


RF Sputtering 방식으로 증착된 Y_2O_3 박막의 열처리 후 물리화학적 특성 평가

우종창¹, 김종식², 강인수³, 김관하⁴ 

¹ 한국폴리텍대학 반도체융합캠퍼스 반도체공정장비과

² 한국전자통신연구원 반도체소부장기술센터 초실감메타버스연구소 & (주) 해드림 기술연구소

³ 한국폴리텍대학 반도체융합캠퍼스 반도체전기과

⁴ 한국폴리텍대학 성남캠퍼스 반도체공정과

Evaluation of Physicochemical Properties of Y_2O_3 Thin Films Deposited by RF Sputtering After Thermal Annealing

Jong-Chang Woo¹, Jong-Sik Kim², Insu Kang³, and Gwan-Ha Kim⁴

¹Department of Semiconductor Process Equipment, Semiconductor Convergence Campus of Korea Polytechnic,
Anseong 17550, Korea

²Semi. Materials Components Equipment Technology Center, ETRI, Daejeon 34129, Korea & Haedream Co., Ltd., Technical Re-
search Center, Hwasoon 58153, Korea

³Department of Semiconductor Electrical, Semiconductor Convergence Campus of Korea Polytechnic, Anseong 17550, Korea

⁴Department of Semiconductor Process, Seongnam Campus of Korea Polytechnic, Seongnam 13122, Korea

(Received June 10, 2025; Revised July 21, 2025; Accepted July 21, 2025)

Abstract: In this study, Y_2O_3 thin films were deposited on Si(100) wafers using an RF sputtering system with a Y_2O_3 target. The Y_2O_3 thin film was confirmed to have a thickness of 227 nm/min and a uniformity of 1.34% at a substrate temperature of 400°C. All samples were annealed at 600, 800, and 1,000°C for 1 hour in an O_2 gas atmosphere using the furnace. The analysis of the XRD patterns revealed that the peak intensity increased with annealing up to 800°C, but decreased when the annealing temperature was raised to 1,000°C. The XPS analysis confirmed the onset of crystallization at 800°C, in agreement with the trends observed in the XRD results. According to the AFM results, the surface became slightly smoother after heat treatment, as indicated by a reduced RMS roughness of approximately 1.792 nm.

Keywords: RF sputtering, Y_2O_3 thin film, Yttrium oxide, Furnace, Annealing

✉ Gwan-Ha Kim; gwanha@kopo.ac.kr

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

Yttrium oxide(Y_2O_3)는 특히 박막 상태에서 마이크로 전자 및 광전자 소자 제작에 있어 매우 우수한 소재로 대표적인 응용 분야로는 강유전체 및 초전도체의 버퍼층, 광학 및 보호 코팅 등이 있다. Y_2O_3 박막은 우수한 굴절률, 용점, 열전도도, 기계적 강도와 같은 특성을 지니고 있으며, 특히 metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET)에서 사용할 수 있는 게이트 유전체 물질로 높은 유전율($k \approx 15$), 넓은 밴드갭($\Delta E \approx 5.5$ eV), 그리고 우수한 전기적 및 열적 안정성 등을 지니고 있다. 이러한 이유로 Y_2O_3 박막은 많은 관심을 받아 이를 증착하기 위해 다양한 기술들이 연구되었다. 대표적으로는 화학기상증착 (chemical vapor deposition: CVD), RF (radio frequency) sputtering, 분자선 에피택시(molecular beam epitaxy: MBE), 이온빔 보조 증착(ion beam assist deposition: IBAD), 펄스 레이저 증착(pulse laser deposition: PLD), 졸-겔(sol-gel) 방법 등이 있다. 이러한 증착 방법도 누설 전류, 산화막 전하, 계면 상태, 실리콘 공정과의 호환성 등과 같은 다른 중요한 요소들이 Y_2O_3 박막이 실제로 대체재로서 적합한지를 결정짓기에는 아직 관련된 연구가 미흡한 상태이다 [1-3]. RF 전력은 플라즈마를 안정적으로 유지하므로, 넓은 면적에 걸쳐 두께 및 조성이 균일한 박막을 형성할 수 있고, 플라즈마로부터 이온화된 입자가 높은 에너지를 가지고 기판에 충돌하기 때문에, 밀도가 높고 부착력이 우수한 박막을 형성할 수 있으며, 공정의 안정성과 재현성이 높아 생산 공정에 적합하다 [5-7].

