

산화알루미늄 박막의 두께 및 열처리 온도에 따른 Al₂O₃/GaN MIS 구조의 전기적 특성 변화

Change in Electrical Properties of Al₂O₃/GaN MIS Structures according to the Thickness of Al₂O₃ Thin Film and Annealing Temperature

곽노원¹, 이우석¹, 김가람¹, 김현준¹, 김광호^{1,a}

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

Abstract

We deposited Al₂O₃ thin films on GaN by remote plasma atomic layer deposition (RPALD) technique. trimethylaluminum(TMA) and oxygen were used as precursors. at fixed process condition, the number of cycle were changed. Growth rate per cycle was 1.2 Å/cycle. and Growth rate was in proportion to a number of cycle. the GaN MIS capacitors that Al₂O₃ thin film were deposited above 12 nm, have excellent electrical properties, a low electrical leakage current density (~10⁻¹⁰ A/cm² at 1.5 MV). but below 12 nm, we can see the degradation of the leakage current density. After post deposition annealing, Dielectric constant was estimated by 1 MHz high-frequency C-V method. it was varied with the annealing temperature from 6.9 at no post anealed to 7.6 at 800 °C. and we can see a improvement of the leakage current density and breakdown voltage by post deposition annealing below 700 °C. but, after anealed at 800 °C, we can see the degradation of the leakage current density and breakdown voltage.

Key Words : Aluminum oxide, MIS, GaN, RPALD

1. 서론

최근 들어 통신기술의 급격한 발달로 인해 무선 통신을 이용한 개인통신의 수요가 증대되며 밀리미터파 대역의 초고속 정보통신 시스템에 필요한 고속, 고전력 전자소자 및 회로의 제작에 대한 필요성이 증대되었다. Metal semiconductor field effect transistors(MESFETs), high electron mobility transistors(HEMTs) 등의 고주파용 전력소자의 제작에는 기존에 GaAs나 Si이 주를 이루어 왔다. 하지만 고주파 동작영역에서 높은 출력 전력을 얻는

데 있어 기존 물질들의 물리적 특성의 한계를 나타내며 이들 재료의 물성에 의한 소자성능을 능가하는 새로운 전력소자 연구의 필요성이 대두되어 왔다.

이러한 관점에서 질화 갈륨(Gallium Nitride; GaN)은 많은 주목을 받으며 연구 개발 되어져 왔다. GaN 반도체 개발의 원동력은 GaN 반도체 특유의 뛰어난 물리 화학적 특성에 기인한다. 특히 넓은 에너지 밴드 구조와 높은 항복전계, 빠른 전자 포화 속도 그리고 높은 열적 안정성 등의 우수한 물리적 특성에 의해 자외선 및 가시광영역에서 동작하는 청녹색 LD 및 고휘도 백색광소자 그리고 고온/고출력 및 고주파 전자소자 등을 위한 응용분야에서 기존의 GaAs를 대체할 물질로서 많은 주목을 받고 있다[1,2].

하지만 GaN 기반 소자들의 동작에 있어서 우수한 물리적 특성에도 불구하고 게이트를 통과하는

1. 청주대학교 전자공학과

(충북 청주시 상당구 대성로 586)

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

접수일자 : 2009. 4. 1

1차 심사 : 2009. 5. 22

심사완료 : 2009. 5. 24

누설전류로 인해 소자의 성능에 제약을 받고 있으며, 적은 게이트 누설전류 특성을 갖는 절연막 물질의 연구가 필요한 실정이다[3,4]. 그리고 최근 우수한 interface 특성을 필요로 하는 GaN MISFET의 연구도 진행 되고 있다[5].

이러한 관점에서 GaN MIS소자의 절연 물질로서 AlN[5], SiO₂[6,7], Ga₂O₃[6,9], HfO₂[10] 등의 물질들의 연구가 진행되어 왔고 ALD로 증착한 산화알루미늄도 많은 주목을 받고 있다. 산화알루미늄은 넓은 에너지 밴드갭(9 eV) 높은 유전상수(8.6~10) 그리고 높은 breakdown field(10 MV/cm) 등의 우수한 특성을 가지고 있다[11].

