

논문 2010-47SD-10-4

AlGaIn/GaN HEMT의 분극 현상에 대한 3D 시뮬레이션

(3D Simulation on Polarization Effect in AlGaIn/GaN HEMT)

정 강 민*, 김 재 무*, 김 희 동*, 김 동 호*, 김 태 근**

(Kang Min Jung, Jae Moo Kim, Hee Dong Kim, Dong Ho Kim, and Tae Geun Kim)

요 약

본 논문에서는 AlGaIn/GaN HEMT의 분극에 의한 전기적인 특성과 구조적인 특성에 대해서 분석하였다. AlGaIn barrier 층의 두께의 물리적인 변화에 따라서 이차원 전자가스 채널의 농도 변화가 이루어지는 것을 바탕으로 DC 특성 및 분극을 고려한 최적화된 구조에 대해서 시뮬레이션을 진행하였다. AlGaIn의 Al 분율이 0.3 몰에서 0.4 몰로 증가할수록 분극에 의한 bound sheet charge가 16 % 증가하며 그에 따라서 Id-Vd 특성 역시 37% 증가하게 된다. 또한 AlGaIn 층의 두께가 17 nm에서 38 nm로 증가할수록 Id-Vd의 특성이 증가하다가 임계두께인 39nm에 이르게 되면 AlGaIn층의 relaxation에 의해서 급격하게 특성이 나빠지는 것을 알 수 있다.

Abstract

In this paper, we investigated the polarization effects on the electrical and structural characteristics of AlGaIn/GaN HEMT. Both the Al mole-fraction and the barrier thickness of AlGaIn, which determine the profiles of a two-dimensional electron gas, were simulated to obtain the optimum HEMT structure affecting the polarization effect. As a results, we found that the amount of bound sheet charges was increased by 16% and the maximum drain current density ($I_{D,max}$) was increased by more than 37%, while Al mole fractions are changed from 0.3 to 0.4. We also observed a 37 % improvement in maximum drain current density ($I_{D,max}$) by increasing AlGaIn layer thickness from 17 to 38 nm. However when AlGaIn layer thickness reached the critical thickness, DC characteristics were dramatically lowered due to 'bulk' relaxation in AlGaIn layer.

Keywords : GaN, HEMT, Polarization

I. 서 론

개인 이동통신을 비롯한 위성통신 및 군통신 등 각종 무선 통신 기술의 급격한 발달과 수요 증가에 따라 고도의 정보처리 기술이 가능한 고출력/고주파 소자의 필요성이 증가하고 있다.^[1-2] GaN 물질은 큰 에너지 밴드

갭으로 높은 항복 전압과 높은 전자 포화 속도, 우수한 전하이동도 및 높은 열전도도로 인해 고온 동작에도 우수한 특성을 지니므로써 차세대 고출력/고주파 분야의 반도체 소자로써 전 세계적으로 연구가 활발히 이루어지고 있다.^[3-4]

특히, AlGaIn/GaN 이종접합 구조는 두 물질 간의 큰 전도대의 불연속성으로 인해 발생하는 이차원 전자가스 채널을 이용하여 높은 전하이동도, 높은 항복전압 및 우수한 고출력 특성을 얻는 것이 가능하다.^[5-6] 또한 GaN 물질은 결정구조인 wurtzite의 비대칭성 구조로 인해서 물질 내부에 극성이 존재, 기본적으로 자발 분극 현상이 발생하게 된다. 그리고 GaN 물질과 AlGaIn 물

* 학생회원 ** 정회원, 고려대학교 전자전기공학과
(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: 2009년10월26일, 수정완료일: 2010년4월27일

질을 접합시키게 되면 두 물질간의 격자 상수 차이로 인해 스트레스가 가해지게 되고 그에 따라서 유도 분극 현상이 발생하게 된다. 이렇게 발생한 자발, 유도 분극 현상에 의해 일반적인 AlGaAs/GaAs HEMT 소자에 비해서 2차원의 전자가스 채널에 전하량이 더욱 큰 값을 갖게 됨으로써 우수한 특성을 보여주게 된다.^[7]

이러한 분극현상은 AlGaIn/GaN HEMT 소자에서 AlGaIn barrier 층의 두께, 몰 분율 등의 물리적인 요소에 의해서 큰 영향을 받고 그에 따라서 2차원 전자가스채널의 농도와 소자의 동작 특성 역시 영향을 받게 된다.

