

논문 2010-47SD-8-1

# $r$ -plane 사파이어 기판 위에 성장한 무분극 $a$ -plane GaN 층의 전기적 비등방성 연구

( A Study of Electrical Anisotropy of  $n$ -type  $a$ -plane GaN films grown  
on  $r$ -plane Sapphire Substrates )

김 재 범\*, 김 동 호\*\*, 황 성 민\*\*\*, 김 태 근\*\*\*\*

( Jae Bum Kim, Dong Ho Kim, Sung Min Hwang, and Tae Geun Kim )

## 요 약

본 논문에서는 무분극 GaN층에서 관찰되는 성장축의 방향성에 따른 전기적 비등방성에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구를 위해  $r$ -plane 사파이어 기판 상에 유기화학기상증착법 (Metal-organic chemical vapor deposition)을 이용하여 600 nm 두께의  $a$ -plane  $n$ -type GaN층을 성장시킨 후, Ti/Al/Ni/Au (20 nm/ 150 nm/ 30 nm/ 100 nm) 오믹 전극을 증착하여 transfer length method (TLM)로 접촉저항을 측정하였다. 그 결과,  $a$ -plane GaN층이 갖는 축의 방향성에 의한 접촉저항이 차이는 없는 것을 확인하였고, 면저항 측정 시에는  $m$ -축 방향에 비해  $c$ -축 방향에서 발생하는 면저항 값이 약 25%~75% 정도 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 전기적 특성의 비등방성은  $c$ -축 성장방향에 대해 수직방향을 갖는 기저적층결함 (basal stacking faults)의 생성으로 인한 전자들의 거동 저하에 의한 것으로 사료된다.

## Abstract

We report on the electrical properties of Ti/Al/Ni/Au (20 nm/ 150 nm/ 30 nm/ 100 nm) Ohmic contacts and the anisotropic conductivity of  $n$ -type  $a$ -plane ([11-20]) GaN grown on  $r$ -plane ([1-102]) sapphire substrates. The Ti/Al/Ni/Au Ohmic contacts and their sheet resistances are characterized by using the transfer length method (TLM) as a function of azimuthal angles. It is found that the specific contact resistance does not depend on the axis orientation and there are significant electrical anisotropy in  $a$ -plane GaN films on  $r$ -plane sapphire substrates, and the sheet resistance varies with azimuthal angles. The sheet resistance values in the direction parallel to  $m$ -axis [1-100] are 25% ~ 75% lower than those parallel to  $c$ -axis [0001] directions. Thus, Basal stacking faults (BSFs) are offered as a feasible source of the anisotropic mobility in defected  $m$ -axis direction because the band-edge discontinuities owing to the differential band gap structure.

**Keywords :** nonpolar  $a$ -plane GaN,  $n$ -type GaN, Ohmic contact, transfer length method, basal stacking faults

학생회원, \*\* 정회원, \*\*\*\* 정회원-교신저자, 고려대학교 전자전기전파공학부

(School of Electronics and Electrical Engineering, Korea University)

\*\*\* 정회원, 전자부품연구원

(Korea Electronics Technology Institute)

※ This work was supported by the IT R&D program (2009-F-022-01) and the International Joint R&D Program (10030797) by the Ministry of Knowledge Economy at Korea Electronics Technology Institute

접수일자: 2010년3월22일, 수정완료일: 2010년7월1일

## I. 서 론

최근 고효율의 질화물 발광다이오드 (light-emitting diodes) 구현을 위한 무분극 (nonpolar) GaN 소재는 일반적인 GaN 소재에서 발생하는  $c$ -축 성장방향으로의 자발분극 (spontaneous polarization)과 압전분극 (piezoelectric polarization) 현상이 발생하지 않아 큰 내부 전위장벽에 의한 quantum Stark effect의 억제, 다중 양자우물 (multiple quantum wells) 내에서의 밴드 변형

