

논문 2007-44SD-4-10

Metamorphic HEMT에서 low-k Benzocyclobutene(BCB)를 이용한 표면 passivation 비교 연구

(Comparative Study of surface passivation for Metamorphic HEMT
using low-k Benzocyclobutene(BCB))

백용현*, 오정훈*, 한민*, 최석규*, 이복형*, 이성대*, 이진구**

(Yong-Hyun Baek, Jung-Hun Oh, Min Han, Seok-Gyu Choi, Bok-Hyung Lee,
Seong-Dae Lee, and Jin-Koo Rhee)

요약

Passivation 기술은 소자를 외부 환경의 영향으로부터 보호할 수 있고, 소자 성능의 감소를 예방할 수 있기 때문에 능동 소자 제작에 있어서 매우 중요하다. 본 논문에서 passivation 물질로 낮은 유전 상수를 갖는 benzocyclobutene (BCB)과 전통적인 passivation 물질인 Si₃N₄를 이용하여 GaAs를 기반으로 하는 0.1 μm Γ -gate InAlAs/InGaAs metamorphic high electron mobility transistors (MHEMTs)를 제작하였다. 제작된 MHEMT의 특성은 passivation 전과 후로 구분하여 비교하였다. Passivation 후 BCB와 Si₃N₄를 이용한 경우 모두에서 passivation 이전에 비해 저하된 DC 및 RF 특성을 나타내었으나, BCB를 이용하여 passivation을 한 소자들이 전통적인 passivation 물질인 Si₃N₄를 이용한 소자들에 비해서 상대적으로 낮은 특성 저하를 DC와 RF에서 함께 나타내었다.

Abstract

The passivation is one of the important technologies for protection of the devices from damage. In this paper, we fabricated 0.1 μm Γ -gate InAlAs/InGaAs metamorphic high electron mobility transistors (MHEMTs) on a GaAs substrate. And then the wafer with MHEMTs was divided into two pieces; one for passivation and another for without passivation experiments. The passivations were done by using both low-k BCB and Si₃N₄ thin films. DC and RF performances were measured and the results are compared. The MHEMTs with BCB passivation show lower degradation than ones with Si₃N₄ passivation.

Keywords : 0.1 μm Γ -gate MHEMT, passivation, BCB

I. 서론

최근에 W-band (75~110 GHz) 대역 주파수는 신호 흡수 감쇄가 적어 레이더 및 센서 등 응용 시스템의 주

파수 자원으로 적용이 확대되고 있는 추세이다. 상기의 주파수 대역에서 시스템의 안정적인 동작을 위해서는 고성능의 능동 소자가 요구되고 있다. 외국의 경우에는 밀리미터파 대역용 시스템의 능동소자로 현재 많이 사용되고 있는 PHEMT (Pseudomorphic HEMT) 및 HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) 보다는 InP 기반의 HEMT를 많이 사용하고 있다. 그러나 InP를 기반으로 한 소자들은 가격이 비싸고 공정 중에 깨지기 쉬운 단점들이 있다. 이러한 이유 때문에 최근에는 밀리미터파의 특성과 낮은 공정 단가를 만족시키는 MHEMT를 많이 이용하고 있다. MHEMT는 InP-

* 학생회원, ** 평생회원, 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터
(Millimeter-wave INnovation Technology research center, MINT)

※ 본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터 육성사업의 지원으로 수행되었음
(R11-1999-058-02005-0)

접수일자: 2006년10월30일, 수정완료일: 2007년3월26일

HEMT와 비슷한 에피 구조를 가짐으로써 우수한 주파수 특성과 잡음 특성을 나타내며, InP-HEMT에 비해 충격에 강하고 후면 공정이 용이하다는 장점을 갖고 있다^[1-3]. 이러한 HEMT 소자들은 표면효과에 매우 민감하기 때문에 주변의 환경으로부터 습기나 이온의 흡수로 인해서 trapping 효과를 발생시켜 소자의 성능을 저하시킨다. 이러한 표면 준위의 발생을 억제하기 위해서 passivation 기술이 매우 중요한 역할을 한다^[4].