따라서 본 논문에서는 AlGaIn/GaN HEMT의 분극에 따른 전기적인 특성과 구조적인 특성에 대해서 분석을 하였다. 몰 분율과 AlGaIn barrier 층의 두께의 변화에 따라서 2차원 전자가스 채널의 농도가 변하는 것을 바탕으로 DC 특성 및 분극을 고려한 최적화된 구조를 제안하였다.

II. 본 론

1. 실험방법

그림 1은 시뮬레이션을 진행한 AlGaIn/GaN HEMT의 모습을 나타내고 있다. GaN 층의 두께는 2 μm이며 몰 분율에 따른 특성을 시뮬레이션 하기 위한 구조에서 AlGaIn 층의 두께는 25nm 로 구성되었으며 두 개의 층 모두 폭은 40 μm로 구성되어 졌다. 게이트의 길이는 0.5 μm, 소스와 게이트(LSG) 그리고 드레인과 게이트간(LGD)의 거리는 2 μm이다. 소스와 드레인 접촉은 저항 접촉으로 n-type으로 1×10¹⁸cm⁻³ 만큼 도핑을 하여서 실제 공정에서 Al 등을 이용해서 저항 접촉을 구현

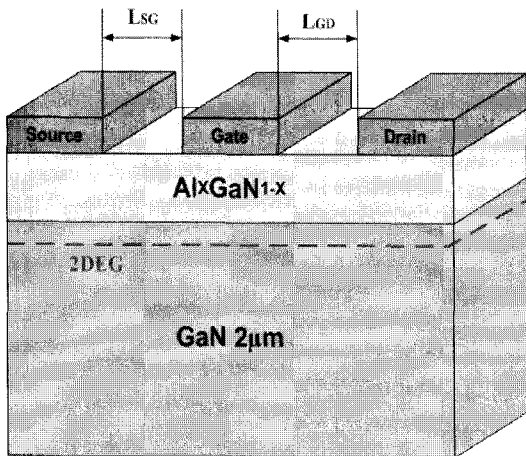


그림 1. AlGaIn/GaN HEMT 소자
Fig. 1. Schematic structure of AlGaIn/GaN HEMT.

한 것을 나타내었으며 게이트는 schottky 접촉으로 일함수는 5.2 eV가 된다. AlGaIn의 몰 농도는 0.3이고 그에 따라서 밴드갭은 3.97 eV이다.

본 논문은 3차원 시뮬레이터인 Silvaco사의 Atlas 프로그램을 이용하여 AlGaIn/GaN HEMT 소자의 분극에 관련된 시뮬레이션을 진행하였다.

AlGaIn/GaN HEMT의 분극 현상을 시뮬레이션으로 구현하기 위해서 아래의 수식이 사용되었다.

$$P_t = PSP + P_{pi} \tag{1}$$

$$P_{pi} = 2 \frac{a_s - a_0}{a_0} \left(E_{31} - \frac{C_{13}}{C_{33}} E_{33} \right) \tag{2}$$

위의 첫 번째 식에서 Pt는 전체 분극을 나타내며 PSP가 유도 분극을 Ppi가 자발 분극을 나타낸다. 또한 두 번째 식에서는 E31과 E33은 piezoelectric constant를 C13과 C33은 elastic constant를 나타낸다. 그리고 as와 a0는 AlGaIn 층과 GaN 층의 lattice constant를 나타낸다.