최근 많은 연구가 진행되어지고 있는 Atomic Layer Deposition(ALD)은 웨이퍼 표면에서 분자의 흡착과 치환의 반복을 통한 원자층 두께의 초미세 증착이 가능한 박막 증착 기술로서 막의 조성 및 두께조절이 용이하며, 막의 물리적 성질의 재현성 및 두께의 균일성이 뛰어나고 입자의 오염 제어가 우수한 장점을 가지고 있다. RPALD 기술은 ALD 기술에 원격 플라즈마를 도입함으로써 보다 낮은 온도에서의 공정이 가능하고 Plasma로 인한 기판 표면의 손상을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 본 연구실에서 실행한 기존 실험을 바탕으로 최적화 된 공정 조건에서 RPALD방법으로 증착한 산화알루미늄을 게이트 절연막으로 사용하여 GaN MIS capacitor를 제작 하였고[12], 산화알루미늄 박막의 두께 및 증착 후 열처리에 따른 GaN MIS capacitor의 전기적 특성의 변화를 확인하였다.

2. 실험 방법

그림 1은 GaN MIS capacitor의 공정 순서도를 보인다. GaN MIS capacitor의 제작을 위해 웨이퍼는 Sapphire 위에 buffer층과 하부전극으로 사용하기 위해 Si이 도핑 된 4 μm 두께의 n⁺(1×10¹⁸ cm⁻³) 층, undoped(N_d=5×10¹⁶ cm⁻³) GaN층이 순차적으로 증착된 기판을 사용하였다. 기판은 유기 클리닝을 진행 한 후 황산(H₂SO₄)과 과산화수소(H₂O₂)를 4:1로 혼합시킨 용액과 염산(HCl)과 DI Water를 1:1로 혼합시킨 용액에 각각 10분 동안 클리닝을 진행한 후 즉시 챔버에 장착하였다.

반응가스로는 trimethylaluminum(TMA)소스와 O₂ 가스가 사용되었고, 퍼지가스로 99.999 % 순도의

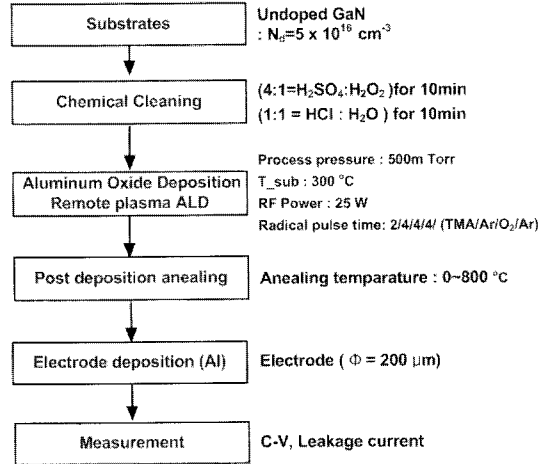


그림 1. GaN MIS 소자의 공정 순서도.

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

Ar을 사용 하였다. 표 1은 본 연구실의 선행 연구에 의해 수립된 공정 조건이다. 반응 가스의 주입 시간은 TMA/Ar/O₂/Ar 을 각각 2/4/4/4 sec, 공정 온도는 300 °C, RF 파워는 25 W, 공정압력을 500 mTorr로 고정한 후, cycle수에 변화를 주어 산화알루미늄 박막을 증착 하였고, RTA장비를 이용하여 증착 후 실온에서 800 °C 까지 온도에 변화를 주어 O₂ 분위기에서 1분간 열처리를 수행 하였다.

표 1. 실험조건.

Table 1. Process condition.