Passivation 물질로 기존에 많이 사용하는 Si₃N₄와 비교하여 BCB는 낮은 유전상수 (2.7), 낮은 loss tangent (0.0008), 낮은 curing 온도 (210 °C), 간단한 공정방법, 낮은 수분 흡수성질 등의 많은 장점을 갖는다. 그리고 Si₃N₄는 PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 장비를 이용하여 형성되지만 BCB는 coating을 통하여 공정이 이루어지므로 플라즈마에 의해 반드시 야기되는 표면 피해를 피할 수 있다. 이러한 장점들은 passivation 후에 발생하는 기생 성분들의 증가를 제한하기 때문에 높은 주파수 응용을 위해 동작하는 소자에서 이익을 가져다 준다^[5].

본 논문에서는 MHEMT를 제작한 후 BCB와 Si₃N₄를 이용하여 passivation을 실시하였다. 그리고 passivation 전과 후로 구분하여 소자들의 DC, RF 특성을 측정하여 비교 분석하였다. 특성 비교를 위해서 측정된 값들을 임의로 여러 개 선택한 뒤 평균값을 구하여 비교하였다.

II. 소자의 구조와 공정 순서

그림 1에 MHEMT의 에피층 구조를 나타내었다. 버퍼층은 In_xAl_{1-x}As 층을 0에서 50%까지 In의 몰분율을 변화시키며 S.I. GaAs 기판위에 1 μm의 두께로 성장시켰다. 또한 400 nm 두께의 In_{0.52}Al_{0.48}As 버퍼를 활성층을 보호하기 위하여 성장시켰다. 버퍼층 위에 활성층은 23 nm 두께의 In_{0.53}Ga_{0.47}As 채널층과 Si이 각각 4.5×10¹² cm⁻²와 1.3×10¹² cm⁻²의 농도로 도핑된 double δ-doping층으로 구성되어 있으며, 15 nm 두께의 n+ In_{0.52}Ga_{0.47}As Cap 레이어를 소스-드레인 간의 오믹 접촉을 위해 성장시켰다. 성장된 에피층은 측정결과 300K에서 3.4×10¹² cm⁻²의 electron carrier density와 9700 cm²/V·sec의 Hall mobility를 나타내었다.

성장된 에피 웨이퍼를 이용하여 0.1 μm I-gate MHEMT를 다음과 같은 순서로 제작하였다. 먼저 전기적인 격리를 위해서 H₃PO₄/H₂O₂/H₂O (1:1:60)의 식각

In _{0.53} Ga _{0.47} As	6 x 10 ¹⁸ cm ⁻²	15 nm
In _{0.52} Al _{0.48} As	undoped	15 nm
δ-doping	4.5x10 ¹² cm ⁻²	
In _{0.52} Al _{0.48} As	undoped	3 nm
In _{0.53} Ga _{0.47} As	undoped	23 nm
In _{0.52} Al _{0.48} As	undoped	4 nm
δ-doping	1.3x10 ¹² cm ⁻²	
In _{0.52} Al _{0.48} As	undoped	400 nm
In _x Al _{1-x} As (x = 0~0.5)	undoped	1000 nm
S.I. GaAs substrate		

그림 1. MHEMT 소자의 에피 구조

Fig. 1. The Epitaxial structure of the MHEMT device.