본 연구에서는 Si(100) 기판 위에 RF sputtering을 이용하여 Y_2O_3 박막을 증착하였으며, 고온에서 증착된 Y_2O_3 박막의 증착 특성을 검증하고자 기판의 온도를 변화시켜 박막의 증착 특성과 균일도를 분석하였다. 또한 열처리 후 Y_2O_3 박막의 결정성을 확인하고자 XRD (X-ray diffraction) 분석을 진행하였으며, 표면에서의 화학적 반응들은 XPS (X-ray photoelectron spectroscopy)를 통해 확인하였다. 열처리 후 표면의 거칠기는 AFM (atomic force microscope)을 통해 분석하였다. 이러한 연구 결과는 RF sputtering을 이용한 광학 박막 소자의 설계 및 제작에 유용한 기초 정보를 제공할 것이다.

2. 실험 및 방법

본 실험에 사용된 시료는 증착률 및 균일도 확인, 구조 특성 분석을 위하여 6인치 P-type (100) 실리콘 웨이퍼

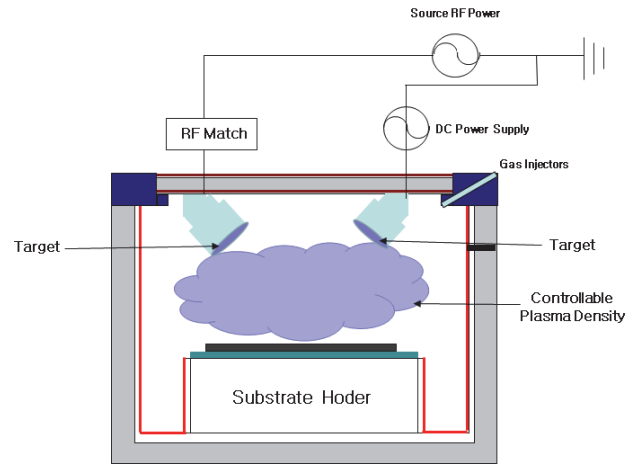


Fig. 1. Schematic drawing of RF sputtering system.

를 사용하여 Y_2O_3/Si substrate의 구조로 구성하여 진행하였다. 기판은 SC-1 용액을 이용하여 세정하고 고압의 질소 가스를 이용하여 건조하였다. Y_2O_3 박막은 Y_2O_3 타겟을 사용하여 그림 1에서 보는 것처럼 RF sputtering 방법으로 증착하였다. Y_2O_3 타겟의 불순물을 제거하기 위해 pre-sputtering을 5분간 진행하였고 세부 공정 조건은 50 sccm Ar 가스를 사용하였고, 공정 압력은 5 mTorr, RF 전력은 230 W와 공정 시간은 600분으로 설정하였다. 기판 온도는 실온부터 $600^\circ C$ 까지 변화시켜 Y_2O_3 박막의 증착률과 균일도를 조사하였다. 증착 시 기판 온도는 $200^\circ C$ 이상에서 결정화를 시작하기 때문에 $400^\circ C$ 에서 Y_2O_3 증착 후, 웨이퍼 박막은 산소 분위기(O_2)에서 $1,000^\circ C$ 까지 변화시켜 1시간동안 전기로(furnace)를 통해서 열처리를 진행하였다. 박막 증착 후 두께 측정을 위하여 (주)엘립소테크놀러지사의 Elli-SE 모델의 엘립소미터를 사용하여 두께는 64 Point를 측정하여 아래의 식을 통해 균일도를 계산하였다.

$$Uniformity(\%) = \frac{\text{최대값} - \text{최소값}}{2 \times \text{평균값}} \times 100$$

