

主 題

SiGe RFIC 기술동향

정보통신부 전파연구소 이근호
 광운대학교 김남영, 한상국, 이제영

차 례

- I. 서 론
- II. SiGe HBT RF 특성
- III. SiGe RFIC
- IV. SiGe BICMOS 기술
- V. 결 론

I. 서 론

최근 상용 통신시장에서 무선통신의 두드러진 역할은 무선기기 하드웨어 시장의 급성장을 가져온 것이다. 시장경쟁력을 갖는 고성능 저가격의 무선통신 하드웨어는 성숙단계에 접어든 저주파대역의 디지털 및 아날로그 기술보다는 아직도 많은 기술개발을 요구하는 RF 종단기술에 좌우된다. 특히 GPS, PCS, IMT-2000, WLAN, Bluetooth, RFIC 등 1-5 GHz 대역에 편중되어 있는 최근의 무선통신 서비스는 이 대역에서 갈륨비소(GaAs)에 버금가는 성능을 유지하며 실리콘과 같은 공정에 의한 대량생산을 통해 저 가격을 형성 할 수 있는 SiGe 트랜지스터를 이용한 RFIC를 무선기기의 핵심 RF 하드웨어 기술로 자리를 굳히게 하고 있다.

SiGe 트랜지스터는 실리콘에 비하여 높은 이동도와 낮은 밴드 갭을 갖는 게르마늄 혼합물을 전계

효과 트랜지스터의 채널 영역 및 쌍극성 트랜지스터의 베이스 영역에 도입 함으로써 기존의 실리콘 트랜지스터보다 향상된 RF 성능을 갖는다. 이러한 향상된 성능과 더불어 표준 실리콘 공정에 따른 200mm의 웨이퍼를 이용한 대량생산 및 높은 안정성과 신뢰도를 갖는 공정기술은 SiGe RFIC를 무선기기 RF 종단응용에 있어 가격-성능의 최적합 트레이드-오프를 가능케 한다.

본 고에서는 현재 상용화된 대표적 SiGe 트랜지스터인 SiGe HBT(Heterojunction Bipolar Transistor)의 RF특성 및 SiGe HBT의 IC 응용에 대하여 살펴보고자 한다.

II. SiGe HBT RF 특성

SiGe HBT는 Si과 SiGe의 에너지 대역간극 차

이를 이용하여 이중 접합의 구조를 갖는다. 이중접합의 에너지 대역 차이가 대부분 전자 대역 형성되므로, 에미터에서 베이스로의 전자 주입은 증가하는 반면, 베이스에서 에미터로의 정공 주입이 감소되어 전류이득이 증가하게 된다. 그림 1은 SiGe HBT의 대표적 단면도를 보여준다.

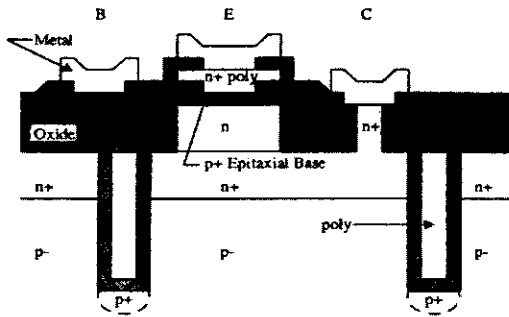


그림 1. SiGe HBT의 대표적 단면도

현재 상용화된 SiGe HBT는 크게 두 가지로 미국의 IBM사[10]를 주축으로 개발된 표류 전계(drift field) BJT 방식과 독일의 Daimler사[2]를 주축으로 한 III-V HBT형 방식이 있다. 표류 전계 BJT 방식은 베이스박막내의 게르마늄량을 에미터 접합경계부터 컬렉터 접합 면까지 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 있는 방식이다.[3]

III-V HBT형 방식은 실리콘 BJT의 불순물 농도 분포와는 달리 GaAs HBT와 같이 에미터보다 훨씬 큰 균일한 베이스 불순물 농도에 의한 얇은 베이스를 이용함으로써 저항과 천이 시간을 감소시킬 수 있고 베이스 폭 변조 효과(Early effect)를 줄일 수 있다.[4]

