

논문 2011-48SD-9-1

AlGaIn/GaN HEMT 의 DC 및 RF 특성 최적화

(Optimization of the DC and RF characteristics in AlGaIn/GaN HEMT)

손 성 훈*, 김 태 근**

(Sung Hun Son, and Tae Geun Kim)

요 약

본 논문에서는 AlGaIn/GaN HEMT의 DC 및 RF 특성을 최적화 하기위해서 2차원 소자 시뮬레이터를 이용하여 연구를 진행하였다. 먼저, AlGaIn층의 두께, Al mole fraction 의 변화에 따른 2차원 전자가스 채널의 농도변화가 생기는 현상을 바탕으로 DC특성을 분석하였다. 다음 게이트, 소스, 드레인 전극의 크기와 위치 변화에 따른 RF 특성을 분석하였다. 그 결과 Al mole fraction이 0.2몰에서 0.45몰로 증가할수록 전달이득(transconductance, g_m) 과 I-V 특성이 향상됨을 확인하였다. 한편 AlGaIn층의 두께가 10nm에서 50nm로 증가할수록 I-V특성은 향상되지만 g_m 은 감소하는것을 확인하였다. RF 특성에서는 게이트 길이가 가장 큰 영향을 미치며 그 길이가 짧을수록 RF특성이 향상되는 것을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we investigated the characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs to optimize their DC and RF characteristics by using a two-dimensional device simulator. First, we analyzed the variation of the DC characteristics with respect to the variation of 2DEG concentrations when varying the Al mole fraction and the thickness of the AlGaIn layer. Then, we examined the variation of the RF characteristics by varying the size and the location of the gate, source and drain electrodes. When the Al mole fraction increased from 0.2 to 0.45, both the transconductance and I-V characteristics increased. On the other hand, the I-V characteristics were improved but transconductance was decreased as the thickness of the AlGaIn layer increased from 10nm to 50nm. In the RF characteristics, the gate length was found to be the most influential parameter, and the RF characteristics were improved when the gate length was shorten.

Keywords : HEMT, DC and RF characteristics, f_T , f_{max}

I. 서 론

최근 전자산업의 눈부신 발전과 무선 정보통신기술의 발전은 개인 휴대용 단말기에서부터 상업용, 군사용 밀리미터파 집적소자 에 이르기까지 그 수요가 점점 증가하고 있으며 이에 따라 대용량의 정보를 빠르게 처리하는 고도의 정보처리 기술이 가능한 고효율/고주파 소

자가 절실히 요구되고 있다.^[1~3] 갈륨 나이트라이드 (GaN) 물질은 3.4 eV의 높은 밴드갭 에너지와 2×10^{17} 의 큰 전자포화 속도 및 1.3 W/cm의 우수한 열전도도 등으로 인해 차세대 고효율/ 고주파 소자에 적합한 물질로서 활발히 연구가 진행되고 있는 추세이다.^[4~6] 이러한 우수한 특성을 지닌 GaN 물질을 이용하여 제작된 고전자 이동도 트랜지스터(High Electron Mobility Transistors) 는 서로 다른 밴드갭 에너지를 가지는 AlGaIn 과 GaN 물질을 접합시킴으로써 접합면에 2차원 전자가스(2-Dimensional Electron Gas) 채널이 형성되며 또한 GaN 와 AlGaIn 간의 격자 상수 차이로 인하여 접합면에서 분극현상이 발생하게 되어서 일반적인 GaAs/AlGaAs HEMT 에 비해 채널의 전하량이 10배

* 학생회원, ** 정회원-교신저자,
고려대학교 전기전자전파공학과
(School of Electrical Engineering,
Korea University)

※ This work was supported by the IT R&D program of MKE/IITA. [2007-F-044-02, Development of GaN power amplifier for 4G base station

접수일자: 2010년12월20일, 수정완료일: 2011년8월17일

이상 크기 때문에 빠른속도의 전자전송을 가능케 하는 이점을 갖고 있다.^[7]