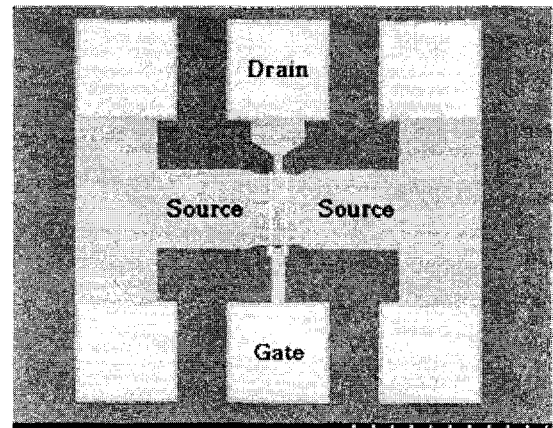


그림 2. 제작된 MHEMT의 SEM 사진

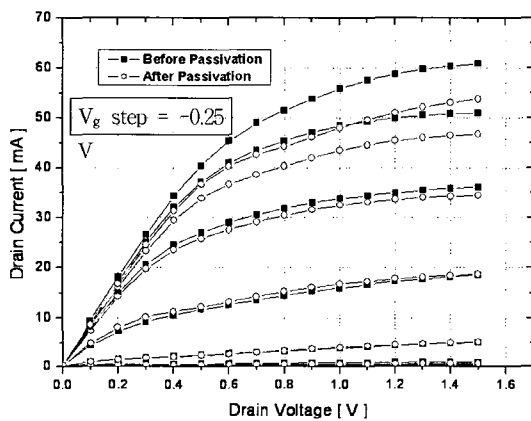
Fig. 2. The SEM photograph of the fabricated MHEMT.

용액을 이용하여 200 nm의 두께를 식각하였다. 그리고 소스-드레인 간의 오믹 접촉 형성을 위해서 AuGe/Ni/Au (140/30/170 nm) 금속을 증착하고, RTA (Rapid Thermal Annealing)에서 320 °C로 60초 동안 열처리하였다. 오믹 공정 후에 게이트 리세스(Recess) 식각을 위해서 succinic acid/H₂O₂/H₂O (1:5:10) 용액을 이용하여 gate와 source 사이의 간격 3 μm를 식각하는 wide recess 공정을 진행하였다. E-beam을 이용하여 I-gate의 형태의 레지스트 패턴을 형성하고, gate를 형성하기 위해서 Ti/Au (50/400 nm)를 증착하였다. 게이트 공정 후에는 표면 보호를 위해서 BCB (2.5μm)와 Si₃N₄ (1082 Å)로 각각 passivation을 수행하였고, 각각의 공정은 하나의 시편을 반으로 나누어서 두 개의 시편에 passivation 물질을 달라하여 진행하였다. BCB는

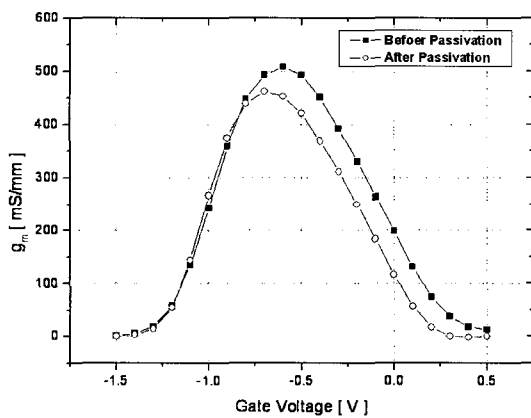
spin coater를 이용하여 coating한 후, vacuum oven에서 210°C 온도로 40분 동안 curing을 진행하였다. 이때의 BCB는 2.7의 유전상수를 나타내었다. Si_3N_4 passivation은 PECVD를 이용하여 진행되었으며 6.7의 유전상수를 나타내었다. Passivation된 각각의 소자들에서 측정을 위한 패드 부분의 Si_3N_4 와 BCB를 제거하기 위해서 ICP-RIE (Inductively Coupled Plasma-Reactive Ion Etching)를 이용하여 건식 식각 공정을 각각 진행하였다. 그림 2는 제작된 MHEMT의 SEM 사진이다.

