

논문 22-4-12

원격 플라즈마 원자층 증착법을 이용한 Al₂O₃/GaN MIS 구조의 제작 및 전기적 특성

Fabrication and Electrical Properties of Al₂O₃/GaN MIS Structures using Remote Plasma Atomic Layer Deposition

윤형선¹, 김현준¹, 이우석¹, 광노원¹, 김가람¹, 김광호^{1,a}

(Hyeong-Seon Yun¹, Hyun-Jun Kim¹, Woo-Seok Lee¹, No-Won Kwak¹, Ka-Lam Kim¹, and Kwang-Ho Kim^{1,a})

Abstract

Al₂O₃ thin films were deposited on GaN(0001) by using a Remote Plasma Atomic Layer Deposition(RPALD) technique with a trimethylaluminum(TMA) precursor and oxygen radicals in the temperature range of 25~500 °C. The growth rate per cycle was varied with the substrate temperature from 1.8 Å/cycle at 25 °C to 0.8 Å/cycle at 500 °C. The chemical structure of the Al₂O₃ thin films was studied using X-ray photoelectron spectroscopy(XPS). The electrical properties of Al₂O₃/GaN Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) capacitor grown at a 300 °C process temperature were excellent, a low electrical leakage current density(~10⁻¹⁰ A/cm² at 1 MV) at room temperature and a high dielectric constant of about 7.2 with a thinner oxide thickness of 12 nm. The interface trap density(D_{it}) was estimated using a high-frequency C-V method measured at 300 °C. These results show that the RPALD technique is an excellent choice for depositing high-quality Al₂O₃ as a gate dielectric in GaN-based devices.

Key Words : Aluminum oxide, MIS, GaN, RPALD, Interface trap density

1. 서론

질화 갈륨(Gallium nitride; GaN)은 넓은 에너지 밴드갭, 빠른 전자 이동속도, 고온에서의 안정성 등의 물리적 특성에 의하여 고전력, 고주파, 고온 소자를 위한 응용분야에서 크게 주목받고 있다[1].

그 중 고온 소자로서의 응용을 위해 GaN를 기반으로 하는 MESFETs, HEMTs, HBTs 등의 연구가 진행되어 왔지만 이러한 소자의 동작에 있어서 안정한 쇼트키 접합의 부재로 인한 심각한 누설전류등과 같은 많은 문제점이 따랐다[2]. 이러한 문제를 극복하기 위해 AlN[3,4], SiO₂[5], Ga₂O₃[3,6],

HfO₂[7] 등을 게이트 절연막으로 사용하는 MISFET에 대한 연구가 진행되어오고 있지만 아직까지 GaN 층과 게이트 절연막 사이의 interface 특성저하 및 게이트 누설전류가 문제시 되고 있는 실정이다.

Atomic Layer Deposition(ALD)이란 단원자층의 화학적 흡착 및 탈착을 이용한 nanoscale 박막 증착 기술로서, 각 반응 물질들을 펄스 형태로 Chamber에 공급함으로써 기판 표면에서 반응 물질의 표면 포화 반응에 의한 화학적 흡착과 탈착을 이용한 새로운 개념의 박막 증착기술이다. 이러한 ALD 기술에 Remote Plasma를 적용한 기술을 Remote Plasma Atomic Layer Deposition(RPALD)라 한다.

이러한 RPALD는 Plasma의 사용으로 보다 낮은 온도에서 박막증착이 가능하고, Plasma와 기판과의 거리가 멀기 때문에 Plasma에 의한 기판 표면의 손상을 줄일 수 있는 장점이 있다.