SiGe HBT는 실리콘 BJT에 비하여 낮은 전류

밀도에서 높은 전류이득(2 GHz에서 $\beta > 100$) 및 높은 차단주파수를 가질 수 있어 고주파 저 전력소비의 회로 설계가 가능하다. 또 높은 전류이득에 의한 입력저항의 향상 및 낮은 잡음지수(2 GHz에서 $NF < 0.8$ dB)는 저잡음 증폭기의 제작을 용이하게 한다. 그림 2는 여러 RFIC용 트랜지스터 기술의 잡음지수 비교를 보여준다.[5]

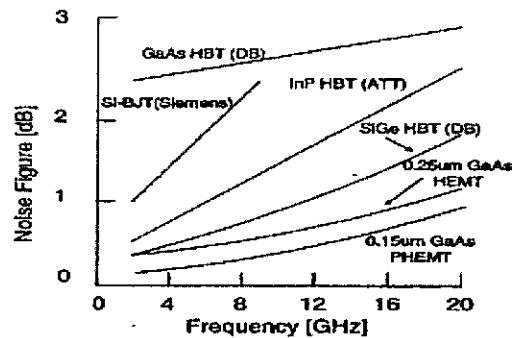


그림 2. RFIC용 트랜지스터 기술의 잡음지수 비교

또 낮은 $1/f$ 코너주파수(약 370 Hz)는 낮은 위상잡음을 갖는 VCO(Voltage Controlled Oscillator)의 제작을 가능케 한다. 그림 3은 여러 RFIC용 트랜지스터 기술의 코너주파수 비교를 보여준다.[5]

또 높은 베이스 도핑농도에 기인한 실리콘 보다 높은 Early 전압은 결과적으로 높은 출력저항을 갖

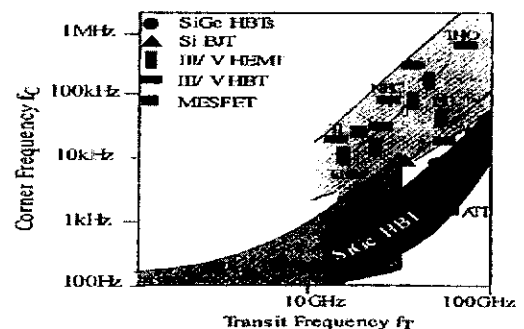


그림 3. RFIC용 트랜지스터 기술의 코너주파수 비교

게 해 안정된 전력 증폭기의 설계를 가능케 한다.[6]

현재 상용화된 RFIC용 SiGe HBT는 콜렉터 영역을 선택적으로 도핑 주입(selectively implanted collector: SIC) 함으로써 낮은 항복(breakdown) 전압($BV_{CEO} < 3V$) 과 높은 차단 주파수(> 50 GHz)를 갖는 저 전력소비 소자와 SIC를 사용하지 않는 높은 항복 전압($BV_{CEO} > 6V$) 과 낮은 차단주파수(< 30 GHz)를 갖는 전력용 소자로 분류된다.[6] IC용 고밀도 소자 기술 외에도 고출력 실리콘 BJT와 같이 고출력 RF SiGe HBT 소자도 개발되어 단일 소자로 2 GHz 에서 10W의 출력을 낼 수 있는 상용 전력 트랜지스터도 개발되었다.[7]

III. SiGe RFIC

1. 전력 증폭기

현재 SiGe 전력 증폭기(PA)의 최대 수요처는 무엇보다도 이동 통신 단말기일 것이다. 독일 Temic사의 GSM 단말기용 3단 전력 증폭기 모듈은 매칭, 전력 조정 및 바이어스 회로를 집적하여 40 dB 이상의 이득, 2.4-5V 공급 전압에 대하여 50%의 최대 PAE(Power Added Efficiency) 그리고 6 dB 동작영역(Dynamic Range)에 걸쳐 40% 이상의 PAE(Power Added Efficiency)를 유지하도록 설계되었다. 이 전력증폭기는 SiGe의 좋은 열전도를 활용 플립 칩 실장(flip-chip packaging)에 의하여 전기적 기생성분(electrical parasitic)을 줄여 이득, PAE 및 출력의 성능 향상을 꾀하였다.[6] 그림 4는 플립 칩 실장 SiGe HBT 전력 증폭기의 전자 현미경 스캔 사진(a)과 정면도(b)를 보여준다.