III. 측정 결과

제작된 각각의 MHEMT는 Agilent사의 HP 4156A DC parameter analyzer를 이용하여 passivation 전과 후를 구분하여 DC 특성을 두 번씩 측정하였다. 결과 데



(a)



(b)

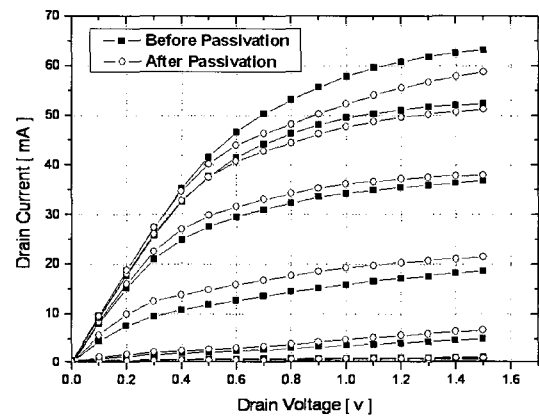
그림 3. Si_3N_4 로 passivation된 MHEMT의 DC 측정 결과 : (a) IV 특성, (b) 전달컨덕턴스

Fig. 3. The measured DC results of the fabricated MHEMTs using Si_3N_4 for passivation. (a) IV characteristic, (b) transconductance

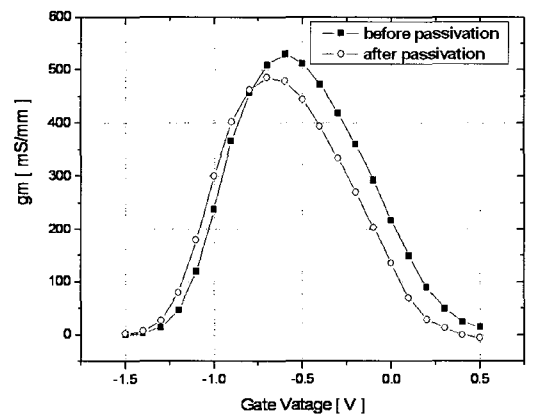
이터의 신뢰성을 높이기 위해 제작된 소자들의 측정 데이터에서 여러 개를 임의로 선택하여 평균값을 구하였다. 이후에 나오는 결과 데이터들은 여러 소자들의 평균값으로 나타낸 것이다.

평균값을 구한 결과 Si_3N_4 를 이용하여 passivation을 진행한 소자들의 경우에는 핀치-오프 전압(V_p)은 -1.2 V이고, 최대 드레인 전류 I_{dss} 는 게이트와 소스간의 전압(V_{gs})이 0 V 일 때 61 mA에서 53 mA로 passivation 후에 13%가 감소하였다. 그리고 최대 전달컨덕턴스 $g_{m,max}$ 는 507 mS/mm에서 462 mS/mm로 passivation 후에 8%가 감소하였다. Si_3N_4 passivation 전후의 DC 특성 그래프를 그림 3에 나타내었다.

BCB를 이용하여 passivation을 진행한 소자들의 경우 핀치-오프 전압(V_p)은 -1.2 V이고, 최대 드레인 전류 I_{dss} 는 게이트와 소스간의 전압(V_{gs})이 0 V 일 때



(a)



(b)

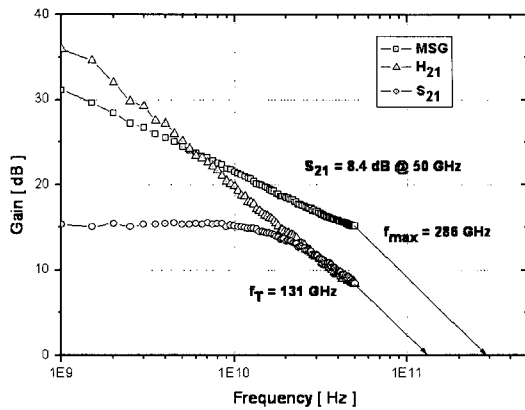
그림 4. BCB로 passivation된 MHEMT의 DC 측정 결과 : (a) IV 특성, (b) 전달컨덕턴스

Fig. 4. The measured DC results of the fabricated MHEMTs using BCB for passivation. (a) IV characteristic, (b) transconductance