1. 청주대학교 전자공학과

(충북 청주시 상당구 대성로 586)

a. Corresponding Author : khkim@cju.ac.kr

접수일자 : 2009. 2. 18

1차 심사 : 2009. 3. 16

심사완료 : 2009. 3. 24

본 논문에서는 RPALD를 이용하여 화학적 안정성이 뛰어나고, 고유전물질인 산화알루미늄을 게이트 절연막으로 사용하여 이에 따른 산화알루미늄 박막의 화학적 특성 및 GaN MIS capacitor의 전기적 특성을 확인하였다[8,9]. 또한 고온에서의 동작을 고려하여, GaN MIS capacitor의 고온(300 °C)에서의 전기적 특성을 확인하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 RPALD를 이용하여 GaN 기판위에 산화알루미늄 박막을 증착하였다. 그림 1은 GaN MIS capacitor의 공정 순서도를 보인다. 기판으로 사용된 웨이퍼는 Sapphire 위에 순차적으로 buffer층과 Si이 도핑된 $n^+(1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})$ 층, undoped ($N_d=5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) GaN층이 증착된 기판을 사용하였고, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 으로 도핑된 4 μm 두께의 n^+ GaN는 하부전극으로 사용되었다. 준비된 웨이퍼는 유기 클리닝 후 황산과 과산화수소를 4:1로 혼합시킨 용액에 10분, 염산과 DI Water를 1:1로 혼합시킨 용액에 10분 동안 클리닝을 진행한 후 즉시 챔버 내부에 장착되었으며, 반응가스로는 trimethylaluminum(TMA)와 O_2 가스를 사용하였다. 그 후 ALD의 메커니즘인 self limited reaction이 일어나는 포화점을 확인하기 위해 TMA가스와 O_2 가스의 주입시간을 변화시켜 반응가스 주입시간에 대한 산화알루미늄 박막의 두께 변화를 확인하였고, ALD 공정구간 확인을 위해 증착온도를 실온에서 300 °C까지 변화시켜 공정온도에 따른 두께 변화 및 ALD 공정구간을 확인하였다. 또한 RPALD는 기존의 CVD보다 낮은 온도에서 박막을 증착시킬 수 있는 장점이 있으므로, 위 실험으로부터 얻어진 데이터를 기반으로 증착온도를 300 °C까지 변화시켜 GaN층 위에 산화알루미늄 박막을 12 nm로 고정하여, 증착시킨 후 그에 따른 화학적, 전기적 특성을 확인하였다.

박막의 두께와 굴절률은 파장이 632.8 nm인 엘립소미터(RUDOLPH RESEARCH/Auto EL)를 이용해 측정하였으며, 산화알루미늄 박막의 화학적 분석을 위하여 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)를 이용하였다. 또한 GaN MIS capacitor의 전기적 특성 평가를 위한 전극은 열 증착기(thermal evaporator)를 사용하여 알루미늄(6 N)을 증착하고, N_2 분위기 상태에서 10분간 Post-Mentalization-Annealing(PMA)을 수행하였다. 이렇게 제작된 MIS 커패시터의 게이트 누설전류를

측정하기 위해서 pA meter인 HP4140B를 사용하였으며, 용량-전압 특성을 평가하기 위하여 LCR 측정기인 HP4284A를 사용하였다. 또한 보다 정확한 계면 특성의 확인을 위하여 시편을 가열($\sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$)할 수 있는 기구를 자체 제작하여 사용하였고, GaN MIS capacitor의 고온에서의 전기적 특성을 확인하였다.

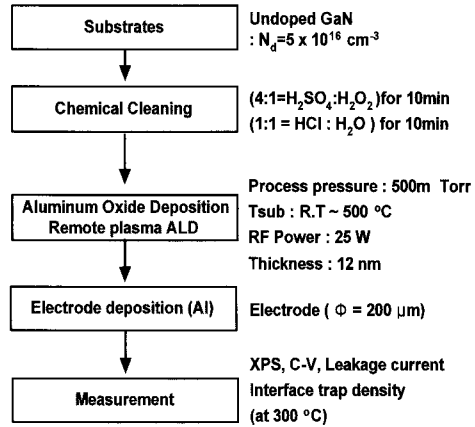


그림 1. GaN MIS 소자의 공정 순서도.

Fig. 1. Process flowchart of the GaN MIS capacitor.