의 감소 및 고효율의 전자-정공 재결합 특성을 갖고 있어 높은 밀도의 전류주입 하에서도 파장변화(wavelength shift)가 발생하지 않는 우수한 특성이 보고되고 있다<sup>[1~2]</sup>. 또한, 고품위의 무분극 GaN 에피성장을 위한 심도있는 연구와 함께 전자-정공 캐리어의 주입 및 캐리어의 거동, 무분극 GaN으로부터 방출되는 편광 특성 및 다양한 물리적 특성들에 대해 보고되고 있으며, 광학적 특성 및 물리적 특성의 확보를 위한 많은 연구가 활발히 진행 중이다<sup>[3]</sup>. 이러한 무분극 GaN은 에피성장 시 구조적으로 c-축에 수직한 방향으로 기저적층결함이 성장되는데, 이러한 성장축의 방향성에 따른 전기적 특성에 대해 여러 선행 연구그룹에서 캐리어의 유효질량 및 결함의 방향성 차이에 대한 연구결과를 보고하였다. Chevtchenko *et al.*의 연구에 의하면 a-plane GaN의 표면에 가까운 곳에서 밴드구조가 변형됨으로서 생기는 밴드갭 에너지가 1.1 eV 보다 더 커지게 되고, 이러한 에너지 밴드갭의 변형에 의해 에피층의 표면으로 전자들이 축적되는 현상이 발생하고, 이로 인하여 m-축 GaN에서의 캐리어의 이동도의 비등방적인 전기적 특성이 발생한다고 보고하였다<sup>[4]</sup>. 또한, UCSB의 ERATO/JST 그룹에서는 a-plane p-GaN층을 측정된 결과, m-축 방향으로의 이동도가 c-축 방향에 비해 약 3배 정도 큰 값을 보이며, 이는 축 방향에 따른 정공의 유효질량 차이와 무분극 GaN층의 표면의 에너지 밴드갭 변형 및 이로 인한 비대칭 구조의 생성에 의한 것이라 보고하였다<sup>[5]</sup>. 그러나, m-축 방향에서의 유효질량이 c-축 방향에서보다 4% 가량 크지만, 이것으로 축 방향에 따른 전기적 비등방성을 설명에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 이와 더불어, a-plane n-GaN은 c-축에 수직한 방향으로 높은 밀도의 적층결함(stacking fault)이 생성되는 소재적 특성을 보이는데, 이로 인하여 에너지 밴드갭의 불연속성 발생 및 전자들의 이동 시 산란(scattering)의 증가로 인해 m-축 방향에서의 전자의 이동도가 더 높은 값을 가지게 된다<sup>[6]</sup>. McLaurin *et al.* 그룹의 보고에 따르면 a-plane ([11-20]) 방향에 평행한 정공의 이동도가 c-축 ([0001]) 면에 평행한 정공의 이동도보다 더 큰 값을 갖는다고 보고하였으며, 이는 사파이어 기판 위에 성장한 GaN층의 성장 시 발생하는 적층결함에 의한 것으로 보고하였다<sup>[7]</sup>. 하지만, 이러한 선행연구결과에서도 무분극 GaN 에피층의 성장방향에 따른 전기적 비등방성 생성원인에 대해서는 물리적으로 명확한 규명이 이루어지지 않아서 이에 대한 심도 있는 연구가 필수적으로 요구

된다.

본 논문에서는 r-plane 사파이어 기판 상에 성장된 a-plane GaN층에서 발생하는 전기적 비등방성의 연구를 위하여 Ti/Al/Ni/Au 오믹전극의 접촉저항 특성과 m-축 및 c-축에 따른 각도별 면저항의 특성에 대하여 연구하였다. 연구를 위하여 오믹전극의 전기적 특성은 transfer length method (TLM) 패턴을 사용하였으며, 이를 기반으로 current-voltage (I-V) 특성 측정 및 면저항의 특성의 차이를 확인하였다.