이러한 고출력/고주파 소자에서 DC 및 RF특성은 소자의 성능을 좌우하게 되는데 AlGaN 층의 두께, Al mole fraction, 전극의 크기와 위치 등의 물리적인 요소에 의해 결정된다. 따라서 본 논문에서는 2차원 소자 시뮬레이터인 Silvaco 사의 ATLAS 프로그램을 이용하여 AlGaN 층의 두께와 Al mole fraction 에 따른 DC특성 분석과 전극의 크기와 위치에 따른 RF특성을 비교 분석 하였다.^[8]

II. 본 론

1. 시뮬레이션을 위한 AlGaN/GaN HEMT 구조

그림 1은 시뮬레이션을 수행하기 위해 설계된 AlGaN/GaN HEMT 구조의 단면도를 나타내고 있다. 비의도적으로 도핑된 1- μm 두께의 GaN-buffer 층과 도핑하지 않은 25 nm 두께의 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 장벽층으로 구성되며 그 위에 1 μm 길이의 게이트 전극, 소스와 게이트간의 거리(L_{SG})와 드레인과 게이트간의 거리(L_{GD})는 2 μm 이다. 소스와 드레인 전극은 오믹(Ohmic) 컨택 하였으며 게이트 전극은 5.15eV 의 일함수로 Schottky 접촉 하고 있다. HEMT 소자에 쓰이는 기판은 주로 사파이어, SiC 이지만 시뮬레이션 속도에 영향을 주지 않기 위해서 생략하였다.^[9]

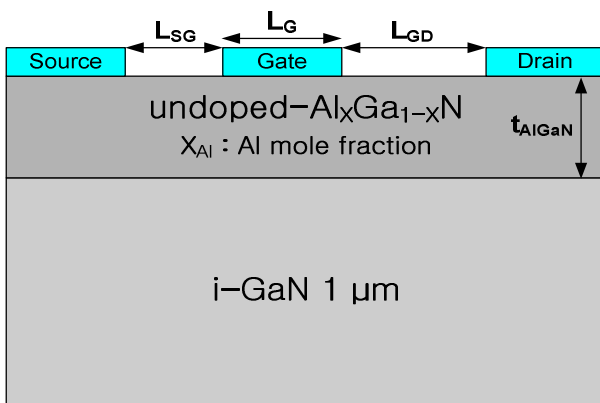


그림 1. AlGaN/GaN HEMT 소자의 단면도
Fig. 1. A cross-sectional view of the AlGaN/GaN HEMT.

2. 시뮬레이션 모델 및 가정

본 시뮬레이션을 진행하기 위해 사용한 시뮬레이션 모델은 HEMT 소자에 인가되는 전계에 따른 캐리어의

표 1. AlGaN/GaN 의 물성 파라미터
Table 1. Material parameters of AlGaN and GaN.

Parameter	AlGaN	GaN
Affinity (eV)	3.91	4.3
Energy gap (eV)	3.97	3.43
Permittivity	8.78	8.9
Electron mobility (cm^2/Vs)	600	900
Hall mobility (cm^2/Vs)	10	10
Electron saturation velocity (10^7cm/s)	1.91	1.17
Hall saturation velocity (10^6cm/s)	1	1

거동에 대한 Fldmob (Field-Dependent Mobility) 모델, DDM(Drift Diffusion Mobility) 모델, Impact ionization 모델을 사용하였으며 시뮬레이션에서의 온도는 온도상승에 따른 전기적 특성의 변화를 제한하기 위하여 300K로 설정하였다. 아래의 표 1은 질화물 반도체의 물성값들을 나타내며 전자친화도, 밴드갭 에너지, 유전율, 이동도, 포화속도 등을 보여준다.

물리 모델은 다음과 같다.

$$G = \alpha_n |\vec{J}_n| + \alpha_p |\vec{J}_p| \quad (1)$$

$$\alpha_n = AN \exp \left[- \left(\frac{BN}{E} \right)^{\beta n} \right]$$

$$\alpha_p = AP \exp \left[- \left(\frac{BP}{E} \right)^{\beta p} \right]$$

위 식은 impact ionization 모델의 수식이며 G는 전자-정공쌍의 local generation rate를 α_n 과 α_p 는 Selberherr 의 impact ionization model의 coefficient를 J_n 과 J_p 는 current density를 나타낸다. E는 electric field, α 와 β 는 각각 electron과 hole의 impact ionization coefficient를 나타낸다. AN, BN, AP, BP등은 물질 고유의 값으로 본 시뮬레이션에서는 여타 논문과 매뉴얼을 참고하여 적용하였으며 이 값은 AlGaN과 GaN 에 동일하게 적용되었다.