미국의 IBM사[8],[9] 및 독일의 Infineon사



그림 4. 플립칩 실장 SiGe HBT 전력 증폭기의 스캔전자 현미경 사진(a)과 정면도(b)

[10]도 이동 통신 단말기용 SiGe HBT 전력 증폭기를 개발하였는데 1.9 GHz에서 각각 25 및 27 dB 이득, 47 및 40% PAE, 그리고 28 및 27 dBm 출력을 선보이고 있다. 캐나다의 SiGe Microsystems사는 Bluetooth, WLAN등 2.4 GHz ISM 주파수 대역의 근거리 무선통신용 SiGe HBT 전력 증폭기를 개발하였는데 3.3V 공급 전압에 대하여 45% PAE 그리고 22.7 dBm 출력성능을 보이고 있다.[11]

앞에서 언급한 상용 SiGe HBT 전력 증폭기 외에도 여러 주파수 대역의 전력 증폭기가 연구되었는데 5.7 GHz에서 7.5dB 이득, 30% PAE, 그리고 20 dBm 출력을 갖는 A급 전력 증폭기[12], 8 GHz에서 17.5% PAE 및 17.5 dBm 출력을 갖는 A급 전력 증폭기[13], 26 GHz에서 4 dB 이득을 갖는 MMIC 전력 증폭기[14]등이 발표되었다

2. 저잡음 증폭기

저잡음 증폭기(LNA)는 무선통신 수신기 구성 요소 중 가장 중요한 부분으로 SiGe HBT의 탁월한 잡음특성은 여러 주파수 대역의 저잡음 증폭기 제작을 가능하게 한다. 미국 Maxim사의 이동 통신용 LNA/Mixer(주파수 혼합기) 모듈[15]을 시작으로 IBM 및 TEMIC의 파운더리를 이용하여 여러 상용 및 연구용 저잡음 증폭기가 개발되었는데

표 1에 종합적인 저잡음 증폭기의 특성을 비교하였다. [16],[17],[18],[19]

표 1. SiGe HBT 저잡음 증폭기의 비교

주파수(GHz)	1.9	5.8	6.3	10.0	16.0
소비전력 (mV)	25.0	13.0	9.4	43.2	8.0
이득(dB)	13.0	13.0	20.0		11.5
잡음지수(dB)	1.1	2.1	3.5	3.2	4.0
IHP3 (dBm)	-2.7	-7.0	-21.0	-6.8	

3. 주파수 혼합기

현재까지 상용화된 주파수 혼합기는 미국 Maxim사의 이동 통신용 LNA/Mixer(주파수 혼합기) 모듈과 미국 Stanford Microdevices사의 능동 주파수 혼합기를 들 수 있으며 표 2에 Stanford Microdevices사의 능동 주파수 혼합기 특성을 나열하였다. [20] 그 외 12 GHz대역의 Gilbert 주파수 혼합기 [21] 및 X-밴드(8-11 GHz) 대역의 MMIC 주파수 혼합기 [22]도 개발되었다.

표 2. Stanford Microdevices사의 능동 주파수 혼합기 특성

동작 주파수(GHz)	1.7 - 2.0
입력 전압(V)	8.0
LO 드라이브 전력(dBm)	-3.0 - 2.0
이득(dB)	11.0 - 12.0
잡음지수(dB)	10.0 - 14.0
IHP3(dBm)	19.5 - 27.0

4. 전압제어발진기

앞서 언급한 바와 같이 SiGe HBT의 낮은 1/f 코너주파수 특성은 낮은 위상잡음을 갖는 전압조정

발진기(VCO)의 제작을 가능케 한다. 현재까지 많은 종류의 SiGe HBT 전압조정 발진기가 연구 발표되었는데 표 3에 전압조정 발진기의 종합적인 특성을 비교하였다. [23],[24],[25],[26] 그림 5는 독일의 Infineon사의 1-10 GHz 대역 SiGe HBT 전압조정 발진기 레이아웃 사진을 보여준다.