## II. 실험

본 연구를 위하여 r-plane 방향성을 갖는 사파이어 기판 위에 450 nm 두께의 완충층을 1050°C에서 질소와 수소 분위기 하에서 성장한 후, 150 nm 두께의 a-plane ([11-20]) n-GaN층을 성장하였다. 에피층 성장 시, n형 도펀트로 Si를 사용하여 약  $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 의 높은 도핑농도를 갖도록 성장하였고, 시편 표면에 잔존하는 유기세척을 위해  $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 = 4:1$ 의 용액을 만들어서 120°C에서 15분간 세척한 후 탈이온수(deionized water)로 세정하였다. 그 후, 일반적인 노광공정을 이용하여 패드 면적은  $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ , 패드 간격은 5  $\mu\text{m}$  부터 60  $\mu\text{m}$  간격을 갖는 정사각형 형태의 transfer length method (TLM) 패턴을 제작하였다. TLM 패턴 제작 시, 패턴 간 전기적 분리를 위하여  $\text{BCl}_3/\text{Cl}_2$  inductively-coupled plasma/reactive ion etching (ICP/RIE) 법을 이용하여 전식 식각공정을 수행하였고, 시편의 표면에 잔존하는 photoresist 제거를 위하여 40초동안  $\text{O}_2$  plasma 처리해 주었다. 또한, 무분극 GaN층의 오믹전극 형성을 위하여 전자선 증착법(electron-beam deposition)을 이용하여 각각 200 nm, 1500 nm, 300 nm, 1000 nm의 두께를 갖는 Ti/Al/Ni/Au 전극을 증착 후 열처리 하였고, Keithely 4200 parameter analyzer를 이용하여 무분극 GaN층에서 발생하는 오믹 접촉 특성과 m-축 및 c-축에 따른 전기적 비등방성을 연구하였다.

## III. 결과 및 토의

본 연구를 위해서 수행한 TLM 패턴에서 발생하는 접촉저항은 아래 식(1)과 식(2)를 통하여 계산을 하였다.  $R_T$ 는 전체 항을 나타내고,  $R_S$ 는 면저항,  $d$ 는 패드 사이의 간격,  $Z$ 는 접촉의 폭,  $L_T$ 는 이동거리를 나타내는데 이

것은 기울기와 절편을 통하여 나타낼 수 있다. 또한, 전극 사이에서의 저항  $R_C$ 는 다음과 같은 식을 통하여 나타낼 수 있다<sup>[8-9]</sup>.

$$R_C = \frac{\left( \frac{R_T \times R_S \times d}{Z} \right)}{2} \quad (1)$$

$$\rho_c = R_C \times L_T \times Z \quad (2)$$

TLM 방식을 이용한 무분극 GaN 시편들 모두 열처리 전 상태에서 as deposition 상태에서 측정한 결과, 약  $9 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 의 값을 갖는 접촉저항 특성을 확인하였지만, rapid thermal annealing (RTA)을 이용하여 300°C에서 650°C 까지 질소 분위기 하에서 1분 동안 열처리 한 후 측정한 결과, 무분극 GaN 박막과 오믹전극인 Ti/Al/Ni/Au 간 계면에서 발생하는 nitrogen vacancy의 생성 및 Ti의 내부확산 (inter-diffusion)으로 인한 TiN층의 형성으로 인하여 계면에서의 Schottky 장벽 높이 (Schottky barrier height) 상승 및 Schottky 특성이 발생하는 것을 확인하였다.

또한, 그림 1과 같이 RTA 조건을 700°C 이상으로 변화시킨 후 전기적 특성을 분석한 결과, 무분극 GaN 박막에서 발생하는 저항특성은 열처리 전의 상태보다 더 우수한 오믹특성이 발생하는 것을 확인하였고, RTA 조건을 900°C까지 증가시키며 측정한 결과 약  $4.45 \times 10^{-5}$