위의 식을 통해서 나온 분극 값들을 바탕으로 DC 특성 시뮬레이션을 위해 전기장에 의한 전자와 정공의 이동도를 나타낸 fldmob 모델을 사용하였다. 본 모델은 전하가 전기장에 의해서 가속되다가 전기장의 세기가 일정한 크기를 넘어가게 되면 포화가 되어서 더 이상 가속 되지 않는 것을 나타내고 있으며 아래의 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mu_n(E) &= \mu_{n0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{n0} E}{V_{SATN}} \right)^{BN}} \right]^{1/BN} \\ \mu_p(E) &= \mu_{p0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{p0} E}{V_{SATP}} \right)^{BP}} \right]^{1/BP} \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 V_{satn}과 V_{satp}는 전자와 정공의 포화 속도이며 BN과 BP는 mobility와 관련된 fitting 파라미터로 본

표 1. 시뮬레이션에 사용된 변수
Table 1. Simulation parameters.

Parameter	GaN	AlN
Lattice Constant	3.189 Å	3.112 Å
Spontaneous Polarization	-0.034 C/m ²	-0.09 C/m ²
Piezoelectric Const. (z)	0.67 C/m ²	1.5 C/m ²
Piezoelectric Const. (x, y)	-0.34 C/m ²	-0.53 C/m ²

시뮬레이션에서는 AlGaIn과 GaIn영역에서 각각 1과 2를 사용하였다. 그리고 μ_{no} 와 μ_{po} 는 전자와 정공의 low field mobility를 나타낸다.

표 1에서 나타난 시뮬레이션에 사용된 물질들의 파라미터는 논문과 Silvaco사의 Atlas 매뉴얼을 참고하였다.^[8~11]

2. 실험결과 및 고찰

(1) AlGaIn에서의 Al의 몰 분율

AlGaIn 물질에서의 몰 분율에 따라서 분극 현상이 변하게 되며 그에 따라서 DC 특성 역시 변하게 된다. 그림 2에서는 몰 분율에 따른 분극에 의한 bound sheet charge를 보여주고 있다. AlGaIn 물질의 몰 분율이 0.2 몰에서 0.4 몰로 변함에 따라 유도 분극에 의한 bound sheet charge값은 $2.08 \times 10^{13} \text{ C/m}^2$ 에서 $3.52 \times 10^{13} \text{ C/m}^2$ 으로 자발 분극에 의한 bound sheet charge는 $3.65 \times 10^{12} \text{ C/m}^2$ 에서 $8.54 \times 10^{12} \text{ C/m}^2$ 로 증가함을 알 수 있다. 자발 분극과 유도 분극에 의한 전체 bound sheet charge는 아래의 식 (1)으로 나타낼 수 있다. 분극에 의한 전체 bound sheet charge값은 유도 분극과 자발 분극에 의한 각각의 합으로 이루어져 몰 분율이 증가할수록 $3.18 \times 10^{13} \text{ C/m}^2$ 에서 $4.37 \times 10^{13} \text{ C/m}^2$ 으로 증가하게 됨을 알 수 있게 된다.^[12]

$$\begin{aligned} \sigma(P_{SP} + P_{PE}) &= P(\text{bottom}) - P(\top) \\ &= \sigma(P_{SP}) + \sigma(P_{PE}) \end{aligned} \quad (4)$$

bound sheet charge와 채널의 sheet electron

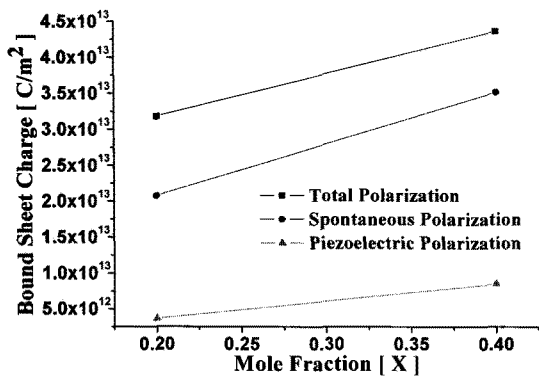


그림 2. 몰 분율의 크기에 따른 분극현상에 의한 bound sheet charge

Fig. 2. Piezoelectric, Spontaneous and Total Polarization bound sheet charge for increasing AlN mole fraction in the AlGaIn layer.