표 3. SiGe HBT 전압조정 발진기 특성 비교

발진주파수	1.5	11.0	25.0	40.0
튜닝 밴드폭 (%)		5		14
출력(dBm)	9.5			-13
100kHz 옵셋 위상잡음(dBc/Hz)	-87	-87	-93	
1MHz 옵셋 위상잡음(dBc/Hz)		-106		-95

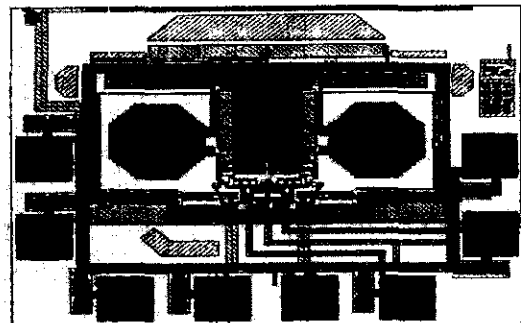


그림 5. 독일의 Infineon사의 1-10GHz대역 SiGe HBT 전압조정 발진기 레이아웃

5. 모듈 및 송수신 RF종단

SiGe HBT를 이용하여 무선통신용 송수신 모듈 및 RF종단을 구현하기도 하였는데 [27],[28] 그 대표적인 예로 모듈의 경우 한국의 S&S사가 캐나다의 SiGe Microsystems사와 공동으로 개발한 AMPS/Cellular/PCS용 이중대역 삼중모드의 LNA-Mixer 모듈을 들 수 있고 RF종단으로는

TEMIC사의 DECT용 칩으로 1.5 dB 잡음지수와 20 dB 이득의 LNA와 47% PAE 와 28 dBm 출력의 PA를 하나의 패키지에 구현하였다. 그림 6은 DECT용 RF중단 칩을 보여준다.

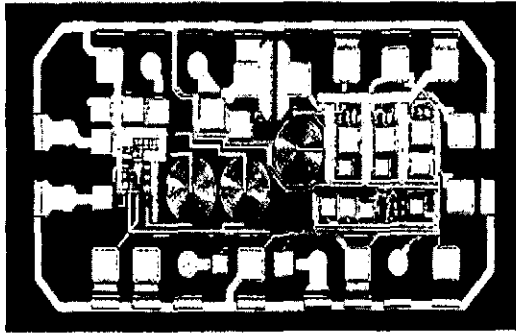


그림 7. DECT용 RF중단 칩 사진

IV. SiGe BiCMOS 기술

SiGe 트랜지스터 기술의 가장 큰 장점으로서는 향상된 초고주파, 초고속 특성을 갖는 HBT 공정기술을 기존의 실리콘 CMOS 공정기술과 결합 통신시스템의 아날로그, 디지털, 그리고 RF회로를 하나의 칩에 통합된 회로(systems-on-a-chip)로 구현이 가능한 BiCMOS 기술에 있다. 상용화에 가장 앞선 IBM사의 5HP BiCMOS 기술을 살펴보면 200mm(8 inch) 웨이퍼를 기반으로 SiGe HBT 기술을 ASIC 가능한 CMOS 기술과 표준 CMOS 공정보다는 4단계, 표준 BiCMOS 공정보다는 한 단계 더 부가적 공정을 통하여 결합 할 수 있다. [29] 표 5는 IBM사의 5HP BiCMOS 기술을 요약한다.

