

논문 15-7-6

# AlGaIn/GaN 이종접합 디바이스를 위한 GaN 에피층의 전기적 특성

## Electrical Characteristics of GaN Epi Layer on Sapphire Substrates for AlGaIn/GaN Heterostructures

문도성  
(Do-Soung Moon)

### Abstract

In this work, epitaxial GaN is grown on sapphire substrate in AlGaIn/GaN heterostructures. Deliberate oxygen doping of GaN grown by MOVPE has been studied. The electron concentration increased as a function of the square root of the oxygen partial pressure. Oxygen is a shallow donor with a thermal ionization energy of  $27 \pm 2$  meV measured by temperature dependent Hall effects. A compensation ratio of  $\theta=0.3 \sim 0.4$  was determined from Hall effect measurements. The formation energy of  $O_N$  of  $E^F=1.3eV$  determined from the experimental data, is lower than the theoretically predicted value.

**Key Words** : GaN, Heterostructure, Hall effect

### 1. 서론

III-V족 질화물의 성장과 디바이스 생성기술의 발전은 광전자 디바이스와 함께 전자 디바이스의 영역에서도 응용의 범위를 넓혀왔다[1,2,18,19]. 전자 소자에의 응용에서, AlGaIn/GaN HFET는 마이크로파와 밀리미터파-전자디바이스 분야의 응용에 큰 기대를 가지고 있다[3-5].

그러나, 이 디바이스들의 동작이 이론적 예상과는 달리 큰 차이를 보이고 있다[6]. 문제 해결을 위해 구조 설계의 개량과 함께 AlGaIn/GaN HFET 재료의 품질 향상이 반드시 뒷받침 되어야 한다.

실험 결과의 정확성을 위해서, 좋은 음성 접촉은 필수적인데, 재료의 품질과 음성 접촉을 담보하고, 샘플의 특성을 밝히기 위해 다양한 방법이 사

용되었다.

도핑 되지 않은 GaN 에피층의 n형의 전도도의 원인 규명은 지속적인 관심사가 되어왔는데, GaN 에피층의 전자농도의 범위는 대략  $10^{16} \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$  이다. n형 전도도의 발생원인은 질소-공위이지만, 산소와 실리콘의 잔유 불순물이 높은 전도도의 주요 원인인 것으로 생각된다[7]. 산소는 GaN 내에서 도너로서 행동하는 질소를 대체하는 것으로 생각된다. 의도적 도핑이 없는 GaN에 대한 이차 이온 스펙트로 스코프 연구는 O와 Si의 고농도를 보인다[8-10]. 산소의 근원은 MOVPE법을 사용하는 동안 이용한 암모니아인 것으로 생각된다. 의도적으로 산소 도핑된 고품질의 GaN 에피층에 대해 연구되었다. 도핑에 따라서, 전자의 농도는  $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  에서  $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 에 이르렀다. 산소는 GaN에서 단순한 도너로서 작용하였다. 결합 등가연구에서, 대체 산소의 형성 에너지가 계산되었다.

### 2. 실험방법

GaN 에피층은 사파이어 기판 상에 1기압하의

서울산업대학교 전자정보공학과  
(서울시 노원구 공릉동 172번지,  
Tel : 02-970-6458  
Fax : 02-970-6125  
E-mail : dsmoon@snut.ac.kr)  
2002년 4월 30일 접수, 2002년 5월 21일 1차 심사 완료,  
2002년 6월 18일 최종 심사 완료

수평 reactor에서, MOVPE법으로 성장되었고, 반응물질은 트리에틸 갈륨과 암모니아를 사용하였다.

도핑 되지 않은 GaN 층의 자유전자 농도와 이동도는 각각  $0.9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 과  $420\text{--}500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 였을 때, 질소 속의 산소의 농도는 각각 20 ppm 과 520 ppm이었는데, 산소-질소 혼합기체를 도판트로 사용하였다. 에피층은 20nm의 GaN 핵형성층, 50nm의 도핑 되지 않은 층과  $2 \mu\text{m}$ 의 산소 도핑된 층으로 이루어졌다. 도핑층의 형성은  $1050^\circ\text{C}$ 에서 형성되었으며, Hall 측정은 van der Pauw 방법으로 이루어졌다. 인듐 접촉은 음성 접촉임이 확인되었다. p형의 도핑은 Mg를 억셉터로 사용하였다. 다른 샘플은  $1.3 \mu\text{m}$ 의 고 절연체인 GaN 에피층에 이어  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$  스페이서와 Si 도핑된  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ 층으로 이루어진다.