concentration의 관계를 식 (2)에서 보여주고 있다.^[12] 주어진 식에서 $\sigma(x)$ 는 bound sheet charge를 ϵ 는 비유전상수를 d 는 각 층의 두께를 $e\phi_b(x)$ 는 schottky barrier를 ΔEC 는 AlGaIn/GaIn 접합면에서의 conduction band offset을 나타낸다. 즉 몰 분율의 증가에 따른 bound sheet charge의 증가는 채널의 sheet electron concentration을 증가 시키게 되며 이는 그림 3의 결과에서 확인 할 수 있다. 채널의 sheet electron concentration이 0.2몰에서는 $3.74 \times 10^{19} \text{ C/cm}^2$ 이지만 0.4 몰로 몰 분율이 증가하게 되면 $5.47 \times 10^{19} \text{ C/cm}^2$ 으로 증가하게 된다.^[13]

$$n_s(x) = \frac{\sigma(x)}{e} - \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon(x)}{d_{AlGaIn} e^2} \right) [e\phi_b(x) + E_F(x) - \Delta E_C(x)] \quad (2)$$

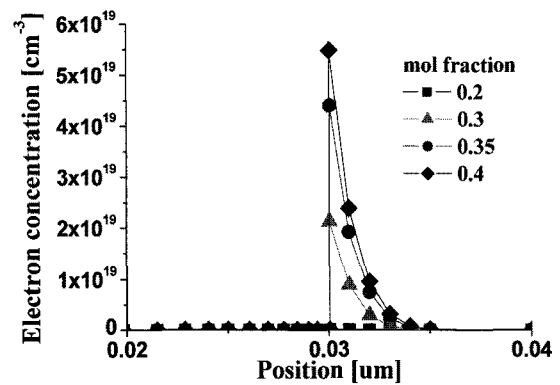


그림 3. 몰 분율에 따른 sheet electron concentration

Fig. 3. Electron concentration profile for increasing AlN mole fraction in the AlGaIn layer.

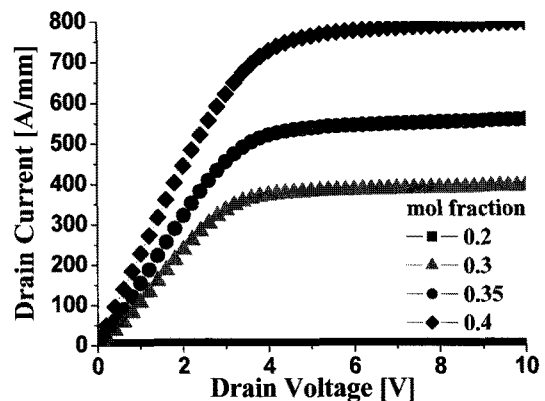


그림 4. 몰 분율에 따른 Id-Vd 특성

Fig. 4. Id-Vd profile for increasing AlN mole fraction in the AlGaIn layer.

그림 4에서는 몰 분율의 따라 게이트 전압이 0V 일 때 Id-Vd 특성이 변하는 것을 보여 주고 있다. 동일한 구조에서 게이트 전압은 0 V, 드레인 전압은 10 V을 주고 몰 분율이 0.3에서 0.4 몰로 증가함에 따라서 채널의 sheet electron concentration이 증가 하게 되고 그에 따라서 드레인 전류가 37 % 증가하게 된다. 또한 본 논문의 시뮬레이션 결과에서는 0.2 몰일 때 소자의 특성이 매우 작음을 볼 수 있는데 이는 소자의 임계 몰 농도로 0.2 몰이라는 것을 의미하게 된다.

(2) AlGaIn 층의 두께

AlGaIn 층의 두께가 증가할수록 채널의 sheet electron concentration이 증가함을 그림 5에서 나타내고 있다. 17nm 일 때는 $2.87 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 지만 점차 AlGaIn 층의 두께가 증가하게 되어서 38nm 일 때는 $4.52 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 의 값을 갖게 된다. 이는 위의 식 (2)에서 AlGaIn 층의 두께를 나타내는 dAlGaIn 의 값이 커질수록 채널의 sheet electron concentration 이 증가함을 알 수 있다.