3. 결과 및 고찰

ALD의 메커니즘인 self-limited reaction이 일어나는 포화점 확인을 위해 TMA와 O_2 의 주입시간을 변화시켜 반응가스 주입시간에 대한 GaN 박막의 두께 변화를 확인한 결과 TMA 가스의 경우 2 초, O_2 의 경우 4초 이상에서 포화되었다. 따라서 그 후 실험은 TMA/Ar/ O_2 /Ar : 2/4/4/4 sec로 진행하였다.

증착온도에 따른 산화알루미늄의 화학적 특성을 확인하기 위하여 증착온도를 실온에서 300 °C까지 변화시켜 산화알루미늄 박막을 증착시킨 후 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)를 사용하여 확인 하였다. 그림 2는 증착온도에 따른 산화알루미늄의 Al 2p와 O 1s core - level을 보인다.

그림에서 보이는 바와 같이 Al 2P peak 값은 증착온도에 상관없이 거의 74.4 eV로 보인다. 이것은 sapphire Al 2P peak값인 74.3 eV와 일치하는 값이다[10]. 하지만 O 1s peak값은 증착온도에 따라 531.3 eV에서 530.9 eV로 변화되는 것을 확인

할 수 있었다. 이러한 변화를 확인하기 위해 O 1s peak가 두 가지 화합물로 구성되어 있다는 가정 하에 분리(deconvolution)하여 확인하였다.

두 가지 화합물이란 TMA를 Aluminum precursor로 사용했을 경우 하나는 531.1 eV peak값을 가진 AlOOH 또는 Al(OH)₃이고, 다른 하나는 530.7 eV peak값을 가진 sapphire이다[10]. 또한 AlOOH 또는 Al(OH)₃의 Al 2P peak값의 경우 Al₂O₃ Al 2p peak값과 같지만, O 1s peak값은 물질에 따라 서로 다르다고 보고되고 있다[11]. 그러므로 실온에서 증착된 산화알루미늄 박막은 상대적으로 낮은 공정온도에 의해서 TMA에 결합되어 있는 수소원자가 상당부분 박막 내에 남아있지만, 100 °C 이상의 공정온도부터는 거의 사라지면서 산화알루미늄 고유의 O 1s peak가 커지는 것을 확인 할 수 있었다.

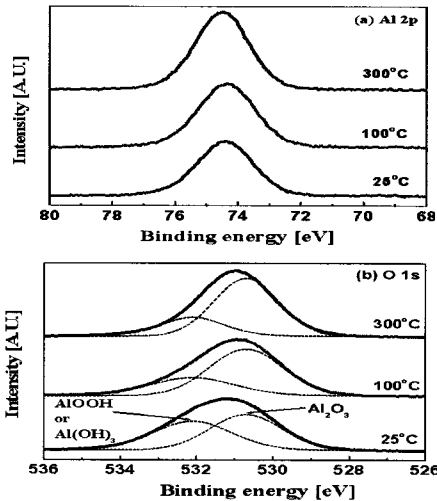


그림 2. 증착온도에 따른 산화알루미늄 박막의 XPS 스펙트럼. (a) Al2p (b) O 1s
 Fig. 2. The XPS spectra of the Al₂O₃ thin films deposited at a different temperature. (a) Al2p (b) O 1s

그림 3은 증착온도에 따른 GaN MIS capacitor의 누설전류 특성을 보인다. 누설전류측정을 위해 pA meter 인 HP4140B를 사용하였으며, 이때 산화알루미늄 박막의 두께는 12 nm였다. 실온에서 제작된 GaN MIS capacitor의 경우 누설전류밀도는 1 MV/cm² 전계에서 약 4.7x10⁻⁷ A/cm²로 가장 나쁜 특성을 나타내었고, 200 °C와 300 °C 공정온도에서 제작된 GaN MIS capacitor의 누설전류 밀도는 약 1x10⁻¹⁰ A/cm²로 우수한 누설전류 특성을 나타내었다.