### 3. 결과 및 고찰

정류성 접촉은 Hall측정에서, 큰 신호의 동요를 가져오며, I-V 특성의 비대칭적인 거동은 Van der Pauw 방법의 계산의 큰 오류를 가져온다. 특히 광전류 과도 측정에서, 큰 접촉 저항은 큰 시정수(RC)로 인하여 결과적으로, 재료와 디바이스의 시간응답을 제한한다.

그림 1은 다양한 온도에서의 I-V특성을 보여주는데, 선형적 특성은 이상적인 음성 접촉의 거동을 나타낸다.

그림 2는 적정화된 진성의 GaN 에피층으로 형성된 샘플(M-7)과 AlGaIn/GaN의 이중접합구조를 갖는 샘플(M-9)의 Hall 측정의 결과를 보여준다. 샘플(M-7)은 100K에서  $1600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  최고의 이동도를 보여주는데 저온에서, 이온화 불순물 산란이 상대적으로 약하기 때문이다. 한편 샘플(M-9)에서의 완만한 이동도의 증가는 전형적인 2차원적 운송 특성을 나타낸다. 즉 극성 광학적 산란특성과 음향적 산란특성이 지배적이며, 20K에서 최고치인  $5000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 이동도를 나타낸다.

#### 3.1 p형 GaN의 후속 열처리

p형 도핑은 LED 혹은 LD같은 다양한 광전자적 디바이스를 만들기 위한 III-V 질화물의 발전의 중요한 단계이다[11].

Mg 도핑된 GaN에 작은 에너지를 갖는 전자빔을 조사하고, 질소분위기에서 열적 후속열처리하면, p형 전도도를 나타내는 것으로 알려졌다[11].

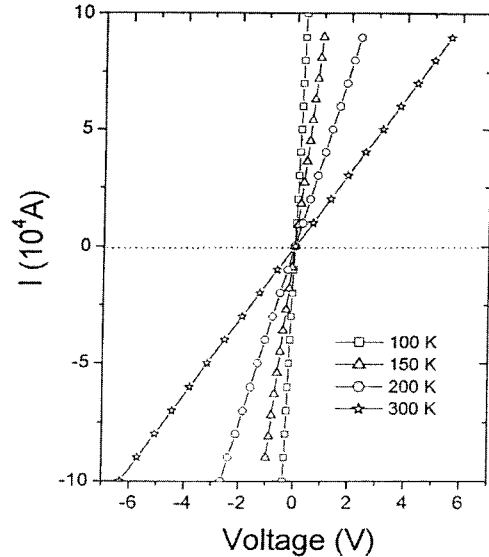


그림 1. 여러 온도에서 측정된 AlGaIn/GaN 시편(M-9)상의 In 접촉의 I-V 특성.

Fig. 1. I-V characteristics of In contacts on an AlGaIn/GaN 2DEG sample measured at different temperatures.

Mg 억셉터는 GaN에서 Ga를 치환하는 것으로 관측되었고, 도핑 농도는  $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 까지 가능했다. 그림에도 불구하고 정공의 농도는 GaN 내의 Mg의 높은 결합에너지 때문에, 2계 낮았다[12].

p형 샘플의 후속열처리는 급열방식으로 이루어졌고, 전형적인 후속 열처리방식은 세 단계 과정을 거친다. 첫째  $200^\circ\text{C}$ 에서 10초간의 후속열처리를 한다. 이 예비 후속열처리는 샘플을 예기치 않은 크랙킹으로부터 보호한다[20,21]. 둘째  $250^\circ\text{C}/\text{sec}$  속도로, 타겟 온도 보다  $20^\circ\text{C}$  낮은 온도로 수초 동안 후속열처리한다. 셋째 정하여진 시간 만큼 타겟의 온도에서 후속열처리한후 전원을 제거한다.

