

• 특집 • 에너지변환 및 저장재료의 공정기술 동향

에너지 및 정보 저장용 고유전율 박막의 원자층 증착 공정

High-k Thin Films by Atomic Layer Deposition for Energy and Information Storage

안지환^{1,#}
Jihwan An^{1,#}

¹ 서울과학기술대학교 MSDE전공 (Department of Manufacturing Systems and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology)
Corresponding Author / E-mail: jihwanan@seoultech.ac.kr, TEL: +82-2-970-7276
ORCID: 0000-0002-7697-9935

KEYWORDS: Atomic layer deposition (원자층 증착법), High-k thin film (고유전율 박막), Crystallization (결정화), Thermal annealing (열처리), Plasma treatment (플라즈마 처리)

High-k dielectric thin films are widely applied in energy conversion/storage and information storage devices such as Dynamic Random access Memory (DRAM), Multilayer Ceramic Capacitor (MLCC), thermoelectric devices, etc. Among them, perovskite thin films, for instance, strontium titanate (STO) and barium titanate (BTO) are known to have extremely superior dielectric properties. Atomic layer deposition (ALD), can deposit thin films through atomic layering producing uniform and conformal high-k thin films with precise thickness control. While relatively low crystallinity of film quality due to low deposition temperatures of ALD can develop practical issues, they can be overcome by employing additional processes such as thermal annealing, plasma treatment, and seed layering. ALD, STO and BTO thin films treated with these additional processes demonstrate more improved crystallinity and electrical properties. In this paper, the processes to enhance properties of ALD high-k thin films, BTO and STO films are reviewed. Perspectives into high quality ALD high-k thin films as well as current efforts to further improve the film quality are discussed.

Manuscript received: October 1, 2018 / Revised: October 15, 2018 / Accepted: November 5, 2018

1. 서론

고유전율(High-k) 박막은 동적 랜덤 액세스 메모리(Dynamic Random Access Memory, DRAM)와 같은 정보 저장용 전자 소자를 제작하는 데에 필수적인 재료이다. 최근의 전자 소자는 소형화 및 고집적화가 이루어지고 있으며, 이러한 추세에 따라 차세대 고유전율 박막에 대한 관심 및 연구 또한 활발하게 이루어지고 있다(Fig. 1).¹⁻¹³ 또한 고유전율 박막은 적층 세라믹 컨덴서(Multilayer Ceramic Capacitor, MLCC) 등 에너지 저장용 소자나 열전 소자(Thermoelectric Device) 등 에너지 변환 소자의 재료로도 주목받고 있다.^{8,11,13} 지르코니아(ZrO₂) 또는 하프니아(HfO₂) 박막 등이

기존의 유전 박막을 대체할 수 있는 재료로서 많이 연구되어져 왔으나, 고성능 소자 개발을 위해서는 더욱 높은 유전율을 갖는 박막의 개발이 필요한 상황이다. 이러한 면에서 바륨 타이타네이트(BaTiO₃, BTO), 스트론튬 타이타네이트(SrTiO₃, STO) 등의 페로브스카이트(Perovskite) 박막은 높은 유전율(>100)로 인하여 많은 관심을 받고 있다(Fig. 2).³⁻⁶ 페로브스카이트 박막의 높은 유전 상수는 결정성 타이타늄 산화물(TiO₂)의 높은 유전율(Anatase: 30 - 40, Rutile: 83 - 100)에 기반하는 것으로 알려져 있으며, 여기에 Ba 및 Sr 이온과 같은 A-Site 양이온이 첨가될 경우 페로브스카이트 상이 생성되게 된다.^{7,8}

다양한 박막 증착법 중에서도 원자층 증착법(Atomic Layer

Deposition, ALD)은 매우 얇은 고유전율 박막을 증착하기에 적합한 공정이다.⁹⁻¹² ALD는 화학적 기상 증착법(Cheical Vapor Deposition, CVD)의 일종으로, 자기 제한적인 표면 반응에 기반한 공정이다. 전구체와 산화제(산화물 박막일 경우) 사이에 리간드 교환 반응을 통하여 하나의 ALD 사이클(전구체 반응 + 산화제 반응) 당 단일 원자층 씩 박막을 증착할 수 있기 때문에 타 박막 증착 공정 대비 얇으면서도 균일한 고품질의 박막을 증착할 수 있다. ALD는 높은 형상 적응도를 가진 박막을 증착할 수 있으므로, 3차원 형상 또는 고종횡비를 가진 기판 상에도 균일하게 박막을 증착할 수 있다는 장점이 있다. 또한 CVD 공정 대비 상대적으로 낮은 증착 온도(보통 < 400°C) 때문에 증착 기판에 기계적 손상을 최소화할 수 있다. 최근에는 플라즈마를 이용하여 저온에서 ALD 박막을 증착할 수 있는 플라즈마 ALD (Plasma-Enhanced ALD, PEALD)가 많이 연구되고 있다.¹¹⁻¹³ PEALD 공정에서는 산소, 수소, 암모니아 플라즈마 등을 이용하여 높은 반응성을 가진 이온 및 라디칼 등을 발생시켜 막질 개선 및 결정화도 향상을 가능하게 할 수 있다. 따라서 고유전율 페로브스카이트 박막을 ALD 또는 PEALD를 이용하여 증착하려는 연구가 최근 활발히 진행되어 왔다. 특히 박막의 유전율은 막 결정화도가 높아질수록 증가하는 경향이 있으므로, ALD 공정 조건이 막 결정성에 미치는 영향을 연구한 논문이 많이 출판되었다. 또한 ALD 공정을 이용한 도핑 등을 통하여 막의 유전 상수 및 누설 전류 밀도를 제어하고자 하는 연구들이 수행되어 왔다.