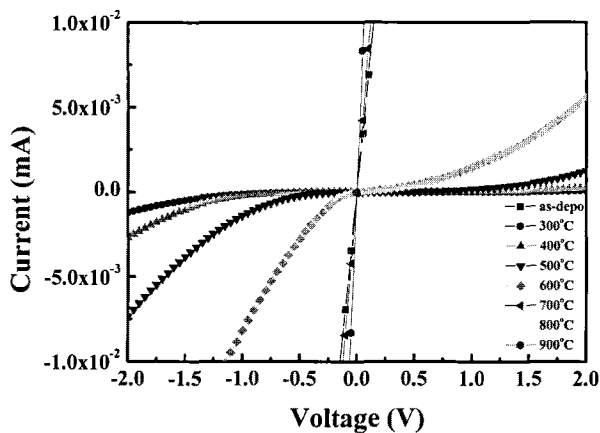


그림 1. 무분극  $n$ -형 GaN의 열처리에 따른 Ti (200 nm) / Al (1500 nm) / Ni (300 nm) / Au (1000 nm)의 접촉저항의 전류-전압 곡선

Fig. 1. I-V Characteristic of Ti (200 nm) / Al (1500 nm) / Ni (300 nm) / Au (1000 nm) contacts on nonpolar  $n$ -type GaN by various annealing temperature.

$\Omega \cdot \text{cm}^2$ 의 가장 작은 값을 갖는 접촉저항 특성을 확인하였다. 본 결과로부터 무분극  $n$ -GaN층의 전극으로 사용된 Ti/Al/Ni/Au 오믹전극은 700°C 이상의 온도에서 RTA 처리하였을 때, as deposition 상태에 비해 우수한 접촉저항 특성이 발생하는 것을 확인하였으며, 그림 2와 같이 700°C 이상으로 RTA 처리해 준 경우 다시 오믹 특성이 관찰되는 이유는 오믹전극으로 사용된 Al층이 Ti층 및 무분극 GaN층으로 침투하여 층반전 (layer inversion) 현상 발생 및 이로 인한 Ti-Al-N 결합층은 무분극 GaN층/오믹전극 간 강한 분극효과를 발생시키게 되며 이로 인하여 계면에서의 높은 밀도를 갖는 2차원 전자가스층 (2-dimensional electron gas)이 생성되어 쇼트키 장벽의 저하 및 전자의 터널링 효과 극대화를 발생시켜 접촉저항 특성을 향상시키는 것으로 사료 된다<sup>[10-11]</sup>.

이러한 결과를 바탕으로 무분극 GaN층의  $m$ -축 및  $c$ -축에 따른 전기적 비등방성을 확인하기 위하여 TLM 패

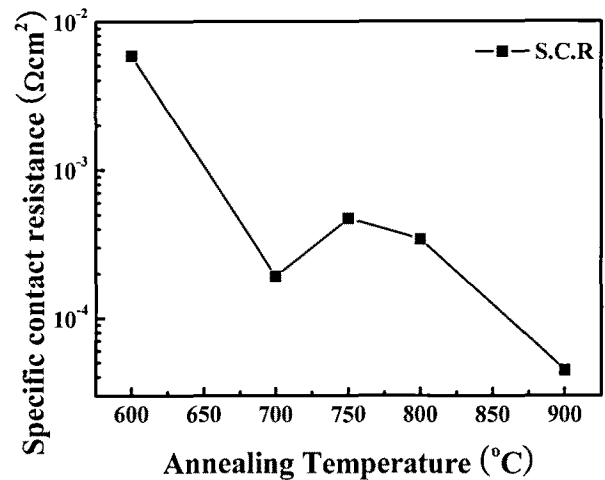


그림 2. 무분극  $n$ -형 GaN의 열처리에 따른 접촉저항의 변화

Fig. 2. Contact Resistivity of nonpolar  $n$ -type GaN by various annealing temperature.

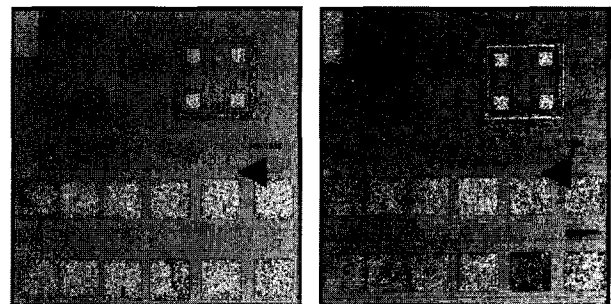


그림 3. TLM 패드의 간격  $d = 5, 10, 20, 40, 60 \mu\text{m}$   
Fig. 3. Transfer Length Method pattern.  $d = 5, 10, 20, 40, 60 \mu\text{m}$ .