최근의 주요 SiGe BiCMOS 기술을 살펴보면 모토롤라사의 경우 베이스의 도핑안정성을 증가시킬 수 있도록 탄소 경계층을 이용하는 무 에피층 SiGe:C HBT를 0.25- μm CMOS와 결합 하였고 [30] 루슨트/벨 연구소에서는 SiGe HBT를

0.25- μm CMOS 공정에 단지 4단계 더 부가적인 리소그래피 공정을 이용하여 결합 공정단가를 대폭적으로 줄일 수 있는 기술을 개발하였다. [31]

V. 결 론

80년대 중반 IBM사를 중심으로 연구개발되기 시작한 SiGe 트랜지스터 기술은 초기의 많은 회의론에도 불구하고 이제는 무선통신 RF중단 하드웨어의 가장 경쟁력 있는 기술로 자리잡고 있다. 향후 100 GHz 이상의 차단주파수를 갖는 SiGe HBT 기술의 개발도 가능 할 것이므로 10 GHz 이상의 대역에서도 많은 응용이 기대되며 향상된 CMOS 기술과 결합된 저전력 BiCMOS 기술에 의하여 하나의 칩에 송수신 시스템 전체를 구현 할 수 있으리라 기대된다.

표 4. IBM사의 5HP BiCMOS 기술

소자 종류	소자	특성값
NPN SiGe HBT	표준	$f_m/x_{max} = 47/65$ GHz
	고 항복	$f_m/x_{max} = 25/55$ GHz
FET	NFET	$L_{eff} = 0.39 \mu\text{m}$
	PFET	$L_{eff} = 0.38 \mu\text{m}$
다이오드	Schottky	$V_f = 0.31$ V
	Varactor	$C_j = 1.2$ fF/ μm^2
	PIN	$C_j = 0.25$ fF/ μm^2
	ESD	HBM, 2000V
커패시터	MIM	$C = 0.7$ fF/ μm^2
	Poly/N+ Si	$C = 1.5$ fF/ μm^2
인덕터	Thick last metal	$L = 1.0$ nH, $Q = 17@5$ GHz
		$R_s(\Omega/\text{sq})$ TCR(ppm/deg)
저항	Poly Si	220 -75
	Poly Si1	340 -275
	Si X - tal	25 1940
	Si X - tal	8 2050
	Si X - tai	1750 300

*참고문헌

- [1] 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. Hame and J. N. Burghartz, "75 GHz fT SiGe-Base Heterojunction Bipolar Transistors," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 11, pp. 171-173, 1990.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] A. Schuppen, "SiGe-HBTs for Mobile Communications," *Solid-State Electronics*, Vol. 43, pp. 1373-1381, 1999.
- [5] U. Konig, A. Gruhle and A. Schuppen, "SiGe Devices and Circuits: Where are Advantages over III/V?," *IEEE GaAs IC Symposium Digest*, 99, 14-17, 1995
- [6] D. Barlas, G. Henderson, X. Zhang, M. Bopp and A. Schuppen, "SiGe Transistor Technology for RF Applications," *Microwave Journal*, June, pp. 22-39, 1999.
- [7] 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.
- [8] J. N. Burghartz, J.-O. Plouchart, K. A. Jenkins, C. S. Webster and M. Soyuer, "SiGe Power HBT's for Low-Voltage, High-Performance RF Applications," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 19, pp. 103-105, 1990.
- [9] D.R. Greenberg et al., "Large-Signal Performance of High-BVCEO Graded Epi-Base SiGe HBTs at Wireless Frequencies," *IEEE IEDM Tech. Dig.*, pp. 799-802, 1997.
- [10] S. Heinen "RF Circuit Design on Si and SiGe BiCMOS," *IEEE MTT-S Workshop, WFA02, 2000.*
- [11] SiGe Microsystems Inc, www.sige.com
- [12] U. Erben, M. Wahl, A. Schuppen and H. Schumacher, "Class-A SiGe HBT Power Amplifiers at C-band Frequencies," *IEEE Microwave & Guided Wave Letters*, Vol. 5, pp. 435-436, 1995.
- [13] J. S. Rieh, L. H. Lu, Z. Ma, X. Liu, L. P. B. Katehi and P. Bhattacharya, "Small and Large Signal Operation of X-Band CE and CB SiGe/Si Power HBT's," *IEEE MTT-S Digest*, pp. 1191-1194, 1999.
- [14] K. M. Strohm et al., "Coplanar Ka-band SiGe MMIC Amplifier," *Electron. Lett.*, Vol. 31, pp. 1353-1354, 1995.
- [15] R. Lodge, "Advantages of SiGe for RF Front-ends," *RF Design*, May, pp. 22-26, 1999.