열처리 온도 변화에 따른 박막의 결정성을 분석하기 위해 XRD (new D8-Advance, Bruker-AXS) 분석을 진행하였다. 또한, 박막 표면의 화학적 조성 및 변화를 알아보기 위하여 XPS (K-alpha +, thermo Fisher scientific) 분석을 진행하고 박막 표면의 거칠기는 AFM (NX-20, park system)을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 RF sputtering 시스템에서 Y_2O_3 타겟의 불순물을 제거하기 위해 pre-sputtering을 5분간 진행하고 Ar 가스 50 sccm, 공정 압력 5 mTorr, RF 전력 230 W와 공정시간은 60분으로 설정 후, 기판 온도를 실온부터 600°C까지 변화시켜, Y_2O_3 박막의 증착률과 균일도를 조사하였다. 그림 2에서 보는 것처럼, Y_2O_3 박막의 특성상 200°C 이상에서 결정화가 시작되기 때문에, 200°C 이상에서 증착률이 낮고, 400°C에서 227 nm/min의 두께와 1.34% 균일도가 우수한 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 스퍼터링 공정에서 기판 온도를 증가시키면 표면 이동성이 좋아져서 증착률이 증가하는 것을 알고 있다 [4-6]. 400°C에서 더욱 온도를 증가시키면 증가속도는 좋아질 것이지만 균일도는 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 RF 전력은 플라즈마를 안정적으로 유지하므로, 넓은 면적에

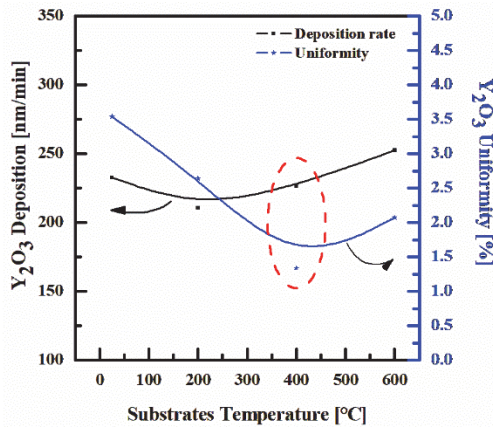


Fig. 2. Deposition rate and uniformity of Y_2O_3 thin film as a function of substrates temperature.

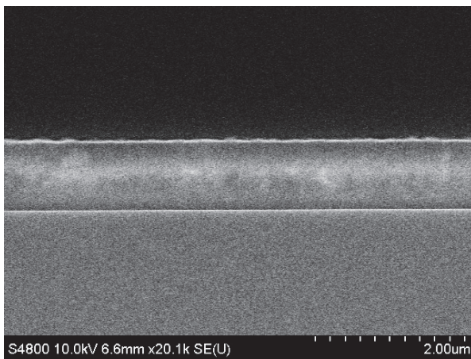


Fig. 3. SEM image of Y_2O_3 thin film in the substrates 400°C temperature.

걸쳐 두께 및 조성이 균일한 박막을 형성해야하는 공정 조건에 부합하지 않은 것으로 판단된다. 그리고 여기서 온도가 증가되었을 경우에는 플라즈마로부터 이온화된 입자가 높은 에너지를 가지고 못하고 기판과 충돌하여 밀도가 낮은 현상으로 부착력이 낮게 박막을 형성을 이루게 된 것으로 판단된다. 이러한 결과로 볼 때, 낮은 온도에서의 박막이 비정질 상태로 존재하기 때문에 전기적 특성이나 약한 결정성으로 기판에 불안정한 상태로 증착이 이루어지다 보니 균일도 떨어지는 것으로 판단된다. 또한, 400°C에서는 결정립 성장이 시작되며 거칠기가 증가하고 일부 산화막 계면층이 형성될 것이다. 이는 중간 온도에서 입자들의 재배향이 이루어지고 결정 성장 메커니즘이 안정화되는 구간과 일치하기 때문이다 [6,7]. 기판의 온도가 증가함에 따라 불순물들이 감소되어 유전을 향상과 전기적 특성의 안정화를 가져올 것이다. 그러나, 600°C에서는 400°C와 동일한 특성을 보일 것으로 판단되나, 기판 온도의 변화때문에 계면 반응 및 표면 이동성 증가 문제가 발생하여 미세구조 불균일성이 증가된 것으로 판단된다 [8]. 그림 3은 RF sputtering 시스템에서 Ar 가스 50 sccm, 공정 압력 5 mTorr, RF 전력 230 W, 공정시간은 600분과 기판 온도 400°C로 진행 후 FE-SEM을 통해 두께를 확인한 결과이다. 증착된 박막의 단면을 확인하여 보면 결정성이 우수한 것으로 판단할 수 있다.