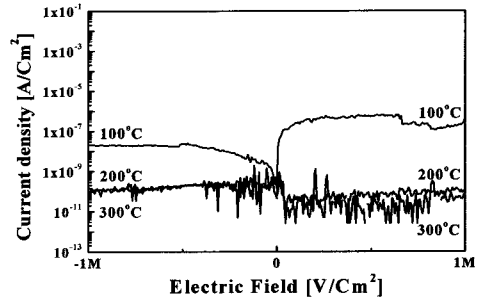


그림 3. 증착온도에 따른 GaN MIS capacitor의 누설전류 특성.
 Fig. 3. Gate leakage current density of GaN MIS capacitors fabricated at a different temperature.

그림 4는 보다 정확한 비교를 위해 200 °C와 300 °C에서 제작한 GaN MIS capacitor의 breakdown voltage를 나타낸 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 1.5 MV/cm 전계까지는 비슷한 범위의 누설전류 특성을 보이다가 1.5 MV/cm 전계이상에서부터는 200 °C보다 300 °C에 제작된 GaN MIS capacitor의 누설전류가 좀 더 좋은 것을 확인할 수 있었다. 각 증착온도에 대한 GaN MIS capacitor의 최대 breakdown voltage는 200 °C에서 약 2.98 MV/cm² 300 °C에서는 약 3.06 MV/cm² 이었다.

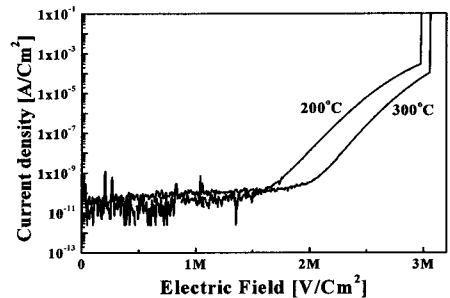


그림 4. Breakdown voltage 확인을 위한 GaN MIS capacitor의 누설 전류특성.
 Fig. 4. Gate leakage current density of GaN MIS capacitors to confirm a breakdown voltage.

그림 5는 증착온도 200 °C와 300 °C에서 제작된 GaN MIS capacitor의 C-V특성 그래프이다. GaN MIS capacitor의 C-V 특성은 1 MHz 주파수에서 HP 4284A LCR meter를 사용하여 측정하였다. 인

가된 게이트 전압은 암실 상태에서 0.02 V/sec 속도로 측정하였다. 측정된 C-V 데이터의 Accumulation capacitance로부터 구해진 절연막 유전 상수(ϵ_{ox})는 200 °C에서 제작된 GaN MIS capacitor의 경우 약 7이었고, 300 °C 경우 약 7.2로 거의 비슷한 수치이지만 300 °C에서 제작된 GaN MIS capacitor의 유전상수가 좀 더 좋은 것으로 확인되었다. 이때 전극의 면적은 $4.5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ 이었다.

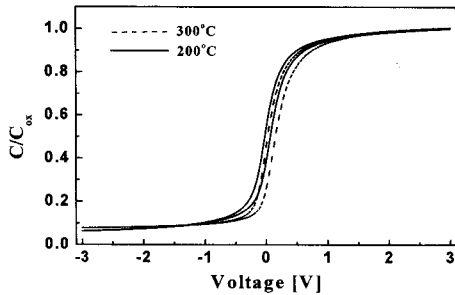


그림 5. 증착온도에 따른 GaN MIS capacitor의 C-V 특성 곡선.

Fig. 5. C-V characteristic of GaN MIS capacitors fabricated at a different temperature.

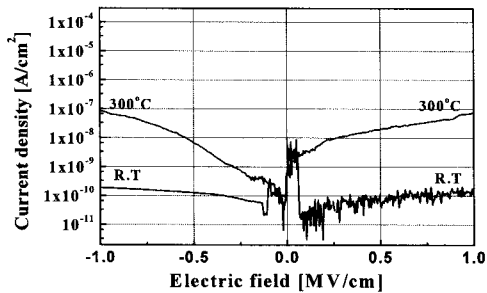


그림 6. 측정 온도에 따른 GaN MIS capacitor의 누설 전류 특성.

Fig. 6. Gate leakage current density of GaN MIS capacitors with a different measurement temperature.