Parameter	Value
Substrate temp.	300 °C
Gas line temp.	30 °C
Process pressure	500 mTorr
Gas flow rate (Ar/O ₂ /Ar)	30/30/20 sccm
ALD radical pulse time (TMA/Ar/O ₂ /Ar)	2/4/4/4 sec.
Annealing temp.	600~800 °C

증착 후 GaN MIS capacitor의 전기적 특성 평가를 위한 전극은 열 증착기(thermal evaporator)를 이용하여 알루미늄(6N-Al)을 직경 200 μm 의 원형 금속마스크를 이용하여 증착하였고, RTA장비를 이용하여 N_2 분위기 상태에서 10분간 Post-Metalization-Annealing (PMA)을 수행하였다. 그림 2는 제작한 GaN MIS capacitor의 단면도를 보여주고 있다.

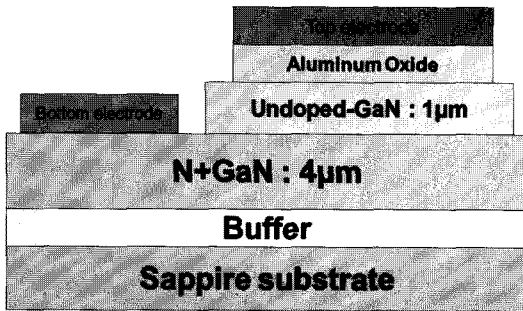


그림 2. GaN MIS 커패시터의 단면도.
Fig. 2. Cross sectional view of a GaN MIS capacitor.

박막의 두께는 파장 632.8 nm의 엘립소미터(RUDOLPH RESEARCH/Auto EL)와 FE-TEM을 이용해 측정하였으며, MIS 커패시터의 게이트 누설전류를 측정하기 위해서 pA meter인 HP4140B를 사용하였으며, 용량-전압 특성을 평가하기 위하여 LCR 측정기인 HP4284A를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

산화알루미늄 박막의 두께에 따른 GaN MIS 커패시터의 전기적 특성의 변화를 확인하기 위하여 선행 연구를 통하여 수립된 공정조건으로 25~200 cycle 까지 변화시키며 산화알루미늄 박막을 증착시켰다.

그림 3은 cycle 수의 변화에 따른 산화알루미늄 박막의 두께의 변화를 나타내었다. cycle당 박막의 증착률은 0.12 nm였고, 그래프로부터 알 수 있듯이 cycle수를 25~200 cycle까지 변화시키기에 따라 박막의 두께가 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 ALD의 특징인 두께의 정확한 제어가 이루어 졌음을 알 수 있다.

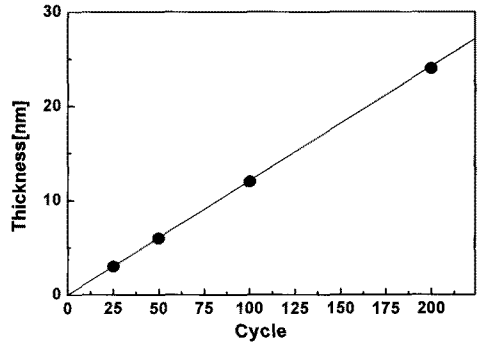


그림 3. Cycle 수에 따른 산화알루미늄 박막의 두께 변화.
Fig. 3. Cycle sequence dependence of the Al_2O_3 thickness.

그림 4는 GaN위에 산화알루미늄을 100 cycle 증착한 샘플의 단면을 FE-TEM를 이용하여 측정 한 결과 이미지이다. 엘립소 미터로 측정 한 두께는 12 nm였고 TEM 측정결과 동일한 두께로 일치함을 알 수 있었다. 그리고 GaN와 산화알루미늄 사이의 interface에도 다른 잔여물이나 자연산화막이 없음을 확인 할 수 있었다.

