

## 밀리미터파 SiGe HBT 소자 기술



김남영

광운대학교 전자공학부

RFIC/MMIC 교육 및 연구센터

E-mail : nykim@daisy.kwangwoon.ac.kr

### 1. 서 론

무선 통신 시스템에 사용되는 반도체 기술은 실리콘(Si) 기반 공정의 고집적 기술과 갈륨비소(GaAs) 기반 공정의 초고주파 고성능 기술로 분리되어 발전 되어왔다.

현재까지 무선통신 시스템의 초고주파 분야에는 GaAs 소재를 주로 사용한다. GaAs는 Si에 비하여 반부도체 특성이 좋으며, 빠른 전자 이동도를 이용하여 높은 주파수에 사용된다. 더우기 GaAs 기판의 에너지 갭은 Si보다 4차수만큼이나 크므로 기생 캐패시턴스를 극적으로 줄여 속도 잠재력을 극대화할 수 있다.

GaAs 공정 기술은 위에서 언급한 여러 장점을 갖고 있는 반면, 제조 공정의 어려움 및 고가격화 등과 같은 여러 가지 단점을 갖고 있다. 이러한 단점에도 불구하고 현재 널리 사용되고 있는 이유는 GaAs 공정이 주파수 성능이 상당히 높기 때문에 성능이 비용 문제보다 중요한 군사 응용 분야에서 사용되기 시작하여 무선통신분야의 상용화로 확대되었다.

이러한 상황에서, 80년대 후반부터 연구 개발을 시작한 Si/SiGe 공정기술[1]는 차세대 이동 무선 장치들의 통합된 반도체 공정을 가능케하며, 비용을 효율

적으로 절감시키는 기술로서, 최근 새로운 정보통신 서비스의 발달과 더불어 저가격의 초고주파 소자에 대한 요구로 인하여 그 활용영역을 넓혀가고 있다. Si/SiGe 공정기술은 기존의 실리콘 공정을 그대로 이용할 뿐만 아니라 갈륨비소보다 훨씬 저렴하고 200mm에 달하는 웨이퍼를 사용한 대량생산은 생산 효율의 극대화를 이룰 수 있다. 또한 실리콘의 기본적인 공정 안정성과 호환성은 Si CMOS 및 BiCMOS와 같은 성능 향상과 더불어 높은 집적도와 저가격화를 구축할 수 있다. 특히, 에너지 밴드갭을 이용한 이종 접합 구조를 이용하여 보다 저렴한 가격으로 고성능의 초고주파 소자로 사용될 Si/SiGe 이종 접합 쌍극자 트랜지스터(Heterojunction Bipolar Transistor, HBT)에 대한 연구가 더욱 활성화 되었으며, 현재 상용화되고 있는 상황이다.

최근에는 110GHz대의 차단 주파수( $f_T$ )를 갖는 초고속 Si/SiGe HBT소자[2][3]뿐 아니라, 20Gbps급 광수신기용 IC[4] 및 40GHz급 VCO[5]등의 IC제작이 보고되고 있다. 1~2 GHz대역의 응용분야에서는 이미 칩들이 상용화되었다.

### 2. Si/SiGe 재료 특성

GaAs 소재의 단점으로는 높은 온도를 필요로 하

는 공정과 산화 및 As의 취급상의 위험성, 그리고 대구경 고순도 웨이퍼 크기의 제약 등을 들 수 있다. 또한 상온에서 단지 0.5W/cmK의 열 전도도를 갖으며, 재결합율이 높고, 벌크 상태에서 발생하는 ns 정도의 캐리어 life time은 GaAs의 단점으로 지적되고 있다.

SiGe은 현재의 Si 공정에 비하여 근본적으로 보다 속도가 빠르다. Si 기판을 Ge으로 도핑(doping)시켜서 만드는 SiGe은 65GHz이상의 속도로 동작하는 SiGeHBT소자들을 생산할 수 있지만, Si은 대부분이 15~20GHz 정도에 그칠 뿐이다. SiGe 공정은 Si 공정에 한가지 공정 단계를 더 사용할 뿐이므로 비용절감을 가져다 줄 수 있다.

실리콘(Si)과 게르마늄(Ge)은 모두 4족으로써 다이아몬드 격자구조를 갖으며 실온에서 실리콘의 격자 상수는 5.431Å, 그리고 게르마늄은 5.657Å로 4.17%의 미결합격자율을 보이며 온도에 따라서 격자크기가 약간씩 증가한다. 그림 1은 여러 반도체의 격자 상수에 따른 에너지 대역간극을 보여주고 있다.