$$\mu_n(E) = \mu_{n0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{n0} E}{V_{SATN}} \right)^{BN}} \right]^{1/BN}$$

$$\mu_p(E) = \mu_{p0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{p0} E}{V_{SATP}} \right)^{BP}} \right]^{1/BP} \quad (2)$$

위 식에서 V_{satn} 과 V_{satp} 는 전자와 정공의 포화 속도이며 BN과 BP는 mobility와 관련된 fitting 파라미터, 그

리고 μ_{no} 와 μ_{po} 는 전자와 정공의 low field mobility를 나타낸다.^[10~11]

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

(1) Al-mole fraction 과 AlGaN 층의 두께에 따른 DC특성

AlGaN 층의 Al-mole fraction 은 AlGaN의 밴드갭을 형성하는데 중요한 역할을 하며 AlGaN/GaN 계면에서의 불연속성을 증가시킨다. 또한 분극효과에도 영향을 주어 결과적으로 2DEG 채널에 형성되는 전하량을 증가시키는데 이를 확인하였고 최적의 Al-mole fraction 값을 찾기 위해 0.1에서 0.45 로 변화시키며 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 2는 Al-mole fraction 변화에 따른 2DEG 의 농

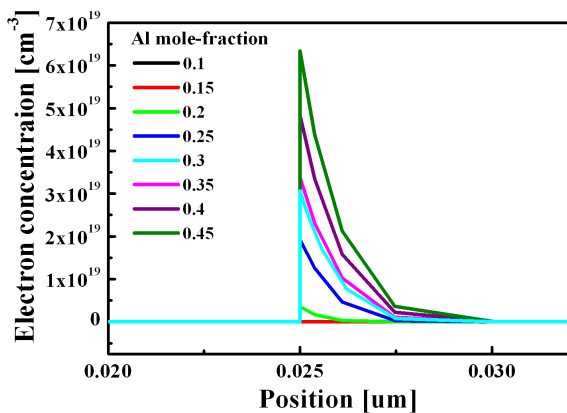


그림 2. Al-mole fraction 에따른 2DEG 채널의 농도
Fig. 2. 2-Dimensional Electron Gas concentrations for different Al-mole fractions.

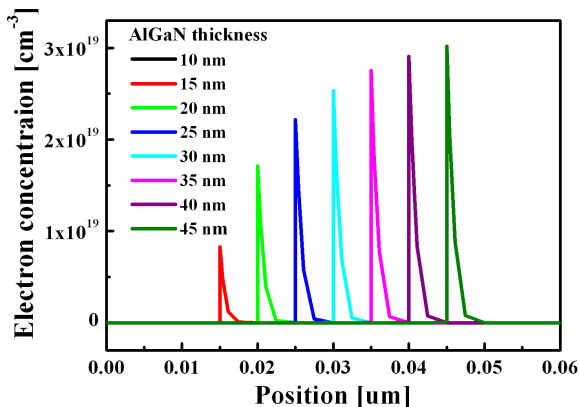


그림 3. AlGaN 층의 두께에 따른 2DEG 채널의 농도
Fig. 3. 2-Dimensional Electron Gas concentrations as a function of the AlGaN layer thickne.

도 변화를 나타내는데 그림에서 볼 수 있듯이 Al-mole fraction이 0.2인 경우 2DEG 채널이 형성되기 시작하며 0.3일 때 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 0.4일 때 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 등으로 지속적으로 증가한다.

다음으로 Al-mole fraction을 0.3 으로 고정하고 AlGaN 층의 두께를 10 nm에서 50 nm로 변화시키며 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과를 그림 3에서 나타내고 있는데 AlGaN층의 두께가 증가할수록 분극에 의한 전계가 증가하면서 2DEG의 농도가 증가하는 모습을 확인할 수 있다. 하지만 AlGaN층의 두께 증가에 따라 전극과 채널간의 거리도 증가하게 된다.