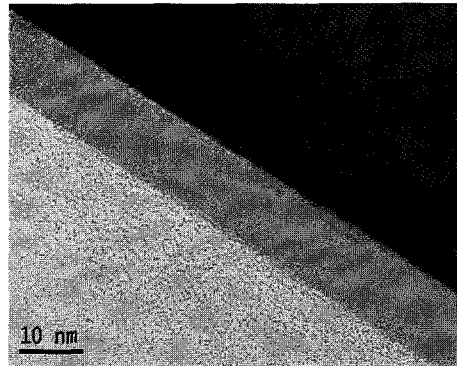


그림 4. 질화 갈륨 위에 산화알루미늄 박막이 100 cycle 증착된 FE-TEM 이미지.
Fig. 4. FE-TEM image of Al_2O_3 deposited 100 cycle on GaN.

그림 5는 산화알루미늄 박막의 두께에 따른 GaN MIS 소자의 누설전류 특성을 나타내는 그래프이다. 12 nm(100 cycle)와 24 nm(200 cycle) 두

개의 알루미늄 산화막이 증착된 GaN MIS소자의 누설전류특성은 서로 비슷한 결과를 보였지만, 6 nm (50 cycle) 이하의 두께의 알루미늄 산화막이 증착된 GaN MIS소자의 누설전류특성은 현저히 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 그래서 GaN MIS소자의 산화알루미늄 박막의 두께는 가장 누설전류특성이 양호하면서 동시에 가장 얇은 두께인 12 nm로 고정하여 실험을 진행하였다.

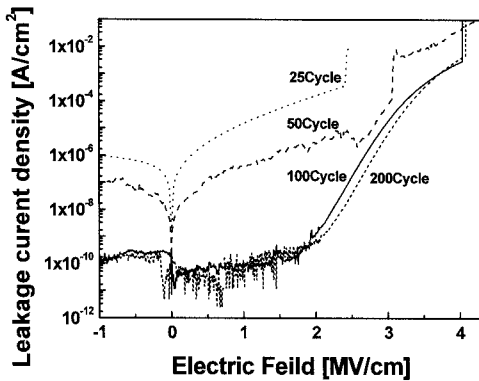


그림 5. 산화알루미늄 박막의 두께에 따른 GaN MIS 소자의 누설전류 특성.

Fig. 5. Gate leakage current density of GaN MIS capacitors with different thickness of Al₂O₃ thin films.

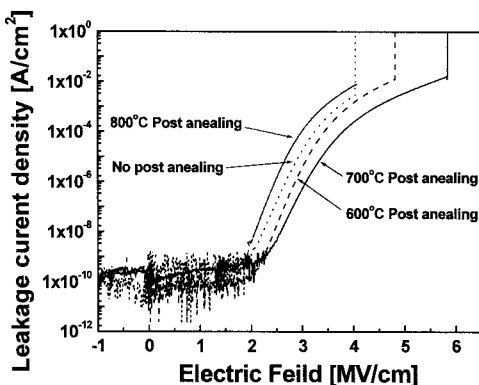


그림 6. 열처리 온도에 따른 GaN MIS 소자의 누설전류 특성.

Fig. 6. Gate leakage current density of GaN MIS capacitors with different post deposition annealing temperature.

그림 6는 12 nm의 산화알루미늄 박막을 증착 후, 산소 분위기에서 600 °C ~ 800 °C 의 온도에 1 분간의 열처리를 진행 후 제작한 GaN MIS 소자의 누설전류밀도 특성 곡선을 보인다. 1.5 MV/cm의 인가전계까지는 약 1×10^{-10} A/cm²의 비슷한 범위의 누설전류밀도 특성을 보인다. 하지만 1.5 MV/cm 전계이상에서 부터는 열처리 온도가 700 °C까지 증가함에 따라 누설전류밀도가 좀 더 좋아지는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 GaN MIS capacitor의 breakdown voltage도 증가 하여 700 °C에서 열처리 한 소자의 경우 약 5.85 MV/cm 이었다. 반면 열처리 온도가 700 °C이상 증가함으로써 누설전류밀도 및 breakdown voltage도 낮아졌다. 이는 산화알루미늄의 결정화에 의한 현상으로 사료된다[13].