그림 6은 가장 최적화 된 증착온도라 판단된 300 °C에서 제작된 GaN MIS capacitor의 측정온도에 따른 누설전류 특성을 보인다. 일반적으로 약 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 정도 이상의 누설전류밀도는 소자가 동작하는데 있어서 소자의 성능을 저하시키는 주요인이 된다. 하지만 본 연구결과 실온측정의 경우 1 MV/cm 전계에서 $1 \times 10^{-10} \text{ A}/\text{cm}^2$ 로 우수한 누설전류 특성을 나타내었고, 300 °C 고온에서 $7.5 \times 10^{-8} \text{ A}/\text{cm}^2$ 의 누설전류 밀도를 보이고 있다.

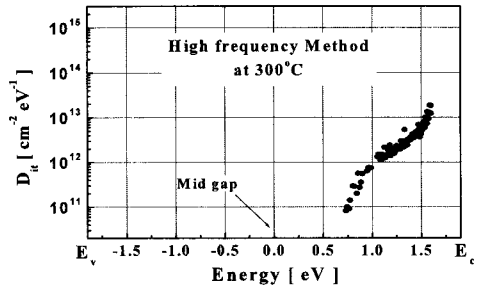


그림 7. GaN MIS capacitor의 interface trap density.

Fig. 7. Interface trap density of a GaN MIS capacitor.

그림 7은 GaN MIS capacitor의 interface trap density를 보인다. GaN MIS capacitor의 interface trap density(D_{it})를 구하기 위해 300 °C 고온에서 high frequency C-V method (Terman method)를 이용하여 확인하였다[12]. GaN와 같은 Wide band gap 반도체의 경우 실온 측정에서는 deep depletion상태에 머물기 때문에 interface trap density(D_{it})를 구함에 있어서 많은 오차가 발생하게 된다. 따라서 이러한 문제점을 해결하고 보다 정확한 소자의 interface 특성을 평가하기 위해서 열에너지를 가해주는 방법으로 300 °C 정도의 높은 온도에서 측정하였다[13]. 이렇게 계산되어진 GaN MIS capacitor의 interface trap density(D_{it})는 mid gap으로부터 0.75 eV 떨어진 곳에서 $8 \times 10^{10} / \text{cm}^2 \cdot \text{eV}$ 이었다.

4. 결론

본 논문에서는 RPALD를 이용하여 GaN층 위에 산화알루미늄을 증착한 후 이에 따른 산화알루미늄 박막의 화학적 특성 및 GaN MIS capacitor의 전기적 특성을 확인하였다. 증착온도에 따른 산화알루미늄 박막의 화학적 특성을 평가하기 위해 X-ray photo electron spectroscopy(XPS)를 이용하여 확인한 결과 증착온도 100 °C 이상에서 Al_2O_3 고유의 O 1s peak가 커지는 것을 확인할 수 있었다.

온도에 따른 GaN MIS capacitor의 누설전류 특성은 실온에서 제작된 GaN MIS capacitor의 경우 가장 나쁜 특성을 보였고, 200 °C와 300 °C 공정 온도에서 제작된 GaN MIS capacitor의 누설전류 밀도는 1 MV/cm 전계에서 약 $1 \times 10^{-10} \text{ A}/\text{cm}^2$ 로 우수한

누설전류 특성을 나타내었다. 그러나 breakdown voltage를 확인하기 위해 측정해본 결과 200 °C보다 300 °C에서 제작된 GaN MIS capacitor의 누설전류밀도가 좋다는 것을 확인할 수 있었으며 C-V 특성으로부터 계산된 절연막의 유전상수는 200 °C에서 제작된 GaN MIS소자의 경우 약 7이었고, 300 °C의 경우 약 7.2로 거의 비슷한 수치이지만 300 °C에서 제작된 GaN MIS capacitor의 유전상수가 더 좋은 것으로 확인되었다.