그림 4는 Al-mole fraction 변화에 따른 Id 특성과 Transconductance 특성을 나타내고 있다. 그림 2에서 확인할 수 있듯이 Al-mole fraction 이 증가함에 따라 2DEG 채널의 농도가 증가하기 때문에 그에 따라 드레인 전류와 Transconductance 증가하게 된다. 그림 4를 보면 Al-mole fraction 의 변화에 따른 $V_g=0 \text{ V}$ 에서 드레인 전압을 0에서 10 V 까지 증가시키며 드레인 전류와 Transconductance 특성을 나타내는데 0.1, 0.2일 때는 드레인 전류가 흐르지 않으며 0.2이상일 때부터 흐르기 시작하여 0.45 까지 지속적으로 증가하며 트랜스 컨덕턴스 또한 증가하는 것을 확인하였다.

다음으로 AlGaN 층의 두께 변화에 따라 $V_g=0 \text{ V}$ 에서 드레인 전압을 0에서 10 V 까지 증가시키며 드레인 전류와 트랜스 컨덕턴스 특성을 확인한 결과 그림 5에서와 같이 AlGaN층의 두께가 10, 50 nm 일 때는 드레인 전류가 흐르지 않으며 15 nm에서 23 mA/mm 로 시작하여 45 nm 일 때 363 mA/mm 까지 증가한다. 트랜스 컨덕턴스는 Id 특성에서와 동일하게 10,50 nm 일 때

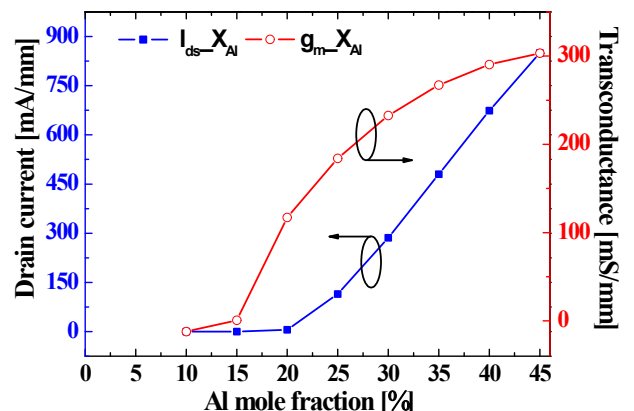


그림 4. Al-mole fraction 에 따른 Id와 gm 특성곡선
Fig. 4. Id and gm curves as a function of Al-mole fraction.

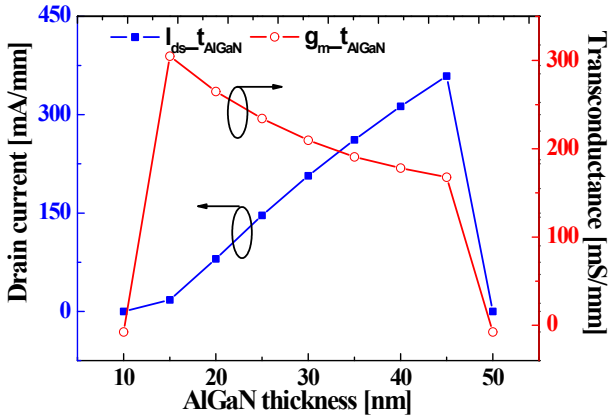


그림 5. AlGaN 층 두께에 따른 I_d 와 g_m 특성

Fig. 5. I_d and g_m curves as a function of the AlGaN layer thickness.

는 값이 나타나지 않았으며 15nm에서부터 나타나기 시작하여 45nm 에 이르기까지는 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 위 그림 3에서 볼 수 있듯이 AlGaN 층의 두께 증가에 따라 2DEG 농도가 증가하기 때문에 드레인 전류 또한 증가하는 것이다. 하지만 트랜스컨덕턴스의 경우 AlGaN 층의 두께 증가에 따라 전극과 채널간의 거리가 증가하여 감소하는 특성을 보인다.