한편, Y_2O_3 박막들의 구조와 결정학적 특성을 조사하기 위해 측정된 XRD는 그림 4에 보면 400°C에서 증착된 Y_2O_3 박막을 산소 분위기(O_2)에서 600~1,000°C까지 변화시켜 1 시간동안 열처리하고 난 후에 XRD 분석을 통해 박막의 결정성을 확인하였다. 그 결과 Y_2O_3 의 대표적인 결정면(222) 회절 피크가 열처리 온도 증가에 따라 점차 강해지는 것을

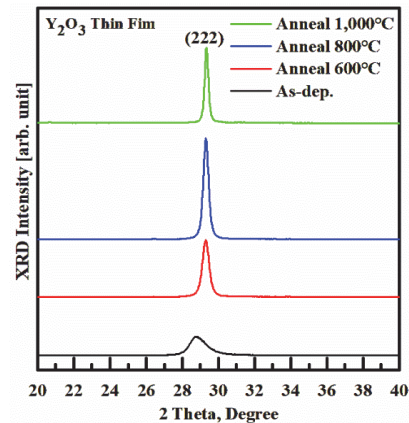


Fig. 4. The XRD patterns of the Y_2O_3 thin films as a function of the annealing temperature.

확인할 수 있었다. 여기서 열처리 온도를 800°C까지 증가 되었을 때, 29.3의 회절 각(2 Theta)에서 강한 피크가 관측되었으며 XRD intensity도 역시 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 플라즈마로부터 이온화된 입자가 높은 에너지를 가지고 기판에 충돌하기 때문에, 밀도가 높고 부착력이 우수한 박막을 형성된다고 사료된다. 그러나 1,000°C에서는 감소되는 것을 확인할 수 있는데, 이는 고온에서 계면 반응 및 표면 조도 증가 문제가 발생하여 결정성에 영향을 준 것으로 판단된다. 이는 열처리 온도가 증가함에 따라 결정립 성장이 우수해지고, 결정화도(crystallinity)가 증가된다는 것을 말한다. 따라서, (222) 피크의 강도는 고온 열처리에 의한 박막 내의 잔류 응력 해소와 결정립 재배열을 통해 결정성이 향상되는 것으로 지속적으로 보고되고 있다 [9].

Y₂O₃ 박막 표면에서 열처리 후에 따른 화학반응과 표면 특성을 이해하기 위해서, 열처리된 Y₂O₃ 박막의 표면상에서의 화학적 반응을 살펴보고자 XPS 분석을 수행하였다.

또한, Y₂O₃ 박막의 C 1s 피크 바인딩 에너지는 다음과 같았다: 증착 상태에서는 287.08 eV에서 284.6 eV에 위치한 C 1s 피크는 전하 보정 기준으로 사용되었으며, 이에 따라 모든 Y 3d 및 O 1s 피크는 -2.48 eV만큼 낮은 바인딩 에너지 쪽으로 이동되었다. 그림 5는 열처리 후 Y₂O₃ 박막의 표면의 Y 3d의 성분 peak는 세 가지 다른 산화로 인해 두 쌍의 peak로 나타낼 수 있다. 그림 5(a)에서 보면 열처리 전 156.3 eV에서 Y 3d_{5/2}와 158.5 eV에서 Y 3d_{3/2}, 그리고 156.4 eV, 157.9에 해당하는 metal peak로 구분이 가능하다. 그림 5(b)~(d)에서 보면 그림 5(a)에서 Y 3d_{5/2}와 Y 3d_{3/2} peak는 (b)~(c)에서는 156.6 eV와 158.7 eV로 높은 쪽으로 이동하며, 열처리에 의해서 미세하게 감소되어진 것을 확인할 수 있다. 그러나 그림 5(d)을 보면 다시 열처리 전의 상태로 156.3 eV와 158.3 eV로 다시 돌아가는 것을 확인할 수 있으며, metal peak들은 열처리에 의한 binding energy는 크게 영향이 없으나 밀도는 증가하다가 최대점인 고온에서는 다시 감소되는 것을 확인할 수