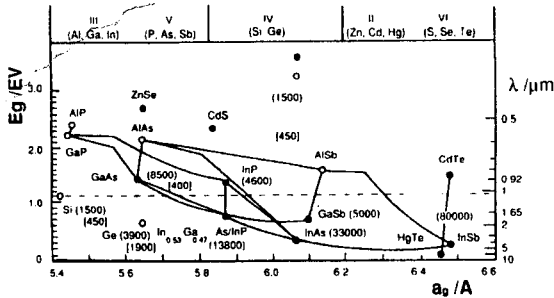


그림 1. 여러 반도체의 격자 상수에 따른 에너지 대역간극

SiGe은 그림 2에서 보듯이 결합이 이루어 질 때 생기는 현상을 두가지로 구분하여 보여주고 있다. 그림 3(c)에서와 같이 접합면에서 strain이 발생하게 되고, 이는 격자 불일치에 기인한다. 격자 불일치는 critical thickness에 영향을 미치게 되고, 그림 3(b)와 같이 Si 위에 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>층의 pseudomorphic 성장은 그림 3에서의 열동적 평형 상태에서 위한 안정영역에서만 가능하다. 또한 strain은 전기적 특성과 결합시 대역간극에 영향을 미치게 된다.

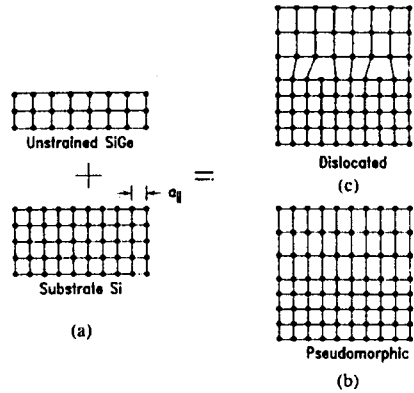


그림 2. Pseudomorphic 성장의 2차원 표현

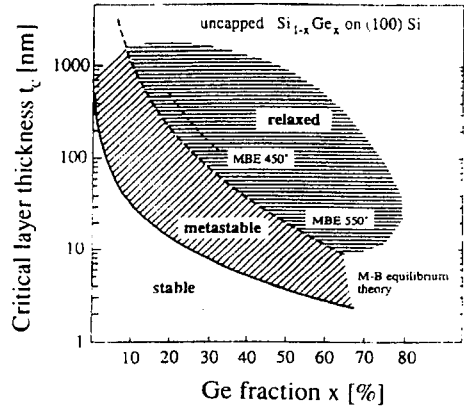


그림 3. 게르마늄 성분비에 따른 층의 두께

### 3. Si/SiGe HBT 소자

Si/SiGe HBT는 Si과 SiGe의 에너지 대역간극 차이를 이용하여 이중 접합의 구조를 갖는다. 먼저 실리콘 기판상 위에 SiGe 단결정을 성장시키면 Si과 Ge의 격자상수의 차이로 인해 SiGe은 strain을 갖는 pseudomorphic 구조로 성장되며, Ge량이 증가함에 따라 SiGe의 에너지 대역 간극은 감소하게 된다. Si/SiGe 이중접합의 에너지 대역 차이( $\Delta E_C$ )는 0.02eV로 거의 변화가 없고, 대부분의 에너지 간격차이( $\Delta E_g$ )가 가전자대에 형성되므로, 에미터에서 베이스로의 전자 주입은 증가하는 반면, 베이스에서 에미터로의 정공 주입이 감소되어 전류이득이 증가하게 된다. 또한 베이스막막내의 Ge량을 에미터 접합 경계부터 컬렉터 접합면까지 선형적으로 증가시키면 에너지

대역 간극의 선형적인 변화로 말미암아 베이스로 주입된 전자가 drift field에 의해 가속되어 베이스 천이 시간(base transit time)의 감소와 그에 따른 전류이득의 증가도 얻을 수 있다[7]. 따라서, 주어진 전류이득에서 Si 단일접합트랜지스터보다 고농도의 얇은 베이스로 저항과 천이 시간을 감소시킬 수 있고 베이스 폭 변조 효과(Early effect)를 줄일 수 있어 고주파용 아날로그 회로 제작에 적합한 특성을 얻을 수 있다[8].