그림 7은 열처리 수행 후 제작 된 GaN MIS capacitor의 용량-전압 특성 곡선 그래프이다. GaN MIS capacitor의 C-V 특성은 1 MHz 주파수에서 HP 4284A LCR meter를 사용하여 측정하였다. 인가된 게이트 전압은 암실 상태에서 0.02 V/sec 속도로 측정하였다. 측정된 C-V 데이터의 Accumulation capacitance로부터 절연막 유전 상수(ϵ_{ox})를 산출 하였다.

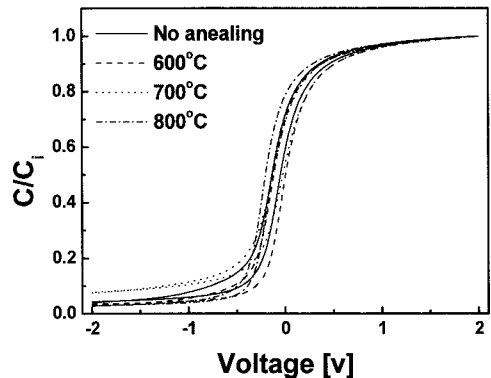


그림 7. 열처리 온도에 따른 GaN MIS 소자의 용량-전압 특성.

Fig. 7. C-V characteristic of GaN MIS capacitors with different post deposition annealing temperature.

그림 8은 측정된 C-V 데이터의 Accumulation capacitance로부터 계산된 절연막 유전 상수(ϵ_{ox})이다. 열처리를 수행하지 않은 GaN MIS capacitor

의 절연막의 유전 상수는 약 6.9이었고, 열처리 온도가 증가함에 따라 절연막의 유전 상수가 증가하여, 800 °C에서 열처리를 수행한 후 제작된 GaN MIS capacitor의 유전 상수는 약 7.6으로 나타났다. 일반적으로 산화알루미늄은 약 800 °C정도에서 결정화가 진행되고 결정화가 진행되면서 유전율이 커지는 경향이 있는데 위 측정결과도 이에 기인된 것으로 판단된다.

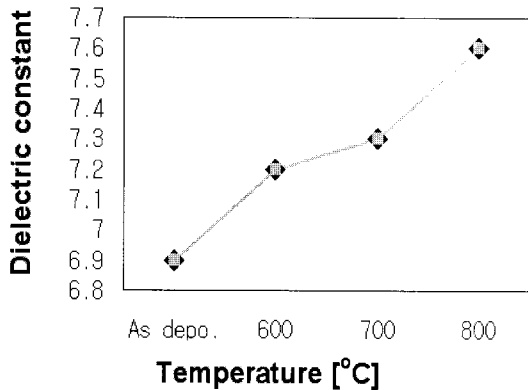


그림 8. 열처리 온도에 따른 절연막의 유전상수.
Fig. 8. Dielectric constant with different post deposition annealing temperature.

4. 결론

본 논문에서는 RPALD를 이용하여 증착한 산화알루미늄의 두께 및 증착한 후 열처리 온도에 따른 GaN MIS capacitor의 전기적 특성의 변화를 확인하였다. 산화알루미늄 박막의 두께에 따른 GaN MIS capacitor의 누설전류특성은 12 nm (100 cycle)와 24 nm(200 cycle)두께의 알루미늄 산화막이 증착된 GaN MIS capacitor의 누설전류특성은 서로 비슷한 결과를 보였지만, 6 nm이하의 두께의 알루미늄 산화막이 증착된 GaN MIS capacitor의 누설전류특성은 현저히 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 열처리 온도에 따른 GaN MIS capacitor의 누설전류특성은 모두 1.5 MV/cm의 인가전계까지는 약 1×10^{-10} A/cm²의 비슷한 범위의 누설전류밀도 특성을 보였다. 하지만 1.5 MV/cm 전계이상에서 부터는 열처리 온도가 700 °C까지 증가함에 따라 누설전류밀도가 좀 더 좋아 지는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 GaN MIS소자의 breakdown

