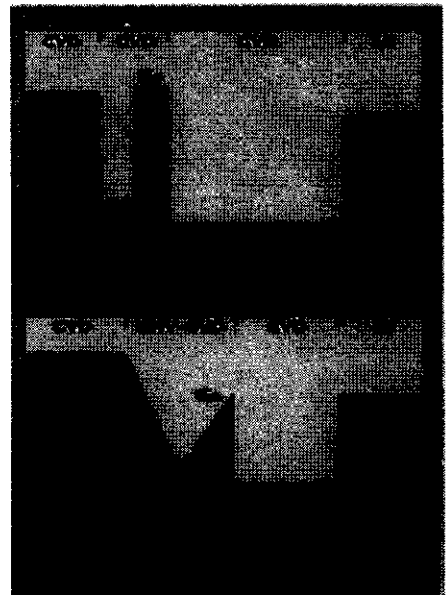


그림 1. 두 가지 방식의 SiGe HBT
(a) III-V HBT 방식 (b) 표류전계 BJT 방식

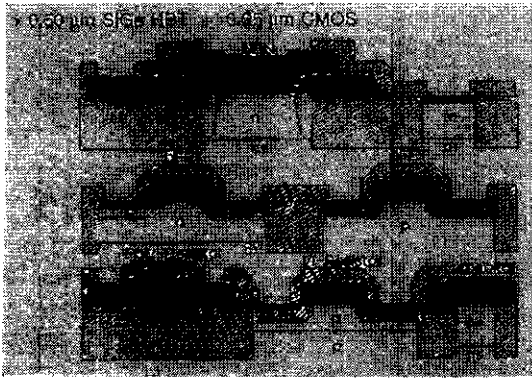


그림 2. IBM사의 Bi-CMOS 기술

6. SiGe HBT RF 특성

SiGe HBT는 실리콘 BJT에 비하여 낮은 전류 밀도에서 높은 전류이득(2 GHz 에서 $\beta > 100$) 및 높은 차단주파수를 갖기 때문에 고주파 저 전력소비의 회로 설계가 가능하다. 또한, 높은 전류 이득에 의한 입력 저항의 향상 및 낮은 잡음지수(2 GHz에서 NF < 0.8 dB)는 저 잡음 증폭기의 제작을 용이하게 한다. 낮은 1/f 코너주파수(약 370 Hz)는 낮은 위상 잡음을 갖는 VCO (Voltage Controlled Oscillator)의 제작을 가능케 한다. 높은 베이스 도핑 농도에 기인한 실리콘 보다 높은 Early 전압은 결과적으로 높은 출력저항을 갖게하여 안정된 전력 증폭기의 설계를 가능케 한다.

현재 상용화된 RFIC용 SiGe HBT는 컬렉터 영역을 선택적으로 도핑 주입(selectively implanted collector: SIC)함으로써 낮은 항복(breakdown) 전압($BV_{CEO} < 3V$)과 높은 차단 주파수($f_T > 50$ GHz)를 갖는 저 전력소비 소자와 SIC를 사용하지 않는 높은 항복 전압($BV_{CEO} > 6V$)과 낮은 차단주파수($f_T < 30$ GHz)를 갖는 전력용 소자로 분류된다.⁽¹³⁾ IC용 고 밀도 소자 기술 외에도 고출력 실리콘 BJT와 같이 고출력 RF SiGe HBT 소자도 개발되어 단일 소자로 2 GHz에서 10W의 출력을 낼 수 있는 상용 전력 트랜지스터도 개발되었다.⁽¹⁴⁾

위에서 언급한 능동소자 개발과 더불어 Si/SiGe MMIC를 위한 수동소자 라이브러리도 개발되었는데, 1750, 400, 110, 4.5 Ω /sq 폴리 저항, 2 GHz에서 7의 Q값을 갖는 4nH 나선 인덕터, 0.7 pF/ μ^2 의 MIM(Metal Insulator Metal) 커패시터 등이 있다.⁽¹⁵⁾

7. SiGe HBT의 IC 응용

앞서 언급한 바와 같이 SiGe 트랜지스터 기술의 가장 중요한 요소는 정보통신 시스템의 하드웨어, 즉 디지털, 아날로그,

RF회로를 모두 구현 할 수 있다는 것이다. 현재까지의 IC 응용을 살펴보면 20 Gbps 데이터 전송이 가능한 광통신 전송 시스템, 1 GHz 12 bit 디지털-아날로그 변환기, 1.9 GHz에서 13 dB 이득, 1.5 dB 잡음지수, 25 dBm의 OIP3(Output 3d order Intermodulation Product)를 갖는 저잡음 증폭기(LNA), 1.9 GHz에서 25 dB 이득, 47% PAE(Power Added Efficiency), 28 dBm 출력의 전력증폭기, 그 외 다양한 주파수 대역의 믹서, VCO 및 무선통신 송수신기 RF종단 전체가 개발되었다.⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾

8. SiGe 트랜지스터 기술의 상용화 및 시장전망

전 세계 반도체 시장은 99년 기준 3,000 억달러로 RF 응용 부분만 보면 3% 이내이고 그중 50% 이상을 GaAs/InP 트랜지스터가 차지하고 있다. 2003년에는 전세계 반도체 시장이 5,000 억달러 이상 될 것으로 예상되며 RF 응용 부분도 전체의 5% 이상 될 것으로 예상된다. 99년 기준 200 억달러 이상 되는 RFIC 시장은 앞으로 다양한 정보통신 서비스에 의하여 큰 팽창이 예상되며 그중에 고출력 및 극 초고주파 응용 등 일부 특정부분을 제외하면 대부분을 Si/SiGe 트랜지스터가 차지할 것으로 예상된다.

현재 IBM은 SiGe 트랜지스터의 가장 큰 Foundry 서비스를 제공하고 있으며 Nortel Technology, National Semiconductor 등과 제휴하여 소자기술 개발을 활발하게 펼치고 있으며 독일의 Temic사도 상용 Foundry 서비스를 제공하고 있다. 그 외 일본의 Hitachi 사, 한국의 에이에스비사와 대우 전자등도 자체 공정기술을 갖고 상용 파운드리 서비스를 준비하고 있다. 미국의 Stanford Microdevice 및 M/A Com사는 LNA 및 전력증폭기용 SiGe HBT 트랜지스터를 생산하고 있고 그의 Intersil/Harris, Maxim, Comm Quest, RF Micro Devices, Philsar Semiconductor, SiGe Microsystem, Infineon사 등도 WLAN, PCS, Bluetooth등에 쓰일 수 있는 다양한 IC 제품을 선보이고 있다.⁽¹⁹⁾

9. 결 론

80년대 중반 IBM사를 중심으로 연구 개발되기 시작한 SiGe 트랜지스터 기술은 초기의 많은 회의론에도 불구하고 이제는 정보통신 반도체의 가장 경쟁력 있는 기술로 자리잡고 있다. SiGe 혼합물물 베이스에 주입 밴드갭 엔지니어링에 의하여 기존의 실리콘 트랜지스터에 비하여 월등한 성능과 표준 실리콘 공정에 따른 200 mm의 웨이퍼를 이용한 대량생산으로 SiGe 트랜지스터는 많은 통신 응용분야에서 가격-성능의 최적합 trade-off이 가능케 한다. 높은 안정성과 신뢰도를 갖는 SiGe 공정기술은 많은 성능시험과 상용화된 제품의 고성

능에 의하여 그 기술을 인정 받고 있다.

향후 100 GHz 이상의 차단주파수를 갖는 SiGe HBT 기술의 개발도 가능할 것이므로 10 GHz 이상의 대역에서도 많은 응용이 기대되며 향상된 CMOS기술과 결합된 저 전력 Bi-CMOS 기술에 의하여 하나의 칩에 통신시스템 전체를 구현할 수 있으리라 기대된다.