Si/SiGe HBT는 처음 molecular-beam epitaxy(MBE) 장치를 이용하여 처음 제작되었다[9]. 모든 공정이 이러한 기술로 이루어졌기 때문에 고온에 노출시키는 과정은 피할 수 있어 pseudomorphic 층의 열적 안정도에는 중요한 장점을 보였으나, 에미터나 베이스에 원하는 고농도의 도핑이 어려워, Si MBE 기술은 전류이득이나 베이스의 저항에 있어 제약을 갖고 있었다.

그러나, 이러한 제약을 극복하기 위해 진공상태를 계속 유지하면서 콜렉터, 베이스, 그리고 에미터 층들을 에피택셜적으로 성장시켰다[10]. Sb와 Ga는 pre-build-up, flash-off, 그리고 2차 주입에 의한 도핑(Doping by Secondary Implantation : DSI) 기술로 각각 n-과 p-형 불순물로 사용되었다. Ge는 100-nm SiGe 베이스 내에서 균일한 분포를 갖으며 공핍층 영역에서는 그림 5에서 보는 바와 같이 0부터 12%로 감소하고 있다. SiGe 베이스 층은 strain의 이완을 막기 위해 저온 처리과정이 사용되었다. 베이스 접촉 저항을 향상시키기 위해 낮은 에너지 갈륨 주입과 건식 식각으로 mesa 구조를 정의하였다. 그림 4와 그림 5은 이렇게 제작된 Si/SiGe HBT의 SIMS 포로파일과 단면도를 보여주고 있다.

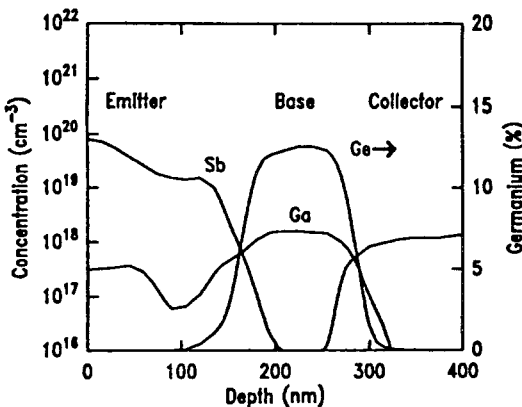


그림 4. 100-nm SiGe 베이스 HBT의 이차 이온 질량분석기 포로파일

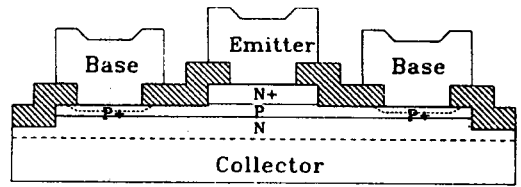


그림 5. Mesa 정의된 트랜지스터의 단면도

최근들어 Si/SiGe HBT의 이상적인 접합 특성을 얻기 위해 제한 반응 처리(Limited Reaction Processing : LRP)로 알려진 화학 기상 증착 (Chemical Vapor Deposition : CVD) 기술이 이용되었다. 그림 6은 이러한 방법에 의해 제작된 도핑 프로파일과 소자의 최종 단면도이다. 콜렉터, 베이스, 그리고 에미터 층들은 한 번의 단일 성장 공정에 의해 형성되고 그 다음 고온 청결 공정을 거친 후, strain 이완을 막기 위해 저온 처리 과정이 사용되었다. 특히 이 실험에서는 640°C의 SiGe 베이스 성장 후, 850°C에서 5.5분 동안의 에미터 성장이 가장 큰 열적 노출이었다.

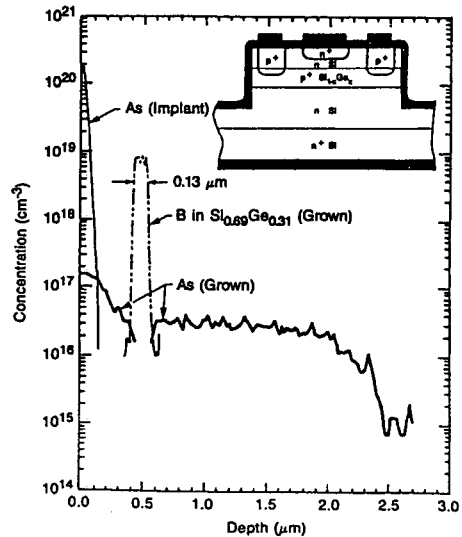


그림 6. LRP에 의해 형성된 130-nm Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> base n-p-n HBT의 도핑 프로파일과 단면도