후속열처리 하는동안 샘플은 2L/min 속도로, 질소 분위기에서 이루어진다. 후속열처리 조건을 최적화하기 위하여, 전단계의 후속열처리가 없는 Mg 도우핑된 GaN 샘플 상에 체계적으로 수행되었다. 이 샘플들은 다양한 성장 압력과 Mg 유입량에 아래 MOVPE 법으로 성장되었다. 후속열처리 효과를 확인하기 위하여, 온도 범위  $910\text{--}1030^\circ\text{C}$ 에서 3~60 초 동안 Hall 측정이 이루어졌다. 최적의 후속열처리 조건은  $950^\circ\text{C}$ 에서, 5 초간 임이 p형 샘플

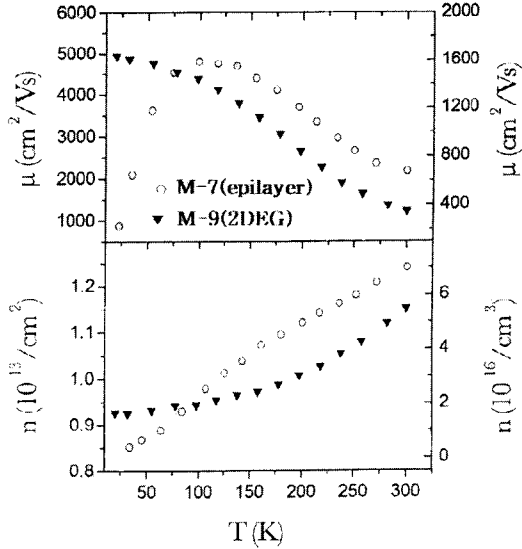


그림 2. MOVPE에 의해 성장된 AlGaIn/GaN 이중 접합(▼)과 GaN 에피층(○)의 온도의존적인 Hall 효과 측정결과.

Fig. 2. Temperature dependent Hall effect measurement results of an AlGaIn/GaN hetero structure(▼) and a GaN epilayer (○) grown by MOCVD.

플에 대해서 밝혔다. 그림 3은 상기 조건하에서 샘플 (M-7)에 대한 실온 Hall 측정 결과를 보여준다. 이동도와 정공 농도의 최고치는 같은 후속 열처리 조건하에서 분명하게 관측될 수 있다.  $\mu \times p$  plot는 직접적인 전도도의 척도가 될 수 있다.

Eg 도핑된 GaN 에피층에 대한 최적의 후속 열처리 조건은 I-V특성곡선에 의하여 확인 가능하고, 그림 4에서 보인 바와 같이, 950 °C에서 5 초간의 후속 열처리된 Mg 도핑된 에피층의 I-V 곡선이, 좋은 선형 특성과 아울러 최고의 전기전도도를 가짐을 보였다. 다른 Mg 도핑 조건을 가진 샘플에 대하여, Hall 측정 결과는 Mg 유량 70 m/min 조건하에 최고의 농도를 나타내었다.

3.2 산소분압에 대한 캐리어 농도의 의존성

질소의 산소 치환에 대한, 결합 평형 방정식으로부터  $O_N$ 농도는 다음과 같이 주어진다[17].

$$[O_N] = K^* P^{1/2}_{O_2} \tag{1}$$

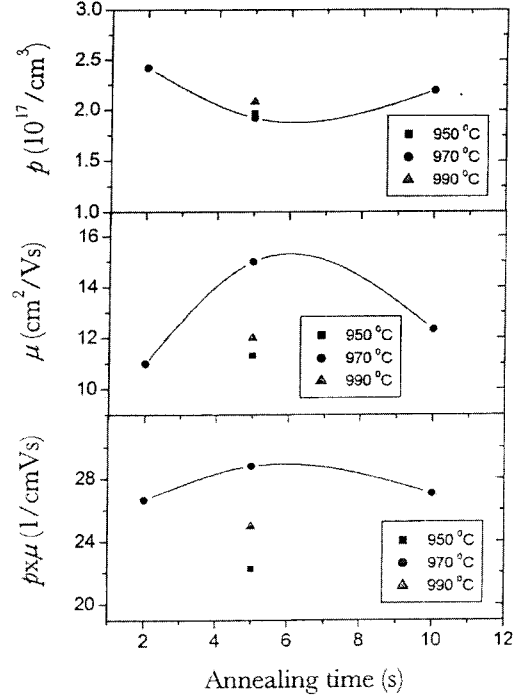


그림 3. 후속 열처리 시간을 달리하는 Mg가 도핑된 p형 GaN 에피층(M-7)의 실온에서의 Hall 측정 결과.