참고 문헌

- [1] K. Oda, E. Ohue, M. Tanabe, H. Shimamoto, T. Onai and K. Washio, "130 GHz fT SiGe HBT Technology," IEEE IEDM Tech. Dig., pp. 791~794, 1997.
- [2] A. Schuppen, U. Erben, A. Gruhle and U. Konig, "Enhanced SiGe Heterojunction Bipolar Transistors," IEEE IEDM Tech. Dig., pp. 743~746, 1995.
- [3] E. Ohue, K. Oda, R. Hayami and K. Washio, "7.7-ps CML Using Selective epitaxial SiGe" IEEE BCTM Tech. Dig., pp. 97~100, 1998.
- [4] B. S. Meyerson, "Low-temperature Silicon Epitaxy by Ultrahigh Vacuum/Chemical Vapor Deposition," Applied Physics Letters, Vol. 48, pp. 797~799, 1986.
- [5] G. L. Patton, J. H. Comfort, B. S. Meyerson, E. F. Crabbe, G. J. Scilla, E. Fresart, J. M. C. Sotrk, J. Y.-C. SUN, D. L. Haramé and J. N. Burghartz, "75 GHz fT SiGe-Base Heterojunction Bipolar Transistors," IEEE Electron Device Letters, Vol. 11, pp. 171~173, 1990.
- [6] E. Kasper, A. Gruhle and H. Kibbel, "High Speed SiGe-HBT with Very Low Base Sheet Resistivity," IEEE IEDM Tech. Dig., pp. 79~81, 1993.
- [7] J. D. Cressler, "SiGe HBT Technology: A New Contender for Si-Based RF and Microwave Circuit Applications," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol. 46, pp. 572~589, 1998.
- [8] A. Schuppen, "SiGe-HBTs for Mobile Communications," Solid-State Electronics, Vol. 43, pp. 1373~1381, 1999.
- [9] D. C. Ahlgren, N. King, G. Freeman, R. Groves and S. Subbanna, "SiGe BiCMOS Technology for RF Device and Design Applications," IEEE Radio and Wireless Conf. Proc., W3.2, 1999.
- [10] D. L. Haramé, E.F. Crabbe, J. D. Cressler, J. H. Comfort, J. Y.-C. Sun, S. R. Stiffler, E. Kobeda, J. N. Burghartz, M. M. Gilbert, J. Malinowski, and A. J. Dally, "A High-performance Epitaxial SiGe-base ECL BiCMOS technology," IEEE IEDM Tech. Dig., pp. 19~22, 1992.
- [11] K. E. Ehwald et al., "Modular Integration of High-Performance SiGe-C HBTs in a Deep Submicron, Epi-Free CMOS Process," IEEE IEDM Tech. Dig., pp. 561~564, 1999.
- [12] C. A. King et al., "Very Low Cost Graded SiGe Base Bipolar Transistors for a High Performance Modular BiCMOS Process," IEEE IEDM Tech. Dig., pp. 565~568, 1999.
- [13] D. Barlas, G. Henderson, X. Zhang, M. Bopp and A. Schuppen, "SiGe Transistor Technology for RF Applications," Microwave Journal, June, pp. 22~39, 1999.
- [14] X. Zhang, G. Henderson and C. Souchuns, "An Accurate Physics-Based Large-Signal Model for High Power SiGe BJT's," IEEE MTT-S Digest, pp. 435~438, 1999.
- [15] J. N. Burghartz, M. Soyuer, K. A. Jenkins, M. M. Dolan, K. J. Stein, J. Malinowski and D. L. Haramé, "Integrated RF Components in a SiGe Bipolar Technology," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 32, pp. 1440~1445, 1997.
- [16] R. Gotzfried, F. Beisswanger and S. Gerlach, "Design of RF Integrated Circuits Using SiGe Bipolar Technology," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 33, pp. 1417~1422, 1998.
- [17] L. E. Larson and M. J. Delaney, "Applications of Si/SiGe Technology for High-Speed Communications Systems" IEEE MTT-S Digest, pp. 1077~1080, 1999.
- [18] M. A. Copeland, S. P. Voinigescu, D. Marchesan, P. Popescu and N. C. Maliepaard, "5 GHz SiGe Monolithic Radio Transceiver with Tunable Filtering," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol. 48, pp. 170~181, 2000.
- [19] J. Browne, "SiGe Technology Makes Practical Advances," Microwave & RF, October, pp. 121~126, 1999.

성명 : 이 근 호

1986년 연세대학교 물리학과 졸업 (학사)
1988년 연세대학교 물리학과 대학원 졸업 (석사)
1995년 미국 존스 홉킨스 대학 물리학과 PH.D
1995년 미국 존스 홉킨스 대학 물리학과 연구원
1996년 한국 과학재단 Post Doc. (서울대학교)
1996~1998년 정보통신부 전파연구소 이천분소 기술과장
1999~2000년 미국 매사추세츠 대학교, 조지아텍, 어번대
학교 전자공학과 객원 연구원
~ 현재 정보통신부 전파연구소 공업 연구관

* E-mail: ghlee@cc.rrl.go.kr

성명 : 김 남 영

1987년 광운대학교 전자공학과 졸업 (학사)
1991년 뉴욕 주립대 전자공학과 졸업 (석사)
1994년 뉴욕 주립대 전자공학과 졸업 (Ph. D)
1994년 뉴욕 주립대 전자공학과 연구원
~ 현재 광운대학교 RF Research and Education Center
센터장, 광운대학교 전자공학부 부교수

성명 : 이 제 영

1999년 광운대학교 전자공학과 졸업 (학사)
2000년 미국 어번대학교 전자공학과 교환 연구원
2000년 미션 테크노 중앙 연구소 연구원
~ 현재 광운대학교 전자공학과 석사과정 재학중