가장 최근에 이루어진 방식으로는 ultrahigh-vacuum chemical vapor deposition 방식으로

알려진 저온(550℃) 에피텍셀 실리콘 증착 과정을 사용하여 표준 폴리 에미터 방식으로 Si와 경사진 SiGe 베이스 HBT가 제작되었다. 이 방식에 의해 우수한 성능의 Si/SiGe 접합을 형성하였고, SiGe 트랜지스터의 장점을 폴리 에미터 공정과 접목한 점은 특이하다 하겠다. 그림 7과 그림 8는 위의 방식에 의해 제작된 폴리 에미터 쌍극자 트랜지스터의 프로파일과 구조를 보여주고 있다.

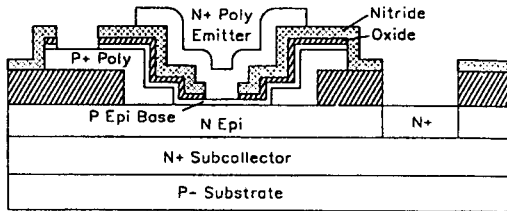


그림 7. UHV/CVD 저온 에피텍시에 의해 형성된 SiGe 베이스 트랜지스터의 SIMS 프로파일

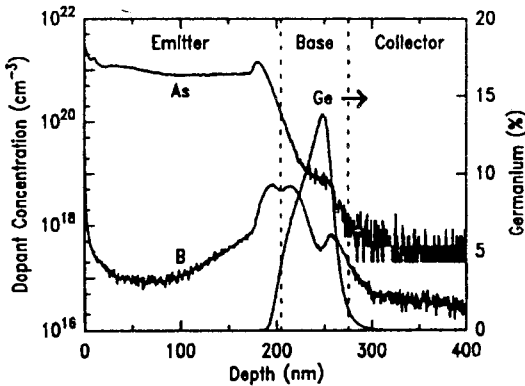


그림 8. SiGe 베이스를 지닌 비자기정렬 트랜지스터의 단면도

국내에서는 상압 화학 기상 증착기(Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition : APCVD)를 이용한 Si/SiGe HBT가 연구, 제작되었다. 이 소자는 고출력을 위해 LOCO(LOCAL Oxidation of Silicon) 산화막이 성장된 기관 상에 SiGe 베이스 박막을 성장하였고, 베이스 저항을 줄여 전력 이득을 증가시키기 위해 티타늄 실리사이드로 베이스 전극을 형성하였다[그림 9]. 국내의 전자통신연구원에서 개발한 SiGe HBT소자의 단면도 및

실제 사진을 그림 10과 그림 11에 각각 나타내었다.

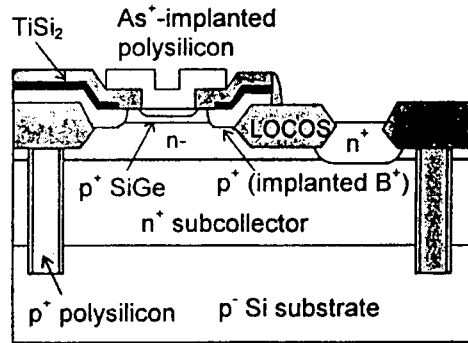


그림 9. SiGe HBT 소자 단면도

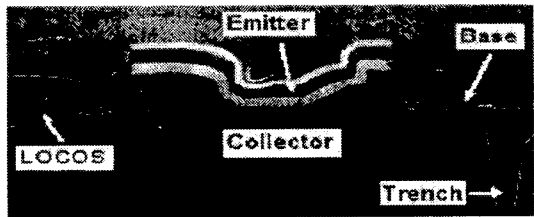


그림 10. 제작된 SiGe HBT 소자 단면도



그림 11. SiGe HBT 소자의 사진

#### 4. 밀리미터파 응용

실리콘을 이용한 초고주파 집적회로는 1965년에 처음 제안되었다. 이러한 집적 기술은 RCA 그룹에 의해 다시 실리콘 밀리미터 웨이브 집적회로 기술로 불리며 다시 연구되었다. 새로운 SiGe 공정 기술들이 최근에는 IBM사의 Advanced Semiconductor Technology Center에서 개발되어 200mm 웨이퍼 생산 능력을 인정받았다. 현재 SiGe 공정기술을 보유하고 있는 회사로는 국외에 IBM, TEMIC,

NEC, Hitachi, SeGe Micro system사 등이 있으며, 국내에는 전자통신연구원에서 창업한 ASB사를 들 수 있다.