그러나 AlGaIn 층의 두께가 39nm가 되면 채널의 sheet electron concentration 값이 급격하게 감소하게 된다. 그림 1을 보면 채널의 sheet electron concentration이 39nm 가 되면 $2.12 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 으로 감소됨을 알 수 있다. AlGaIn 층의 두께가 증가할수록 relaxation의 발생 정도가 증가하게 되면서 유도 분극에 의해 발생하는 bound sheet charge가 감소하면서 채널의 sheet electron concentration이 감소하게 되는 것이다.^[14]

그림 6에서는 게이트에 0V를 가했을 때 AlGaIn 층의

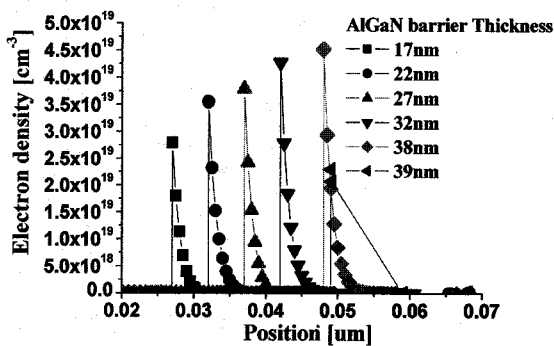


그림 5. AlGaIn 층의 두께에 따른 채널의 전하량
Fig. 5. Electron concentration profile for increasing AlGaIn layer thickness.

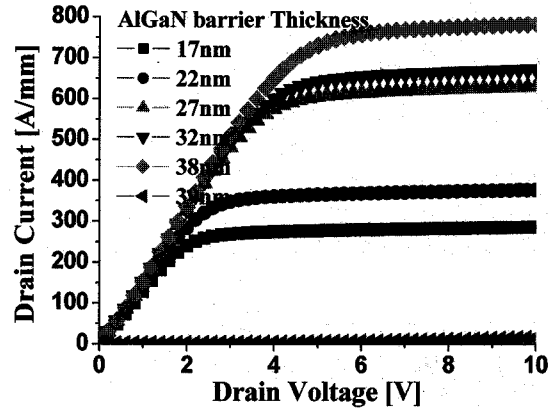


그림 6. AlGaIn층의 두께에 따른 Id-Vd 특성
Fig. 6. Id-Vd profile profile for increasing AlGaIn layer thickness