Fig. 3. Hall measurement results(T=300K) of Mg doped p-type GaN epilayer(M-7) with different annealing time.

캐리어 농도와 농도의 산소 분압 의존도는 전자 중성 조건으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} n &= N_D - N_A = N_D(1 - \theta) \\ &= [O_N](1 - \theta) \\ n &= K^*(1 - \theta) P^{1/2}_{O_2} \end{aligned} \tag{2}$$

$\theta$ 는 보상비율  $N_A/N_D$ 이고, 산소는 얇은 도너이므로,  $n=N_D-N_A$ 이다. 보상비  $\theta$ 를 알면, 캐리어 농도는 계산 가능하다. n형의 GaN에 대해 보상비는 거의 도너의 농도와 독립이며, 0.4의 오더를 갖는다[6]. 산소분압에 대한 자유전자 농도의 이론치는 성장온도에서 계산 가능하다[13,14].

이 경우 사이트 밀도는  $N_{site}=4.4 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 이고, 유효상태밀도는  $N_c=4.98 \times 10^{14} T^{3/2} \text{cm}^{-3}$ 이다.

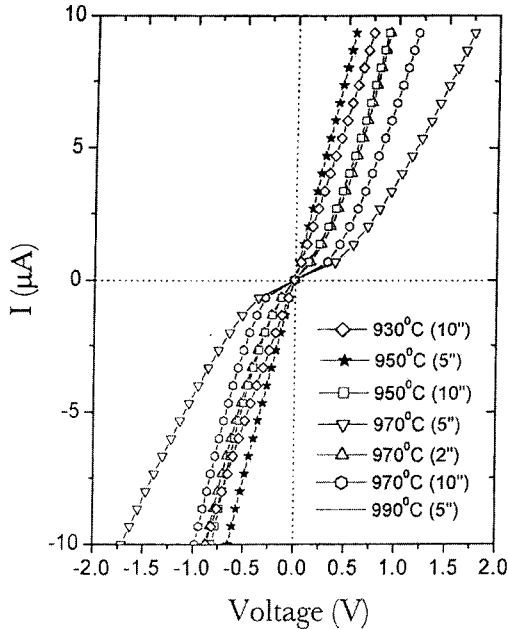


그림 4. 실온에서 측정된 Mg가 도핑된 p형 GaN 에피층의 I-V 특성.

Fig. 4. I-V characteristics of Mg doped p-type GaN epilayer(M-7) measured at room temperature.

그림 5는 캐리어의 농도의 산소분압에 대한 의존성을 보여주는데, 캐리어 농도는 산소분압의 제곱근에 비례하여,  $7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 까지 증가한다. 실선은 형성에너지를 휘팅 파라미터로 이용한, 산소 분압에 대한 자유전자농도의 의존성을 나타낸다. 그림4에서 보여주는 것과 같이 형성에너지 1.3eV에 대해, 실험 데이터는  $7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 까지 이론치와 실험치는 일치한다.

측정된 전자 농도는 산소 분압의 제곱근에 비례하기 때문에, 산소는 GaN에서 단순 도너로서 행동하고 있다고 생각된다. 측정된 산소의 고용도는 이론적 예측과 달랐다. Van de Walle등[7,15]에 의하면, 산소 농도는, Ga 풍부한 경우,  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 를 초과할 수 없고, 질소 풍부한 경우에는,  $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 를 넘을 수 없는 데 이 경우 각각  $E^F=1.8 \text{ eV}$ ,  $E^F=2.2 \text{ eV}$ 이었다. 계산된 형성 에너지는 Ga 풍부한 조건에서 보다 더 낮았다. 이러한 조건에서, 산소의 고용도는  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 의 형성에 의하여 제한된다. 산소가 도핑된 GaN 에피층은 질소 풍부조건 하