많은 초고주파용 소자가 현재 SiGe으로 제작되고 있으며, 최근 차단 주파수가 110GHz, 그리고 70GHz이상의 최대 진동 주파수를 갖는 SiGe HBT도 제작되었다. 베이스 폭은 높은 차단 주파수를 결정하는데 있어서 가장 중요한 요소이다. 따라서, 낮은 베이스 저항과 높은 차단 주파수의 상호 보완점을 찾는 것이 실리콘 초조주파 집적회로의 관건이라 하겠다. 그림 12는 SiGe HBT에서의 차단 주파수와 최대 진동 주파수와의 관계를 보여주고 있다.

높은 저항을 이용한 Si 기판위에 hybrid와 monolithic 응용을 위한 24GHz DRO가 설계되었다[그림 13]. 유전체 공진기는 트랜지스터의 베이스에, 출력은 콜렉터에 위치하고, 직렬 제한 회로로 구성되었다. 트랜지스터의 소신호 S-파라미터를 이용하여 마이크로 스트립 회로를 구성하였고, 선형 CAD툴을 이용하여 불연속성을 분석하였다. Hybrid 형태의 발진기는 150  $\mu\text{m}$  두께의 기판위에, 0.3mm $\times$ 0.5mm HBT 칩을 사용되었다. 바이어스 네트워크에는 75  $\Omega$   $\lambda/4$ 라인과 라디알 스테브가 사용되었다. 비유전율이 36인 barium-titanate puck형태 유전체 공진기(직경 2.7 mm, 높이 1.2 mm)가 사용되었다.

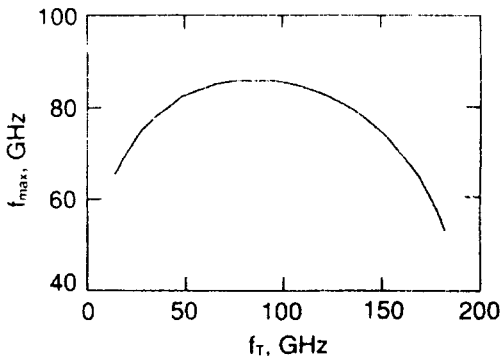


그림 12. Si/SiGe HBT의 천이 주파수에 따른 최대 진동 주파수

그림 14는 GSM 3단 전력증폭기를 보여준다. 40dB의 이득과 2.4V에서 5V의 인가전압에서 50%의 PAE의 특성을 갖고 있다[12]. 그림 15는 디지털 무선 전송시스템(DECT)의 전단부 송수신 칩 셋

을 SiGe 기술로 제작한 것을 나타낸다[13].