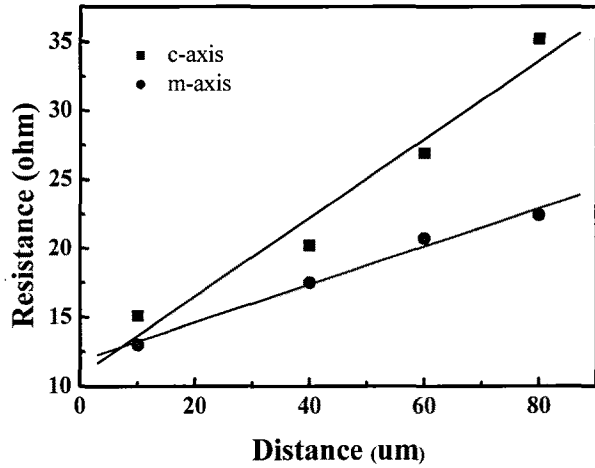


그림 4. 무분극 n-형 GaN의 패드 간격에 따른 저항 변화

Fig. 4. Contact Resistance of nonpolar n-type GaN by pad distance.

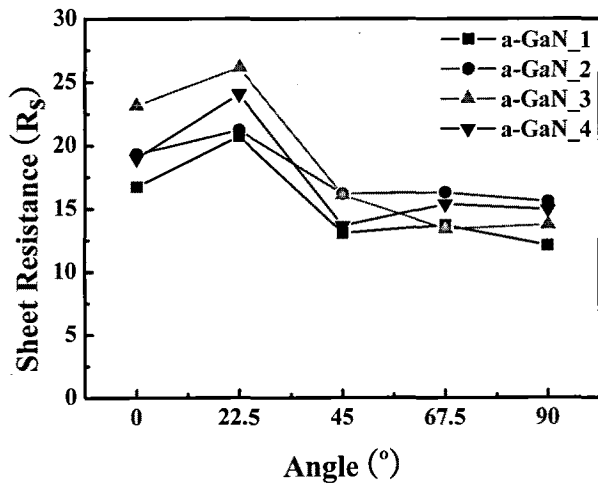


그림 5. 무분극 n-형 GaN의 각도별 면저항 차이

Fig. 5. Sheet Resistivity of nonpolar n-type GaN as a function of azimuthal angles.

턴의 형성방향을 0° (c-축)에서부터 90° (m-축)까지 22.5°의 간격으로 형성하여 무분극 GaN층에서 발생하는 전기적 비등방성 연구를 수행하였다. 아래의 그림 3은 노광공정 후 Ti/Al/Ni/Au 오믹전극을 증착하고 700°C에서 RTA 처리해 준 광학 현미경 사진이며, 이를 통하여 무분극 GaN층의 표면에 존재하는 성장 축의 방향에 따른 TLM 패턴의 형상을 보여준다.

이를 바탕으로 전기적 특성을 분석한 결과, 그림 4와 같이 TLM 패턴의 패드 간격에 따라서 m-축에서 발생하는 저항값보다 c-축에서 측정된 저항값의 증가가 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 또한, 그림 5와 같이 4-point probe를 이용해 측정된 면저항 특성 역시, c-축에서의 면