두께가 증가함에 따라 Id-Vd 특성을 보여 주고 있다. AlGaIn 층의 두께가 증가할수록 드레인 전류의 값이 증가 되다가 39 nm가 되면 드레인 전류 값이 매우 작아 지는 것을 알 수 있다. 이는 AlGaIn 층의 두께에 따른 relaxation에 따라서 채널의 sheet electron concentration이 변하고 그에 따라서 소자의 특성이 나빠지게 되는 것이다. 즉 시뮬레이션의 주어진 조건에서의 소자에서 39 nm가 임계 두께임을 알 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 AlGaIn/GaN HEMT 소자에서 AlGaIn 층에서의 Al 몰 분율과 두께에 따른 분극현상의 변화와 그에 따른 DC 특성의 변화를 3차원 시뮬레이션을 통해서 분석 하였다. 몰 분율이 증가할수록 분극에 의해서 형성되는 bound sheet charge의 증가에 따라서 채널의 sheet electron concentration이 증가하게 된다. 그에 따라서 동일한 구조에서 몰 분율이 0.3에서 0.4로 증가하게 되면 0V의 게이트 전압과 10V의 드레인 전압이 가해졌을 때 드레인 전류의 값이 230 % 증가하게 된다. 또한 AlGaIn 층의 두께는 일정한 두께에 이르기 까지는 두꺼워 지면서 채널의 sheet electron concentration하게 되고 그에 따라서 DC 특성 역시 향상된다. 그러나 AlGaIn 층의 두께가 본 논문의 시뮬레이션이 진행된 소자에서는 39nm에 해당하는 임계두께에 이르게 되면 AlGaIn 층의 relaxation에 의해서 급격하게 특성이 하락됨을 확인 할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 김재무, 김수진, 김동호, 정강민, 최홍구, 한철구, 김태근, "사다리꼴 게이트 구조를 갖는 고내압 AlGaIn/GaN HEMT", 대한전자공학회논문지, 제46권 SD편, 제4호, 10쪽-14쪽, 2009년 4월
- [2] 오영해, 지순구, 서정하, "압전 및 자발 분극을 고려한 단채널 AlGaIn/GaN HEMT의 전류-전압 특성에 관한 해석적 모델", 대한전자공학회논문지, 제42권 SD편, 제12호, 103쪽-112쪽, 2005년 12월
- [3] Zhang N Q, Keller S, Parish G, Heikman S, Denbaars S P and Mishra U K, "High breakdown GaN HEMT with overlapping gate structure", IEEE Electron Device Lett. 21, pp. 373-375, September 2000.
- [4] Wu Y F, Saxler A, Moore M, Smith R P, Sheppard S, Chavarkar P M, Wisleder T, Mishra U K and Parikh P, "30-W/mm GaN HEMTs by field plate optimization", IEEE Electron Device Lett. 25, pp. 117-119, March 2004.
- [5] S.K. Davidsson, M. Gurusinghe, 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.
- [6] A. F. M. Answer and Elias W. Faraclas, "AlGaIn/GaN HEMTs: Experiment and simulation of DC characteristics", Solid-State Electronics. 50, pp. 1051-1056, June 2006.
- [7] 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.
- [8] Device simulation software Atlas, Atlas User's Manual, Silvaco international, 2007.
- [9] F. Bernardini, V. Fiorentini, and D. Vanderbilt, "Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides", Phys. Rev. B. 56, R10024, May 1997.
- [10] K. Tsubouchi, K. Sugai, and N. Mikoshiba, IEEE Ultrason. Symp. 1, 375 (1981)
- [11] Q. Z. Liu, L. S. Yu, F. Deng, and S. S. Lau, Q. Chen, J. W. Yang, and M. A. Khan, "Study of contact formation in AlGaIn/GaN heterostructures", Appl. Phys. Lett. 71, pp. 1658-1660, September 1997.
- [12] O. Ambacher, B. Foutz, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, A. J. Sierakowski, W. J. Schaff, and L. F. Eastman, "Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGaIn/GaN heterostructures", J. Appl. Phys. 87, 334 January 2000.
- [13] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W. J. Schaff, and L. F. Eastman, "Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- And Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures", J. Appl. Phys. 85, 3222-3223, March 1999.
- [14] M.A. Mastroia, J.R. LaRocheb, N.D. Bassima and C.R. Eddy, Jr. "Simulation on the effect of non-uniform strain from the passivation layer on AlGaIn/GaN HEMT", Microelectronics Journal. 36, pp. 705-711, August 2005.

저 자 소 개



정 강 민(학생회원)
 2008년 고려대학교 전기전자전파
 공학부 학사졸업
 2008년~현재 고려대학교 대학원
 전자전기공학과 석사과정
 <주관심분야: 반도체>



김 희 동(학생회원)
 2007년 고려대학교 전자정보
 공학과 학사졸업
 2009년 고려대학교 전자전기
 공학과 석사졸업
 2009년~현재 고려대학교 전자
 전기공학과 박사과정

<주관심분야: 반도체>



김 재 무(학생회원)
 2007년 고려대학교 전자공학과
 학사졸업
 2007년~현재 고려대학교 대학원
 전자전기공학과 석사과정
 <주관심분야: 반도체>



김 태 근(정회원)
 1997년 고려대학교 전자공학과
 박사졸업
 1997년 3월~1998년5월 ECE
 Dept., University of
 California, San Diego,
 USA, Research Fellow

1998년 6월~2001년 2월 Electrotechnical
 Laboratory(ETL), Japan, NEDO Fellow

2001년 3월~2002년 2월 삼성종합기술원
 포토닉스랩 전문연구원

2002년 3월~2004년 5월 광운대학교 반도체 및
 신소재공학과 조교수

2004년 6월~현재 고려대학교 전기전자전파
 공학부 교수

<주관심분야: 반도체>



김 동 호(학생회원)
 2004년 광운대학교 전자재료
 공학과 학사졸업
 2006년 광운대학교 대학원
 전자재료공학과 석사졸업
 2006년~현재 고려대학교 대학원
 전자전기공학과 박사과정

<주관심분야: 반도체>