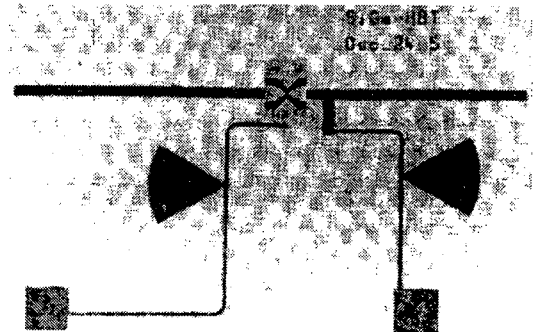


그림 13. 24 GHz Si/SiGe HBT DRO의 레이아웃

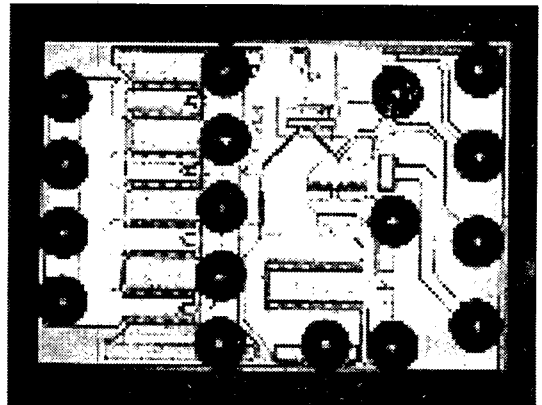


그림 14. GSM용 3단 전력증폭기

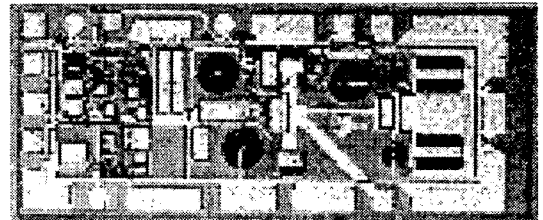


그림 15. DECT의 송수신 SiGe 칩

이 밖에도 20Gbps급 이상의 광수신기용 IC 및 40GHz 급 VCO등의 IC 제작이 보고되고 있다. 특히, SiGe HBT 소자는 잡음 특성, 선형성 및 전력 효율이 우수하여 저잡음 증폭기, VCO 및 전력 증폭기 등 RF 소자 및 광소자에 대한 연구 및 상용화가 활

성화되고 있다.

## 5. 결 론

Si/SiGe 이중 접합 구조와 이러한 구조를 이용한 HBT 소자의 일반적인 이론과 방법에 대하여 설명하였다. 특히, Si/SiGe HBT 소자는 잡음 특성, 선형성 및 전력 효율이 우수하여 저잡음 증폭기, VCO 및 전력 증폭기등의 RF 소자 및 MMIC의 사용이 기대된다. 현재까지 고집적도 MMIC용 소자는 화합물 반도체를 사용하고 있지만, 저가의 대량 생산을 위하여 SiGe을 이용한 MMIC의 소자, 회로, 공정 기술이 계속이 계속적으로 발전할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. S. Iyer, G. L. Patton, et al., IEEE IEDM Tech. Dig., pp. 874-876, Dec., 1987.
- [2] A. Schüen, A. Gruhle et al., Electronics Letters, vol. 30, pp. 1187-1188, 1994.
- [3] E. Crabbé B. Meyerson et al., DRC, I A-3, 1993.
- [4] M. Soda, H. Tezuka, et al., DCTM, pp. 82-88, 1995.
- [5] A. Gruhle, A. Schüen. et al., IEEE IEDM Tech. Dig., pp. 725-728, 1995.
- [6] J.-F. Luy, K. M. Strohm, H.-E. Sasse, A. Schüen, M. Wollitzer, A. Gruhle, F. A. Schäfler, U. Guettich, and A. Klaaßen, "Si/SiGe MMICs", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol. 43, no. 4, pp. 705-714, April, 1995.
- [7] G. L. Patton, J. H. Comfort, B. S. Meyer-son, 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  $f_T$  SiGe-Base Heterojunction Bipolar Transistors", IEEE Electron Device Letters, vol. 11, no. 4, pp. 171-173, April, 1990.
- [8] E. J. Prinz and J. C. Sturm, "Analytical Modeling of current Gain Early Voltage Products in Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si Heterojunction Bipolar Transistors", IEEE IEDM Tech. Dig., pp. 853-856, Dec., 1991.
- [9] T. Tatsumi, H. Hirayama, and N. Aizaki, "Si/Ge<sub>0.3</sub>Si<sub>0.7</sub>/Si heterojunction bipolar transistor made with Si molecular beam epitaxy", Appl. Phys. Lett., vol. 52, pp. 895-897, Mar. 1988.
- [10] G. L. Patton, S. S. Iyer, S. L. Delage, S. Tiwari, and J. M. C. Stork, "Silicon-germanium-base heterojunction bipolar transistors by molecular beam epitaxy", IEEE Electron Device Lett., vol. 9, pp. 165-167, Apr. 1988.
- [11] T. H. Han, S. M. Lee, D. H. Cho, S. H. Lee, B. R. Ryum, and J. Y. Kang, "Fabrication and Characteristics of the SiGe Base Heterojunction Bipolar Transistors using APCVD", vol. 31, no. 11, Jan. 1994. pp. 124-130.
- [12] A. Schpen, H. Dietrich, U. Seiler and H. von der Ropp, "SiGe RF Technology for Mobile Communication Systems", Microwave Engineering Europe, June 1998.
- [13] M. Bopp et al., "DECT Transceiver Chip Set Using SiGe Technology", ISSCC 9 Digest, Vol. 42, Session 4, Paper MP4.2.