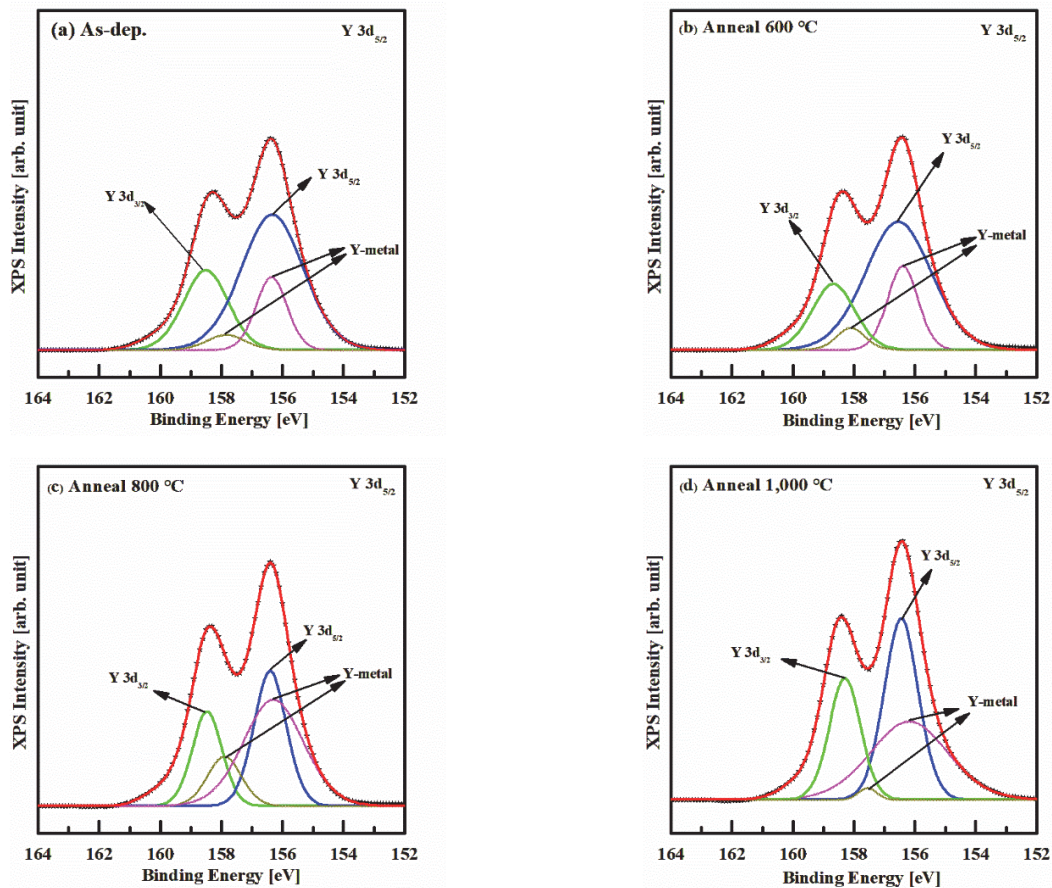


Fig. 5. The XPS spectra of the Y 3d for the Y₂O₃ thin films as a function of the annealing temperature.

있다. 이는 결정성에 영향을 주는 온도가 최대점인 고온에서 더 이상 계면 반응에 영향을 주지 않는다는 것을 판단할 수 있다.

그림 6(a)~(d)는 열처리 후 Y_2O_3 박막의 표면의 O 1s의 성분 peak는 세 가지의 peak로 나타낼 수 있다. O 1s peak는 528.3 eV에 해당하는 O-Y, 531 eV에 해당하는 Y-O-Si와 527.6 eV에 해당하는 O-O의 세 가지 성분으로 조절된다. 열처리 온도가 증가했을 때 O-Y, Y-O-Si와 O-O의 밀도가 감소하는 것을 볼 수 있는데, 그림 6(c)에서는 O-Y의 피크가 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 열처리 온도가 증가하면서 O_2 를 첨가했을 때 Y_2O_3 표면의 O 라디칼은 O-O에 의해 결합되어 O-Y의 밀도는 줄어들고 Y와 O의 증발로 인해 결정성이 우수해지는 것으로 여겨진다 [10,11].