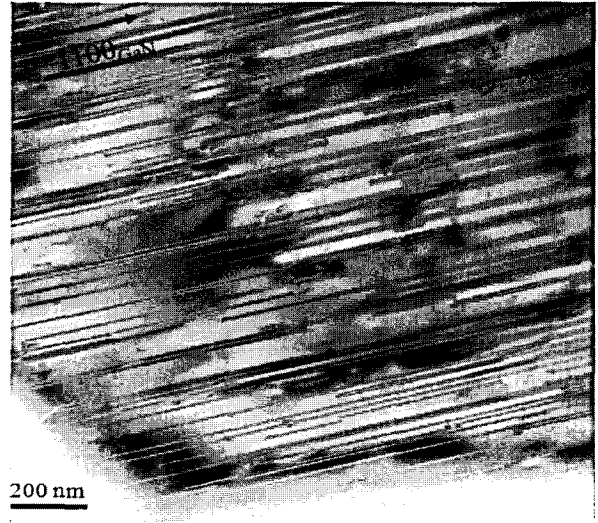


그림 6. 무분극 n-형 GaN의 평면도 TEM 사진

Fig. 6. Plane-view TEM image of nonpolar n-GaN.

저항 값이 m-축보다 약 25%~75% 정도 증가하는 것을 확인하였다. 이는 무분극 GaN층의 성장 시 발생하는 기저적층결함 (Basal stacking fault)에 의해 에너지 밴드갭의 불연속성이 생성되고, 이로 인해 기저적층결함이 발생하는 면에서는 일반적인 GaN의 격자구조인 wurtzite 구조가 아닌 zinc-blende 구조로 변하게 되어 이로 인해 발생하는 전위장벽에 의한 것으로 사료된다<sup>[5]</sup>.

따라서 본 연구에서 사용된 무분극 GaN 시료의 격자 상태 (crystal quality) 및 c-축에 수직인 방향으로 생성되는 기저적층결함을 확인을 위하여 투과전자현미경 (transmission electron microscopy)을 이용하여 구조적인 분석을 수행하였다.