300 °C 고온측정의 경우 300 °C에서 제작된 GaN MIS capacitor의 누설전류밀도는 1 MV/cm 전계에서 7.5×10^{-8} A/cm²의 누설전류 밀도를 유지하였고, high frequency C-V method(Terman method)를 이용하여 측정한 GaN MIS capacitor의 interface trap density (D_{it})는 mid gap으로부터 0.75 eV떨어진 곳에서 8×10^{10} /cm²eV이었다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고 문헌

- [1] T. P. Chow and R. Tyagi, "Wide bandgap compound semiconductors for superior high-voltage unipolar power devices", IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 41, Issue 8, p. 1481, 1994.
- [2] B. Gaffey, L. J. Guido, X. W. Wang, and T. P. Ma, "High-quality oxide/nitride/oxide gate insulator for GaN MIS structures", IEEE Electron Devices Lett., Vol. 48, Issue 3, p. 458, 2001.
- [3] F. Ren, C. R. Abernathy, J. D. MacKenzie, B. P. Gila, S. J. Pearton, M. Hong, M. A. Marcus, M. J. Schurman, A. G. Baca, and R. J. Shul, "Demonstration of GaN MIS diodes by using AlN and Ga₂O₃(Gd₂O₃) as dielectrics", Solid-State Electronics, Vol. 42, Issue 12, p. 2177, 1998.
- [4] T. Hashizume, E. Alekseev, D. Pavlidis, K. S. Boutros, and J. Redwing, "Capacitance - voltage characterization of AlN/GaN metal - insulator - semiconductor structures grown on sapphire substrate by metalorganic chemical vapor deposition", Appl. Phys. Lett., Vol. 88, Issue 4, p. 1983, 2000.
- [5] H. C. Casey Jr, G. G. Fountain, R. G. Alley, B. P. Keller, and S. P. DenBaars, "Low interface trap density for remote plasma deposited SiO₂ on n-type GaN", J. Appl. Phys. Lett., Vol. 68, Issue 13, p. 1850, 1996.
- [6] M. Hong, K. A. Anselm, J. Kwo, H. M. Ng, J. N. Baillargeon, A. R. Kortan, J. P. Mannaerts, A. Y. Cho, C. M. Lee, J. I. Chyi, and T. S. Lay, "Properties of Ga₂O₃(Gd₂O₃)/GaN metal - insulator - semiconductor diodes", J. Vac. Sci. Technol., Vol. 18, Issue 3, p. 1453, 2000.
- [7] Y. C. Chang, H. C. Chiu, Y. J. Lee, M. L. Huang, K. Y. Lee, M. Hong, Y. N. Chiu and J. Kwo, and Y. H. Wang, "Structural and electrical characteristics of atomic layer deposited high HfO₂ on GaN", Appl. Phys. Lett., Vol. 90, Issue 23, p. 232904, 2007.
- [8] Y. Q. Wu, T. Shen, P. D. Ye, and G. D. Wilk, "Photo - assisted capacitance - voltage characterization of high - quality atomic - layer - deposited Al₂O₃/GaN metal - oxide - semiconductor structures", Appl. Phys., Vol. 90, p. 143504, 2007.
- [9] C. Ostermaier, H. C. Lee, S. Y. Hyun, S. I. Ahn, K. W. Kim, H. I. Cho, J. B. Ha, and J. H. Lee, "Interface characterization of ALD deposited Al₂O₃ on GaN by CV method", Phys. Stat. Sol., Vol. 5, No. 6, p. 1992, 2008.
- [10] M. D Groner, F. H Fabreguette, J. W Elam, and S. M George, "Low-temperature Al₂O₃ atomic layer deposition", Chem. Mater., Vol. 16, p. 639, 2004.
- [11] J. F Moulder, W. F Stickle, P. E Sobol, and K. D Bomben, "Handbook of X-ray Photoelectron spectroscopy, Perkin-elmer Corporation", Eden Prairie, MN, p. 55, 1992.
- [12] L. M Terman, "An investigation of surface states at a silicon/silicon oxide interface employing metal-oxide-silicon diodes", Solid-State Electronics, Vol. 5, Issue 5, p. 285, 1962.
- [13] K. H Kim, Y. S Kim, S. H Jeong, and S. W. Jung, "Fabrication and properties of an epitaxial AlN film on a SiC substrate by using reactive RF magnetron sputtering", J. Korean Phys. Soc., Vol. 48, No. 2, p. 275, 2006.