voltage도 증가 하여 700 °C에서 열처리 한 소자의 경우 약 5.85 MV/cm의 우수한 breakdown voltage를 나타내었다. 반면 열처리 온도가 700 °C 이상 증가함으로 인해 누설전류밀도 및 breakdown voltage도 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 산화알루미늄의 결정화에 의한 현상으로 사료된다. 또한 1 MHz로 측정된 용량-전압 특성 데이터의 Accumulation capacitance로부터 산출된 절연막의 유전 상수는 열처리를 수행하지 않은 GaN MIS capacitor의 절연막의 유전 상수가 약 6.9, 열처리의 온도가 증가 함에 따라 절연막의 유전 상수가 증가하여, 800 °C에서 열처리를 수행한 후 제작된 GaN MIS capacitor의 유전 상수는 약 7.6으로 나타났다.

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] 오상도, 범진욱, 백홍구, "GaN계 전자소자의 연구동향", 전기전자재료학회지, 14권, 11호, p. 11, 2001.
- [3] P. D. Ye, B. Yang, K. K. Ng, J. Bude, G. D. Wilk, S. Halder, and J. C. M. Hwang, "GaN metal-oxide-semiconductor high-electron-mobility-transistor with atomic layer deposited Al₂O₃ as gate dielectric", Appl. Phys. Lett., Vol. 86, Issue 6, 2005.
- [4] B. Gaffey, L. J. Guido, X. Wang, and T. P. Ma, "High-quality oxide/nitride/oxidegate insulator for GaN MIS structures", IEEE Electron Devices Lett., Vol. 48, Issue 3, p. 458, 2001.
- [5] W. Huang, T. Khan, and T. P. Chow, "Enhancement-Mode-n-Channel GaN MOSFETs on p and n-GaN/Sapphire Substrates", IEEE Electron Device Lett., Vol. 27, Issue 10, p.

- 796, 2006.
- [6] 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 $Ga_2O_3(Gd_2O_3)$ as dielectrics", *Solid-State Electronics*, Vol. 42, Issue 12, p. 2177, 1998.
- [7] M. Sawada, T. Sawada, Y. Yamagata, K. Imai, H. Kimura, M. Yoshino, K. Izuka, and H. Tomozawa, "Electrical characterization of n-GaN Schottky and PCVD-SiO₂/n-GaN interfaces", *J. Cryst. Growth*, Vol. 189/190, p. 706, 1998.
- [8] 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.
- [9] 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 $Ga_2O_3(Gd_2O_3)/$ GaN metal-insulator-semiconductor diodes", *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol. 18, Issue 3, p. 1453, 2000.
- [10] Y. C. Chang, H. C. Chiu, Y. J. Lee, M. L. Huang, K. Y. Lee, M. Hong, Y. N. Chiu, 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.
- [11] J. W. Lim and S. J. Yun, "Electrical properties of alumina films by plasma-enhanced atomic layer deposition", *Electrochem. Solid-State Lett.*, Vol. 7, Issue 8, p. F45, 2004.
- [12] H. S. Yun and K. H. Kim, "Fabrication and properties of GaN MIS capacitors with a remote-plasma atomic-layer-deposited Al₂O₃ gate dielectric", *J. Korean Phys. Soc.*, Vol. 54, No. 2, p. 707, 2009.
- [13] S. Jakschik, U. Schroeder, T. Hecht, M. Gutsche, H. Seidl, and J. W. Bartha, "Crystallization behavior of thin ALD-Al₂O₃ films", *Thin Solid Films*, Vol. 425, Issue 1-2, p. 2160, 2003.