그림 7은 열처리 후 Y_2O_3 박막의 표면 상태를 AFM 분석을 통해 형태와 거칠기 변화 결과를 나타낸 것이다. 박막은 $400^\circ C$ 에서 증착된 후, 별도의 열처리를 진행하지 않고 진행한 As-dep.과 $600\sim 1,000^\circ C$ 에서 열처리된 시편으로 구

성하였다. 그림 7(a)는 열처리를 진행하지 않은 상태의 표면 상태이며, RMS (root mean square) 표면 거칠기는 1.816 nm로 비교적 작은 사이즈의 입계(grain)들이 성장되어 있다. 그림 7(b)~(c)는 열처리를 $600^\circ C$ 와 $800^\circ C$ 에서 진행한 표면 상태로 그림 7(a)와 비교하여, RMS 값은 1.816 nm에서 0.979 nm 소폭 감소하고 다시 2.154 nm로 증가하였지만, 상대적으로 큰 크기의 입계들이 성장되어 있는 것을 볼 수 있다. 그림 7(b)에서는 열처리 과정 중 결정립의 재배열 및 박막 내 잔류 응력의 완화에 의해 표면이 평탄화된 결과라 할 수 있으며, 그림 7(c)는 표면 거칠기가 급격히 나빠지는 것은 고온 열처리로 인한 결정립 성장 및 입자 간 융합 현상이 표면에 불균일한 형상을 나타냈기 때문이다. 그러나 그림 7(d)를 보았을 때, 그림 7(a)와 (c)와 비교하여 열처리 이후 표면의 RMS 값은 약 1.792 nm로 소폭 평탄화가 진행되었다. 이는 열처리 온도의 증가로 결정성이 더욱 확고함으로 인해, 표면에 응집되어 있던 Y_2O_3 입자들이 충분히 분산되었다고 사료된다. 결과적

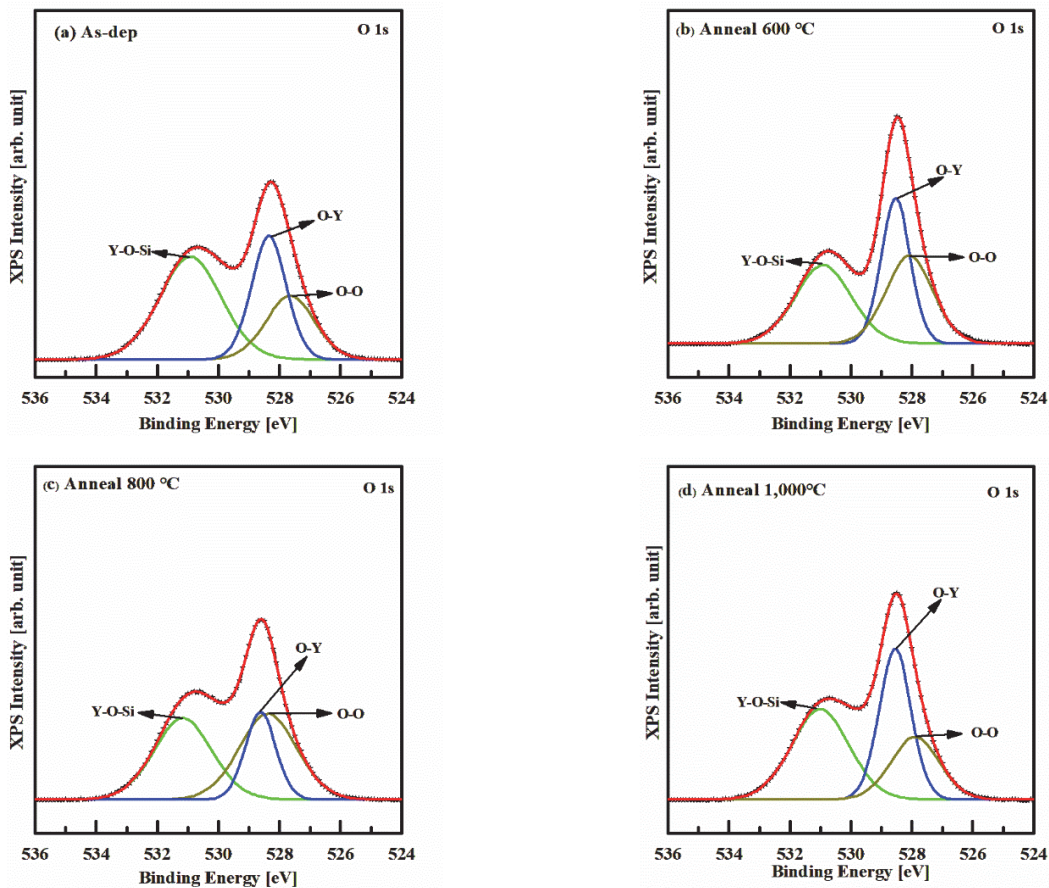


Fig. 6. The XPS spectra of the O 1s for the Y_2O_3 thin films as a function of the annealing temperature.