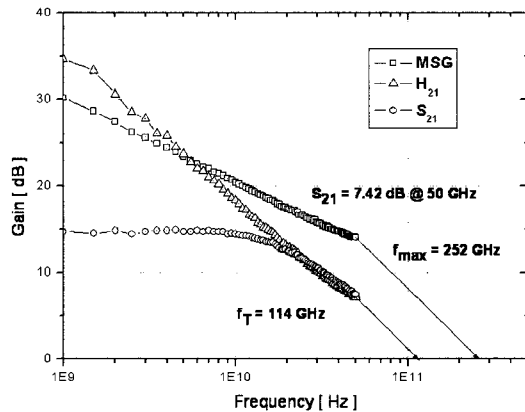
표 1. MHEMT의 DC 측정 결과

Table 1. The measured DC results of MHEMTs.

	I_{dss}		$g_{m,max}$	
	mA	감소량	mA	감소량
Si ₃ N ₄ 전(前)	61	13.1 %	507	8.9 %
Si ₃ N ₄ 후()	53		462	
BCB 전(前)	63	6.3 %	531	6.8 %
BCB 후()	59		495	



(a)

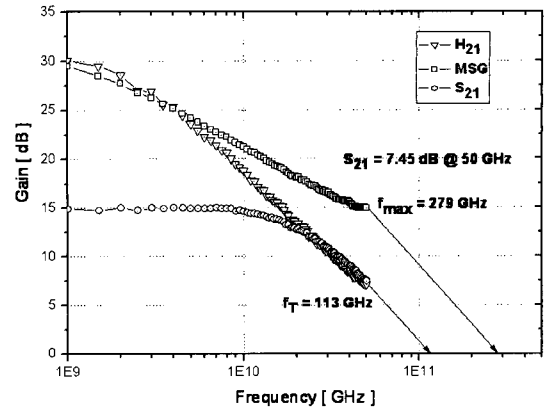


(b)

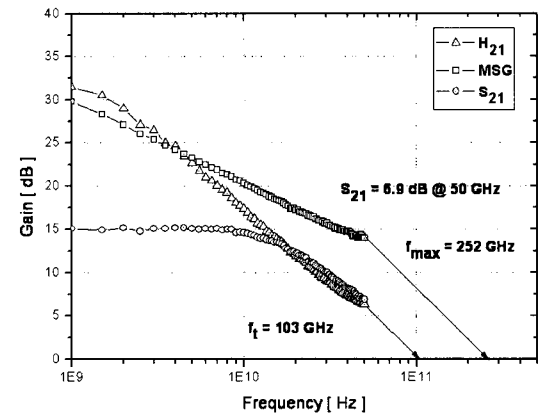
그림 5. Si₃N₄로 passivation된 MHEMT의 RF 특성 : (a) passivation 전, (b) passivation 후

Fig. 5. The RF characteristics of the fabricated MHEMTs using Si₃N₄ for passivation. (a) before passivation, (b) after passivation

63 mA에서 59 mA로 약 6.9%가 감소하였다. 그리고 최대 전달컨덕턴스 $g_{m,max}$ 는 531 mS/mm에서 495 mS/mm로 passivation 후에 6.8%가 감소하였다. BCB passivation 전후의 DC 특성 그래프를 그림 4에 나타내었다. 표 1에 DC 특성에 대한 Si₃N₄와 BCB 두 경우의 결과를 요약하였다.



(a)



(b)

그림 6. BCB로 passivation된 MHEMT의 RF 특성 : (a) passivation 전, (b) passivation 후

Fig. 6. The RF characteristics of the fabricated MHEMTs using BCB for passivation. (a) before passivation, (b) after passivation

표 2. MHEMT의 RF 특성

Table 2. The RF characteristics of MHEMTs.