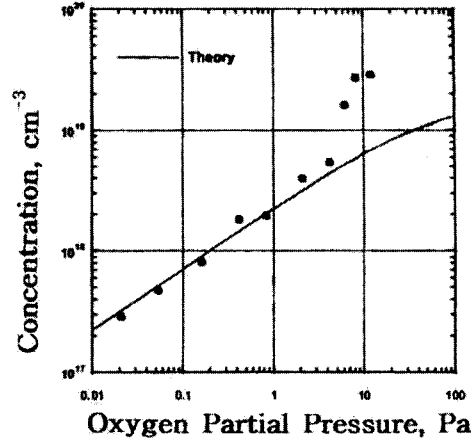


그림 5. 산소가 도핑된 GaN에서의 분압에 대응하는 전자농도.

Fig. 5. Concentration of electrons as a function of for partial pressure in oxygen-doped GaN.

에서 성장되기 때문에[16], 실험적으로 결정된 형성 에너지와 계산된 값과 잘 일치하지 않는다. 약 0.9eV 만큼의 차이를 보인다. 이론치는 산소의 고용도에서 2배 더 낮다. 산소 도핑 실험결과는 GaN의 산소 도핑된 데이터와 일치한다. Niebuhr등에 [17] 의하면,  $\text{N}_2\text{O}$ 를 산소 도판트로 사용하여, 전자농도가  $\text{N}_2\text{O}$  분압에 따라  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 까지 증가한다.

Forte-Poisson등[8]에 의하면, 산소 도핑된 GaN 에피층에 대한 연구는 전자 농도가 산소 양과 협력하여,  $6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 까지 증가함을 보여주는 데 이는 산소가 단순 얇은 도너로서 작용하는 것과 일치한다.

#### 4. 결론

Mg 도핑된 GaN 에피층에 대한 최적의 후속 열처리 조건은, I-V특성곡선에 의한 확인결과, 950°C에서 5 초간의 후속 열처리된 Mg 도핑된 에피층의 I-V 곡선이 양질의 선형 특성과 아울러 최고의 전기전도도를 가짐을 보였다. 다른 Mg 도핑 조건을 가진 샘플에 대하여, Hall 측정 결과는 Mg 유량 70m/min 조건하에 최고의 농도를 나타내었

다. 이 결과는 Mg가 최고의 도핑 효율을 가진 도핑 원도우의 존재를 암시한다.

MOVPE에 의해 준비된 산소 도핑된 GaN 층에서, 자유전자의 농도는  $7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 에 이르기까지 산소 분압의 제곱근에 비례하여 증가하였다. 캐리어 농도의 산소 분압 의존성으로부터 산소는 단순 도너로 행동한다고 결론지을 수 있다. 측정 결과 도너의 이온화 에너지는  $27 \pm 2 \text{ meV}$ 이며, 산소 도핑된 샘플의 온도 의존 이동도와 Hall측정은 일정한 보상비  $\theta = 0.3-0.4$ 를 나타낸다. 실험 데이터에 근거해서 계산된 GaN내에  $\text{O}_N$ 의 형성 에너지는  $1.3 \text{ eV}$ 이다.