그 결과, 그림 6에서 보는 바와 같이, 기저적층결함이 m-축 방향으로 형성되어 있음을 확인하였고, 결함밀도가  $3.2 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 로 계산되었다. 앞서 언급한 바와 같이 기저적층결함은 사파이어 기판과 무분극 GaN층 간 격자 불일치 (및 물성차이)로 인해 GaN층 내부에서의 에너지 밴드갭의 불연속성을 만들고, 그 결과 전자들의 이동을 억제하는 효과를 줄 수 있다. 따라서 앞서 연구한 TLM 패턴을 이용한 전기적 특성 분석 시, 비교적 기저적층결함의 영향을 적게 받는 m-축으로 생성된 패턴에 비해 생성된 기저적층결함과 수직방향을 이루는 c-축에서의 저항값의 증가가 더욱 우세하며, 이와 같은 면저항 특성에서의 m-축 및 c-축에 따른 차이는 무분극 GaN층의 기저적층결함 형성방향과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다<sup>[4]</sup>.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 무분극 n-GaN 박막 위에 Ti/Al/Ni/Au 다중 금속층을 증착하여 오믹 특성에 대한 연구와 축 방향에 따른 면저항 차이에 대한 연구를 진행하였다. 700°C 이상의 RTA 처리를 통하여 열처리 전 상태에 비해 보다 우수한 약  $4.45 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 의 접촉저항을 갖는 오믹접촉을 확보하였다. 또한, 무분극 GaN 시편의 축 방향에 따른 TLM 분석결과, *c*-축의 면저항 값보다 *m*-축에서의 면저항 값이 약 25%~75% 더 작은 특성을 갖는 것을 확인하였다. 이러한 축 방향에 따른 저항특성의 차이는 무분극 GaN층의 성장 시 발생하는 기저적층결함 (Basal stacking faults)에 의한 에너지 밴드갭의 불연속성 생성 및 이로 인해 기저적층결함이 발생하는 면에서의 zinc-blende 구조의 GaN 성장면이 발생하여 내부적인 전위장벽을 상승시키는 현상에 의한 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] F. Bernardini, V. Fiorentini, and D. Vanderbilt, "Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides," *Phys. Rev. B*, Vol. 56, p.p. R10024 - R10027, 1997.
- [2] C. Chen, V. Adivararahan, J. Yang, M. Shatalov, E. Kuokstis and M. Asif Khan, "Ultraviolet Light Emitting Diodes Using Non-Polar *a*-Plane GaN-AlGaN Multiple Quantum Wells," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 42, p.p. L1039-L1040, 2003.
- [3] D. Iida, M. Iwaya, S. Kamiyama, H. Amano, and I. Akasaki, "Activation energy of Mg in *a*-plane Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N (0<x<0.17)," *Phys. Stat. Sol. (b)*, Vol. 246, p.p. 1188-1190, 2009.
- [4] S. Chevtchenko, X. Ni, Q. Fan, A. A. Baski, and H. Morkoc, "Surface band bending of *a*-plane GaN studied by scanning Kelvin probe microscopy," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, p.p. 122104-122107, 2006.
- [5] M. McLaurin, T. E. Mates, F. Wu, and J. S. Speck, "Growth of *p*-type and *n*-type *m*-plane GaN by molecular beam epitaxy," *J. Appl. Phys.* Vol. 100, p.p. 063707-063714, 2006.
- [6] M. McLaurin, and J. S. Speck, "*p*-type conduction in stacking-fault-free *m*-plane GaN," *physica status solidi-Rapid Research Letters (RRL)*, Vol. 1, No. 3, p.p. 110-112, 2007.
- [7] M. McLaurin, T. E. Mates, and J. S. Speck, "Molecular-beam epitaxy of *p*-type *m*-plane GaN," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 86, p.p. 262104-262107, 2005.
- [8] Gregory S. Marlow, and Mukunda B. Das, "The effects of contact size and non-zero metal resistance on the determination of specific contact resistance," *Solid-state Electronics*, Vol. 25, p.p. 91-94, 1982.
- [9] J. S. Foresi, and T. D. Moustakas, "All electronic generation of 880 fs, 3.5 V shockwaves and their application to a 3 THz free space signal generation system," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 62, p.p. 22-25, 1993.
- [10] Y.-L. Wang, F. Ren, U. Zhang, Q. Sun, C. D. Yerino, T. S. Ko, Y. S. Cho, I. H. Lee, J. Han, and S. J. Pearton, "Improved hydrogen detection sensitivity in N-polar GaN Schottky diodes," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 94, p.p. 212108-212111, 2009.
- [11] D. K. Schroder, "Semiconductor Material and Device Characterization", (Wiley and Sons, NY 1990).
- [12] D. N. Zakharov, and Z. Liliental-Weber, "Structural TEM study of nonpolar *a*-plane gallium nitride grown on (11 $\bar{2}$ 0) 4H-SiC by organometallic vapor phase epitaxy," *Phys. Rev. B*, 71, p.p. 235334-235343, 2005.

저 자 소 개



김 재 범(학생회원)  
 2008년 한성대학교 전자공학과  
 학사 졸업  
 2008년~현재 고려대학교  
 전자전기전파공학부  
 석사과정

<주관심분야 : 반도체>



황 성 민(정회원)  
 2000년 고려대학교 재료공학과  
 박사 졸업  
 2000년~2003년 LG전자기술원  
 선임 연구원  
 2003년~2006년 삼성종합기술원  
 전문 연구원

2006년~현재 전자부품연구원 책임연구원  
 <주관심분야 : 반도체>



김 동 호(정회원)  
 2004년 광운대학교 전자재료  
 공학과 학사 졸업  
 2006년 광운대학교 대학원 전자  
 재료공학과 석사 졸업  
 2006년~현재 고려대학교 전자  
 전기공학과 박사과정

<주관심분야 : 반도체>



김 태 근(정회원)-교신저자  
 1997년 고려대학교 전자공학과  
 박사 졸업  
 1997년~1998년 ECE Dept.,  
 Univ. of California, San  
 Diego, USA, Research  
 Fellow

1998년~2001년 Electrotechnical Lab. (ETL),  
 Japan, NEDO Fellow  
 2001년~2002년 삼성종합기술원 포토닉스 랩  
 전문연구원  
 2002년~2004년 광운대학교 반도체 및  
 신소재공학과 조교수  
 2004년~현재 고려대학교 전기전자전파공학부  
 교수  
 <주관심분야 : 반도체>