	S_{21} @50		f_T		f_{max}	
	GHz	감소량	GHz	감소량	GHz	감소량
Si ₃ N ₄ 전(前)	8.4	12 %	131	13 %	286	12 %
Si ₃ N ₄ 후()	7.4		114		252	
BCB 전(前)	7.45	7.4 %	113	8.8 %	279	9.7 %
BCB 후()	6.9		103		252	

RF 특성을 비교하기 위하여 Anritsu사의 ME7808A Vector Network Analyzer를 사용하여 0.5~50 GHz 대역에서 On-wafer 측정 방법으로 S-parameter 특성을 측정하였다. 측정된 S-parameter 값들을 이용하여 외삽

법을 이용하여 f_T , f_{max} 를 구하였다. 측정 결과, Si_3N_4 를 이용하여 passivation을 진행한 소자들의 경우에는 S_{21} , f_T , f_{max} 의 평균값들이 passivation 후에 각각 12%, 13%, 12% 감소하였지만, BCB를 이용하여 passivation을 진행한 소자들의 경우에는 7.4%, 8.8%, 9.7% 감소하였다. 각각의 경우에 대한 그래프는 그림 5와 6에 나타내었고, 표 2에 요약하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 고주파 응용을 위한 MHEMT 소자에서 생기는 표면 준위가 trapping 효과를 발생하여 DC와 RF 특성을 감소시키는 단점을 보완하기 위한 passivation 공정을 진행하였다. Passivation 물질은 Si_3N_4 와 유전율이 상대적으로 낮은 BCB 두 가지를 동시에 사용하였다. 이때 Si_3N_4 는 PECVD 과정에서 표면이 플라즈마에 노출되어 필수적으로 표면 피해가 나타나지만 BCB는 coating 방법으로 공정이 진행되기 때문에 플라즈마에 직접적으로 표면이 노출이 되지 않기 때문에 플라즈마에 의한 표면 피해가 나타나지 않는다.

두 가지 경우에 대하여 소자들의 DC와 RF 특성을 passivation 전과 후로 구분하여 비교 분석하였다. 그 결과 두 가지 경우에서 passivation 후에 소자의 특성이 감소되었다. 하지만 Si_3N_4 를 사용했을 경우보다 BCB를 사용한 경우가 소자의 특성이 감소되는 양이 적게 나타났다. 이러한 특성 차이의 원인으로 판단되는 것은 BCB의 경우 Si_3N_4 에 비해서 낮은 유전 상수를 갖기 때문에 passivation 공정 후에 발생하는 기생 커패시턴스(C_{gs} , C_{gd})의 증가량이 상대적으로 적고, 공정 방법에서 BCB는 spin coater에 의해 coating되기 때문에 Si_3N_4 의 경우처럼 플라즈마 공정에 에피 표면이 노출되지 않기 때문에 플라즈마 공정에 의해서 야기되는 표면 준위가 적기 때문이다. 이러한 표면 준위는 소자의 성능을 감소시키는 원인이 되는 trapping 효과를 발생시킨기 때문에 BCB를 사용한 소자의 성능 저하가 상대적으로 적은 것으로 판단된다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 BCB가 Si_3N_4 에 비해 갖는 단점은 두께가 상대적으로 매우 두껍다는 것이다. passivation되는 BCB의 두께 ($2.5 \mu m$)가 Si_3N_4 (1085 \AA) 만큼 얇게 coating할 수 없기 때문에 BCB를 multi-layer를 갖는 회로나 multi-finger 구조의 소자에서 passivation 공정에 적용하고, air-bridge가 아닌 plating을 이용한 bridge 공정에 적용하여 사용한다면 passivation으로 인해 발생되