- [16] H. Ainspan, M. Soyuer, J. O. Plouchart and J. Burghartz, "A 6.25 GHz Low DC Power Low Noise Amplifier in SiGe," *IEEE CICC Tech. Dig.*, pp. 177-180, 1997.
- [17] J. R. Long, M. A. Copeland, S. J. Kovacic, D. S. Malhi and D. L. Hareme, "RF Analog and Digital Circuits in SiGe Technology," *IEEE ISSCC Tech. Dig.*, pp. 82-83, 1996.
- [18] M. Soyuer, J-O. Plouchart, H. Ainspan and J. Burghartz, "A 5.8-GHz 1-V Low-Noise Amplifier in SiGe Bipolar Technology," *IEEE RFIC Symposium Proc.*, pp. 19-22, 1999.
- [19] K.-B. Schad, U. Erben, E. Soenmez, P. Abele and H. Schumacher, "A Ku Band SiGe Low Noise Amplifier," *IEEE Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems Proc.*, pp. 52-54, 2000.
- [20] R. Pinato and T. Cameron, "High Linearity HBT RFICs using AlGaAs, InGaP-GaAs and SiGe Technologies for Basestation and Repeater Designs," *International IC Conference and Exhibition Korea, 2000*.
- [21] J. Glenn, M. Case, D. Hareme, B. Meyerson and R. Poisson, "12-GHz Gilbert Mixers using A Manufacturable Si/SiGe Epitaxial-Base Bipolar Technology," *IEEE BCTM Tech. Dig.*, pp. 186-189, 1995.
- [22] M. Case, S. A. Mass, L. Larson, D. Rensch, D. Hareme and B. Meyerson, "An X-Band Monolithic Active Mixer in SiGe HBT Technology," *IEEE MTT-S Digest*, pp. 655-658, 1996.
- [23] M. Soyuer, J. N. Burghartz, et al., "An 11 GHz 3V SiGe VCO with Integrated Resonator," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 32, pp. 1451-1454, 1997.
- [24] H. Kuhnert and W. Heinrich, "5 to 25 GHz SiGe MMIC Oscillators on a Commercial Process," *IEEE Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems Proc.*, pp. 60-63, 2000.
- [25] C. Rheinfelder et al., "26 GHz Coplanar SiGe MMICs," *IEEE MTT-S Digest*, pp. 173-276, 1996.
- [26] A. Gruhel, A. Schuppen, U. Konig, U. Erben and H. Schumacher, "Monolithic 26GHz and 40 GHz VCOs with SiGe Heterojunction Bipolar Transistors," *IEEE IEDM Tech. Dig.*, pp. 725-728, 1995.
- [27] M. Bopp et al., "A DECT Transceiver Chip Set Using SiGe Technology," *IEEE ISSCC Tech. Dig.*, pp. 68-69, 1999.
- [28] 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.
- [29] 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.

- [30] D. L. Hareme, 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.

- [31] 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

이근호

1988년 연세대학교 물리학과 졸업(학사)
 1988년 연세대학교 물리학과 대학원 졸업(석사)
 1995년 미국 존스 홉킨스 대학 물리학과 졸업 (Ph.D)
 1996년 한국 과학재단 Post Doc. (서울대학교)
 1996년~1998년 정보통신부 전파연구소 이천분소
 기술과장
 1999년~2000년 미국 메사추세츠 대학교, 조지아텍,
 어번 대학교 전자공학과 객원 연구원
 현재 정보통신부 전파연구소 RF기술 팀장

김남영

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.

한상국

1999년 안양대학교 정보통신공학과 졸업 (학사)
 2000년 미션 테크노 중앙 연구소 연구원
 현재 광운대학교 전자공학과 석사과정 재학 중

이제영

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