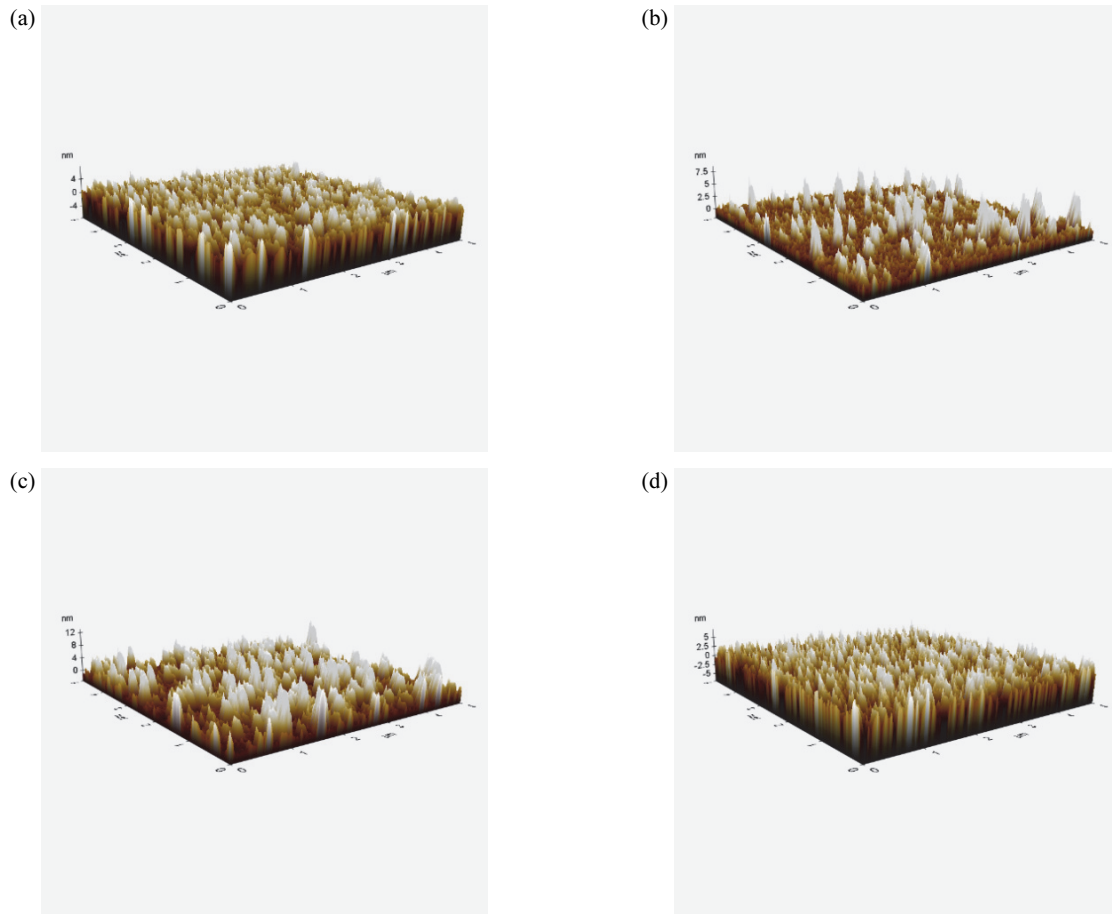


Fig. 7. The AFM 3D images and RMS of the Y_2O_3 thin films as a function of the annealing temperature; (a) As-deposition in the sub. temp. $400^\circ C$ RMS = 1.816 nm, (b) anneal $600^\circ C$ in the sub. temp. $400^\circ C$ RMS = 0.979 nm, (c) anneal $800^\circ C$ in the sub. temp. $400^\circ C$ RMS = 2.154 nm, and (d) anneal $1,000^\circ C$ in the sub. temp. $400^\circ C$ RMS = 1.792 nm.