### 참고 문헌

- [1] S. Nakamura and G. Fasol, "The Blue Laser Diode", Springer, Heidelberg, p. 354, 1997.
- [2] S. Nakamura, M. Senoh, S. N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, Y. Sugimoto, T. Kozaki, H. Umemoto, M. Sano, and K. Chocho, "InGaN/GaN/AlGaIn-bas edlaser diodes with cleaved facets grown on GaN substrates", Appl. Phys. Lett., Vol. 73, No. 1, p. 832, 1998.
- [3] Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa, S. Nagahama, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, and Y. Sugimoto. "InGaN multi-quantum-well structure laser diodes grown on MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> substrates", Appl. Phys. Lett., Vol. 68, No 2, p. 2105, 1996.
- [4] S. Strite and H. Morkoc, "GaN, AlN, and InN: A review", J. Vac. Sci. Technol., Vol. B10, No. 1, p. 1237, 1992.
- [5] M. E. Lin, S. Strite, and H. Morkoc, "The physical properties of AlN, GaN and InN", in The Encyclopedia of Advanced Material, D. Bloor et al., Eds. New York, Pergamon, p. 79, 1994.
- [6] M. Shur, B. gelmont, and M. A. Khan, "Electron mobility in two-dimensional electron gas in AlGaIn/GaN heterostructures and in bulk GaN", J. Electron. Mater., Vol. 25, No. 1, p. 777, 1996.
- [7] C. G. van de Walle, C. Stampfla and J. Neugebauer, "Theory of doping and defects in III-V nitrides", J. Cryst. Growth, Vol. 189, No. 3, p. 505, 1998.
- [8] M. A. di Forte-Poisson, F. Huet, A. Romann, M. Tordjman, D. Lancefield, E. Pereira, J. Di Persio, and B. Pecz, "Relationship between physical properties and gas purification in GaN grown by metalorganic vapor phase epitaxy", J. Cryst. Growth, Vol. 195, No. 2, p. 14 1998.
- [9] K. H. Ploog and O. Brandt, "Doping of group III nitrides", J. Vac. Sci. Technol., Vol. A16, No. 1, p. 1609, 1998.
- [10] V. A. Joshkin, C. A. Parker, S. M. Bedair, J. F. Muth, I. K. Shmagin, R. M. Kolbas, E. L. Piner, and R. J. Molnar, "Effect of growth temperature on point defect density of unintentionally doped GaN grown by metalorganic chemical vapor deposition and hydride vapor phase epitaxy", J. Appl. Phys., Vol. 86, No. 1, p. 281, 1999.
- [11] H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu, and I. Akasaki, "P-type conduction in Mg-doped GaN created with low-energy electron beam irradiation", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 28, No. 2, p. 2112, 1989.
- [12] M. Ilegems and R. Dingle, "Luminescence of beryllium- and magnesium-doped gallium nitride", J. Appl. Phys. Vol. 44, No. 3, p. 4234, 1973.
- [13] J. W. Orton, C. T. Foxon, S.E. Hooper, T. S. Chang, G. B. Rent, B. Y. Ber, A. V. Marulav, S. V. Novikov, and V. V Trent'yakov, "Improvement of the photoluminescence from GaN layers grown by MBE with an additional incident indium flux", Semicond. Sci. Technol., Vol. 13, No. 2, p. 1469, 1998.
- [14] D. C. Look, "Electrical Characterization of GaAs Materials and Devices", Wiley, New York, p. 255, 1989.
- [15] J. Neugebauer and C. G. van. de Walle, "Native defects and impurities in GaN", Festkoerperprobleme, Vol. 35, No. 1, p. 25, 1996.
- [16] W. M. Chen, I. A. Buyanova, Mt. Wagner, B. Monemar, L. Lindström, H. Amano and I. Akasaki, "Similarity between the 0.88-eV photoluminescence in GaN and the electron-

- capture emission of the OP donor in GaP", Phys. Rev., Vol. B58, No. 1, p. R13351, 1998.
- [17] R. Niebuhr, K. H. Bachem, M. Kaufmann, M. Maier, C. Merz, B. Santic, P. Schlotter, and H. Jurgensen, "Electrical and optical properties of oxygen doped GaN grown by MOCVD using  $N_2O$ ", J. Electron. Mater., Vol. 26, No. 3, p. 1127, 1997.
- [18] 조성룡, 여용운, 이종원, 박인용, 김선태, "GaN분말을 이용한  $Ga_2O_3$  fiber-wool의 합성과 특성", 한국전기전자재료학회 2001하계학술대회논문집, p. 848, 2001.
- [19] 이용일, 성용제, 박천일, 최우범, 성만영, "RF magnetron sputtering 방법에 의해 Si(100)기판 위에 성장된 GaN 박막의 특성에 대한 연구", 한국전기전자재료학회 2001하계학술대회논문집, p. 570, 2001.
- [20] 조태식, "사파이어 기판의 방향에 따른 ZnO 박막의 결정화 거동" 한국전기전자재료학회 2001하계학술대회논문집, p. 1036, 2001.
- [21] 방옥, 김남균, 김상철, 송근호, 김은동, "산화막을 이용한 SiC 기판의 macrostep 형성 억제", 한국전기전자재료학회 2001하계학술대회논문집, p. 539, 2001.