는 단점들을 보완하여 좀 더 고주파에서 동작할 수 있는 소자를 만들 수 있는 좋은 선택이 될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] D.M. Gill, B.C. Kane, S.P. Svensson, D.W. Tu, P.N. Uppal, and N.E. Byer, "High performance, $0.1 \mu m$ InAlAs/InGaAs high electron mobility transistors on GaAs," IEEE Electron Device Lett., vol. 17, pp. 328-330, Jul. 1996.
- [2] S. Bollaert, Y. Cordier, V. Hoel, M. Zaknour, H. Happy, S. Lepilliet, and A. Cappy, "Metamorphic $In_{0.4}Al_{0.6}As/In_{0.4}Ga_{0.6}As$ HEMTs on GaAs substrate," IEEE Electron Device Lett., vol. 20, pp. 123-125, Mar. 1999.
- [3] J. Y. Shim, H. S. Yoon, S. J. Kim, J. Y. Hong, W. J. Chang, D. M. Kang, J. H. Lee and K. H. Lee, "DC and Microwave Characteristics of $0.2 \mu m$ T-Gate Double-Doped Metamorphic InAlAs/InGaAs/GaAs HEMTs Recessed with Succinic Acid/ H_2O_2 ," J. Korean Phys. Soc., vol. 41, pp. 528-532, Oct. 2002.
- [4] Bruce M. Green, Kenneth K. Chu, E. Martin Chumbes, Joseph A. Smart, James R. Shealy, and Lester F. Eastman, "The Effect of Surface Passivation on the Microwave Characteristics of Undoped AlGaIn/GaN HEMT's," IEEE Electron Device Lett., vol. 21, pp. 268-270, Jun. 2000.
- [5] Hsien-Chin Chiu, Shih-Cheng Yang, and Yi-Jen Chan, "Low-k BCB Passivated $Al_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.15}Ga_{0.85}As$ Enhancement-Mode pHEMTs," IEEE GaAs Dig., pp. 269-272, 2001.

저 자 소 개



백 용 현(정회원)
 2003년 동국대학교 전자공학과 (공학사)
 2005년 동국대학교 전자공학과 (공학석사)
 2005년~현재 동국대학교 전자공학과 박사과정 재학 중
 <주관심분야 : MMIC 설계 및 공정>



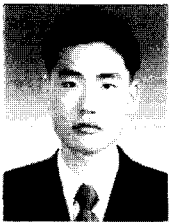
오 정 훈(정회원)
 2003년 동국대학교 기계공학과, 전자공학과 (공학사)
 2005년 동국대학교 전자공학과 (공학석사)
 2005년~현재 동국대학교 전자공학과 박사과정 재학 중
 <주관심분야 : 미소 고체전자 현상 분석, MMIC 공정>



한 민(정회원)
 2003년 동국대학교 전자공학과 (공학사)
 2005년 동국대학교 전자공학과 (공학석사)
 2006년~현재 동국대학교 전자공학과 박사과정 재학 중
 <주관심분야 : MEMS 공정 설계, E-Beam Lithography>



최 석 규(정회원)
 2003년 동국대학교 전자공학과 (공학사)
 2005년 동국대학교 전자공학과 (공학석사)
 2005년~현재 동국대학교 전자공학과 박사과정 재학 중
 <주관심분야 : MMIC 공정>



이 복 형(정회원)
 1999년 동국대학교 전자공학과 (공학사)
 2001년 동국대학교 전자공학과 (공학석사)
 2006년 동국대학교 전자공학과 (공학박사)
 2006년~현재 밀리미터파 신기술연구센터 연구원
 <주관심분야 : MMIC 공정, W-band system>



이 성 대(정회원)
 1998년 동국대학교 전자공학과 (공학사)
 2000년 동국대학교 전자공학과 (공학석사)
 2006년 동국대학교 전자공학과 (공학박사)
 2006년~현재 밀리미터파 신기술연구센터 연구원
 <주관심분야 : MMIC 공정, W-band system>



이 진 구(정회원)
 1969년 국립항공대학교 전자공학과 졸업(공학사),
 1975년 서울대학교 전자공학과 석사과정(공학석사),
 1982년 Oregon State Univ. 전기공학과(공학박사),
 1985년 Cray Research Scientist,
 1985년 Microwave Semiconductors, USA, Senior Engineer,
 1995년~현재 한국 전자과학회 이사,
 2005년 대한전자공학회 회장,
 1985년~현재 동국대학교 전자공학과 교수,
 1999년~현재 밀리미터파 신기술 연구센터 소장
 <주관심분야 : MMIC 설계, 소자 모델링>