(2) 전극의 크기와 위치에 따른 RF특성

그림 5는 L_{SG} , L_{GD} 를 $2\mu\text{m}$ 로 고정시킨 후 L_G 길이에 따른 f_T , f_{max} 를 타내는데 L_G 길이가 $1.2\mu\text{m}$ 에서 $0.12\mu\text{m}$ 로 줄어들며 따라 f_T , f_{max} 가 증가하는 모습을 나타낸다. 아래 식(1)에서와 같이 L_G 가 감소함에 따라 f_T 가 증가하며 그에 따라서 식(2)에서 f_{max} 또한 증가하기 때문이다.^[12]

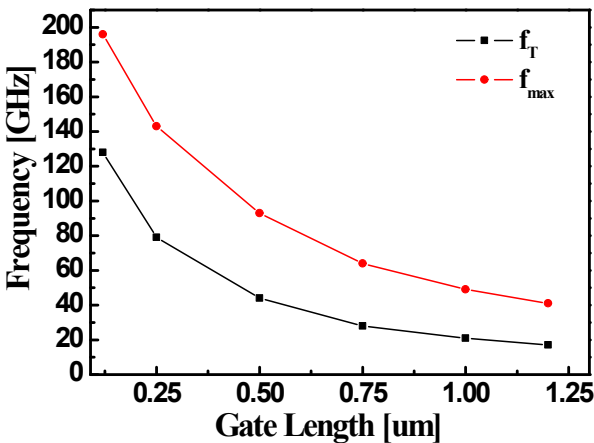


그림 6. Gate 길이에 따른 f_T and f_{max}

Fig. 6. L_G dependence of f_T and f_{max} .

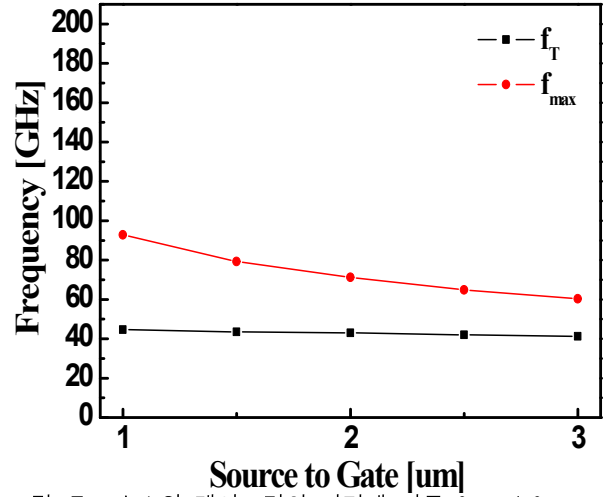


그림 7. 소스와 게이트간의 거리에 따른 f_T and f_{max}

Fig. 7. L_{SG} dependence of f_T and f_{max} .

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi \times C_{gs}} = \frac{V_S}{2\pi \times L_g} \quad (3)$$

$$f_{max} = \frac{f_T}{2\sqrt{r_1 + f_T \times 2\pi \times R_g \times C_{gd}}} \quad (4)$$

다음으로 그림 6은 $L_G=1\mu\text{m}$, $L_{GD}=2\mu\text{m}$ 로 설정한 후 L_{SG} 길이에 따른 f_T , f_{max} 를 보여주고 있는데 L_{SG} 길이가 증가에 따라서 f_{max} 는 감소하는 반면 f_T 는 일정한 값을 갖는다. 이러한 이유는 식 1에서와 같이 L_{SG} 가 감소하면 g_m 이 증가하지만 C_{gs} 도 그에 따라 증가하기 때문에 f_T 는 일정하게 유지된다.

그림 7은 $L_G=1\mu\text{m}$, $L_{SG}=2\mu\text{m}$ 로 고정시키고 시뮬레이션을 진행한 결과이다. L_{GD} 가 $3\mu\text{m}$ 에서 $1\mu\text{m}$ 로 감소함에 따라 f_T , f_{max} 가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 차세대 고효율, 고주파용 전력소자로 주목받고 있는 GaN HEMT의 연구를 위해 소자 모델링과 구조 최적화를 위한 DC 및 RF 특성을 확인하였다. Al-mole fraction 과 AlGaN 층의 두께에 대한 DC 특성 확인 결과 Al-mole fraction 이 0.2 미만일때는 2DEG 채널이 형성되지 않으며 0.2이상의 값을 가질 때부터 소자의 DC특성이 향상되는데 0.4이상의 값을 가지면 공정상의 어려움이 발생하므로 0.2에서 0.3 사이의 값이 최적의 값으로 사료된다. 또한 AlGaN층의 두께는 10nm 이전과 50nm 때는 2DEG 채널이 형성되지 않으

며 최소 15nm 이상에서 안정적인 DC특성이 나타나는 것을 확인하였다. 따라서 15~45nm 가 최적의 두께임을 알 수 있었다.