으로 Y_2O_3 박막의 표면 특성은 열처리 온도에 따라 비선형적인 현상으로 나타날 수 있으며, 전자 소자나 게이트 절연막 등에서 요구 조건인 낮은 거칠기 표면 특성에 최적 조건으로 판단할 수 있다 [12].

4. 결론

본 연구에서는 RF sputtering 스퍼터링 시스템에서 Y_2O_3 타겟을 이용하여 Y_2O_3 박막을 실리콘 웨이퍼 기판 위에 증착하였다. 증착된 Y_2O_3 는 SEM 단면 측정을 통해 $400^\circ C$ 가 227 nm/min의 두께와 1.34% 균일도를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 산소 분위기(O_2)에서 각각 600, 800, 그리고 $1,000^\circ C$ 로 1시간 열처리되었다. XRD 패턴을 분석하였을 때, 열처리 온도가 $800^\circ C$ 까지는 peak의 밀도

가 증가하는 것을 확인되었으며 열처리 온도가 $1,000^\circ C$ 일 때 peak의 밀도가 감소되어 나타났다. XPS 분석을 통해서 $800^\circ C$ 에서 결정화가 일어났고, 이는 XRD 측정에서 보인 경향과 일치하였다. AFM 분석 결과는 RMS 값은 열처리 이후 표면의 RMS 값은 약 1.792 nm로 소폭 평탄화가 진행되었다. 이는 표면의 입계들을 크게 성장시키고, 표면이 평탄화되는 것을 보아 열처리 후 박막의 결정성 개선의 효과가 있다고 판단하였다. 결과적으로 Y_2O_3 박막의 표면 특성은 열처리 온도에 따라 비선형적인 현상으로 나타날 수 있으며, 전자소자나 게이트 절연막 등에서 요구 조건인 낮은 거칠기 표면 특성에 최적 조건으로 판단할 수 있다.

ORCID

Gwan-Ha Kim

<https://orcid.org/0000-0002-3914-2642>

REFERENCES

- [1] M. H. Cho, D. H. Ko, K. Jeong, S. W. Whangbo, C. N. Whang, S. C. Choi, and S. J. Cho, *Thin Solid Films*, **349**, 266 (1999).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(99\)00174-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(99)00174-1)
- [2] X. Cheng, Z. Qi, G. Zhang, H. Zhou, W. Zhang, and M. Yin, *Physica B: Condensed Matter*, **404**, 146 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2008.10.022>
- [3] V. I. Sougleridis, V. Constantoudis, M. Alexe, R. Scholz, G. Vellianitis, A. Dimoulas, *Thin Solid Films*, **468**, 303 (2004).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.05.076>
- [4] S. Abubakar, S. Kaya, A. Aktag, and E. Yilmaz, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **28**, 13920 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-017-7241-7>
- [5] Y. Tang, Y. Liu, Z. Wan, and B. Xi, *Journal of Alloys and Compounds*, **991**, 174532 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.174532>
- [6] N. Boysen, D. Zanders, T. Berning, S. M. J. Beer, D. Rogalla, C. Bock, and A. Devi, *RSC Adv.*, **11**, 2565 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1039/D0RA09876K>
- [7] G. Fang, L. Xu, Y. Cao, and A. Li, *Coord. Chem. Rev.*, **322**, 94 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2016.05.011>
- [8] S. Nasiri, M. Rabiei, A. Palevicius, G. Janusas, A. Vilkauskas, V. Nutalapati, and A. Monshi, *Nano Trends*, **3**, 100015 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nwnano.2023.100015>
- [9] S. Lee, Y. Cho, S. Heo, J. H. Bae, I. M. Kang, K. Kim, W. Y. Lee, and J. Jang, *Nanomaterials*, **14**, 791 (2024).
doi: <https://doi.org/10.3390/nano14090791>
- [10] Y. H. Wu, C. C. Lin, Y. C. Hu, M. L. Wu, J. R. Wu, and L. L. Chen, *IEEE Electron Device Lett.*, **32**, 1107 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1109/LED.2011.2151171>
- [11] J. Zhu, Y. Zhu, W. Shen, Y. Wang, J. Han, G. Tian, P. Lei, and B. Dai, *Thin Solid Films*, **519**, 4894 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.01.049>
- [12] T. M. Pan and W. W. Yeh, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **27**, 700 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1116/1.3151816>