L_G , L_{SG} , L_{GD} 에 따른 RF 특성 확인 결과 L_G 가 가장 큰 영향을 끼치며 L_G 길이가 짧으면 짧을수록 f_T , f_{max} 가 향상되는 것을 알 수 있었다. 이상에서의 연구 결과를 통하여 AlGaIn/GaN HEMT 소자 제작 시 효과적인 방향을 제시하고 우수한 고출력/고전압을 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

IV. Acknowledgement

This work was supported by the IT R&D program of MKE/IITA. [2007-F-044-02, Development of GaN power amplifier for 4G base station

참 고 문 헌

[1] M. J. Manfra, N. Weimann, Y. Baeyens, P. Roux, and D. M. Tennant, "Unpassivated AlGaIn/GaN HEMTs with CW power density of 3.2W/mm at 25GHz grown by plasma-assisted MBE", IEEE Electron. Lett., Vol.39, No.8, pp. 694 - 695, 2003.

[2] U. K. Mishra, P. Parikh, and Y.-F. Wu, "AlGaIn/GaN HEMTs - an overview of device operation and applications," IEEE, Vol. 90, pp. 1022-1031, 2002.

[3] 정강민, 김수진, 김재무, 김희동, 김태근, "AlGaIn/GaN HEMT의 분극현상에 대한 3D 시뮬레이션", 전자공학회논문지, 제 47권, 제 10호, SD 편, 23-28쪽, 2010년 10월.

[4] P.M. Asbeck, E.T. Yu, S.S. Lau, G.J. Sullivan. Van Hove and J. Redwing, "Piezoelectric charge densities in AlGaIn/GaN HFETs", Electron. Lett. 3, pp. 1230-1231, June 1997.

[5] S. Russo, A. D. Carlo, "Influence of the Source-Gate Distance on the AlGaIn/GaN HEMT Performance.", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 54, No. 5, pp.1071-1075, May., 2007.

[6] M. S. Shur, "GaN based transistors for high power applications," Solid-State Electronics, Vol. 42, pp. 2131-2138, 1998.

[7] S.K. Davidsson, M. Gurusingham, T.G. Andersson and H. Zirath, "The influence of composition and unintentional doping on the two-dimensional electron gas density in AlGaIn/GaN

heterostructure", Journal of Electronic Materials. 33, pp. 440-444, 2004.

[8] ATLAS Device Simulator, SILVACO International 2007.

[9] A. F. M. Answer and Elias W. Faraclas, "AlGaIn/GaN HEMTs: Experiment and simulation of DC characteristics," Solid-State Electronics, Vol. 50, 1998, pp. 1051-1056

[10] K. Kunihiro, K. Kasahara, Y. Takahashi, and Y. Ohno, "Experimental evaluation of impact ionization coefficients in GaN" IEEE Electron Device Lett., 20, p. 608 - 610, 1999.

[11] Vassil Palankovski and Rudiger Quay, Analysis and Simulation of Heterostructure Devices (Springer, Wein New York, 2004).

[12] C. H. Oxley and M. J. Uren, "Measurements of Unity Gain Cutoff Frequency and Saturation Velocity of a GaN HEMT Transistor" IEEE Trans. Electron Devices., 52, 2, p. 165-169, 2005.

저 자 소 개



손 성 훈(정회원)
2010년 세종대학교 전자공학과
학사 졸업
2010년~현재 고려대학교 대학원
전기전자전파공학과 석사
과정
<주관심분야 : 반도체>



김 태 근(정회원)-교신저자
1997년 고려대학교 전자공학과
박사졸업.
1997년~1998년 ECE Dept.,
University of California,
San Diego, USA,
Research Fellow
1998년~2001년 Electrotechnical Laboratory
(ETL), Japan, NEDO Fellow
2001년~2002년 삼성종합기술원 포토닉스 랩
전문연구원
2002년~2004년 광운대학교 반도체 및 신소재
공학과 조교수
2004년~현재 고려대학교 전기전자전파공학부
교수
<주관심분야 : 반도체>