본 논문에서는 최근 연구자들의 관심 및 관련 연구가 증가하고 있는 고유전율 박막의 ALD 증착에 관련된 최근 연구 결과들을 리뷰하고자 한다. 특히 초고유전율 박막인 페로브스카이트 BTO 및 STO 박막을 중심으로 ALD 및 PEALD의 공정 조건이 박막의 결정성 및 막질에 미치는 영향을 논하고자 한다. 이를 통하여 ALD 공정 조건과 박막의 결정성 및 막질의 상관 관계를 파악하고, 나아가 에너지 및 정보 저장용 고품질 박막 증착을 위한 공정 개발 측면에서 시사점에 대하여 알아보하고자 한다.

2. 고품질 ALD BTO 및 STO 박막 증착 공정

2.1 고유전율 박막의 ALD 증착

박막(두께 < 100 nm)의 성질은 동일한 벌크 소재의 성질과는 매우 다르며, 이는 많은 막질이 두께의존적(Thickness Dependent)이라는 점 때문에 발생한다.¹⁴⁻¹⁶ 예를 들어 박막의 두께가 얇아질수록 막 내부 결정립의 크기는 작아지고 결정립계의 밀도는 증가하며, 결정성은 저하되는 경향을 보인다. 이러한 복합적인 요인으로 인하여 고유전율 박막 또한 막의 두께가 얇아질수록 고유전 유전 성질을 잃어버리기도 한다.

이와 더불어 고유전율 박막을 ALD 공정으로 증착할 경우에 추가되는 문제점 또한 존재한다. 먼저 ALD는 증착 온도가 낮기 때문에 박막의 결정화가 잘 되지 않는다. 또한 ALD 박막 내부에는 전구체의 리간드 교환 반응시 불완전한 반응으로 인해 전구체

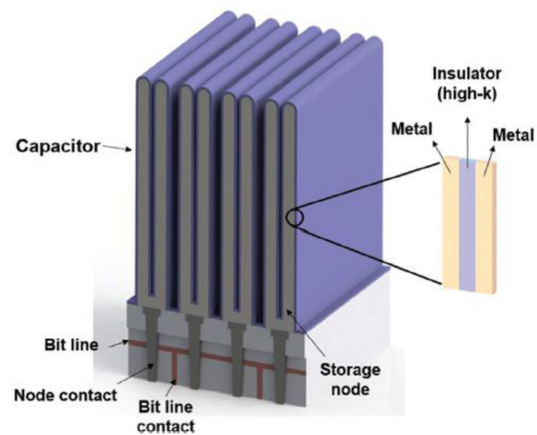


Fig. 1 Schematic diagram of a DRAM capacitor. Reproduced from ref. 12

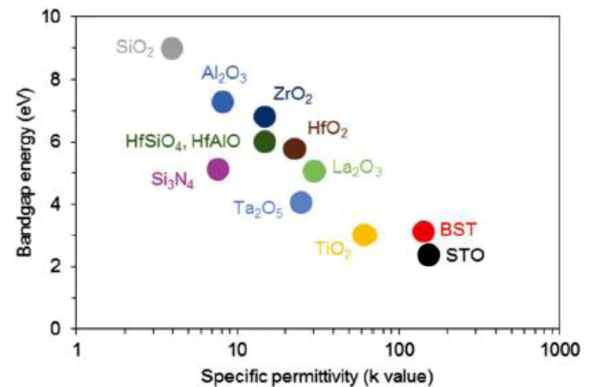


Fig. 2 Specific permittivity vs. bandgap energy of various materials including high-k materials. Reproduced from ref. 12

분자에 포함되어 있던 탄소, 질소 등의 불순물이 함유될 가능성이 높다. 이는 추가적으로 막의 결정화를 저하시킬 수 있다. 따라서 높은 유전율을 비롯, BTO 또는 STO 박막이 가진 고유의 성질이 발휘되지 않을 수 있다. 따라서 ALD로 고유전율 박막을 증착시에는, 반드시 열 처리, 플라즈마 처리, 또는 씨앗층(Seed Layer) 증착 등을 통하여 막질 및 결정성을 개선해 주어야 할 필요성이 있다.

2.2 열처리를 통한 막질 개선

열처리(Thermal Annealing)는 ALD박막의 막질 개선을 위하여 가장 많이 사용되는 공정 중의 하나이다.¹⁷⁻²⁶ 특히 박막 표면의 국부적 열처리를 위한 급속 열처리법(Rapid Thermal Annealing, RTA)을 이용하면 박막 표면 원자가 열에너지를 받아 결정 격자 구조상 안정적인 위치를 찾아가게 되고 이를 통해 결정화가 일어나게 된다. 추가적으로 열처리를 통하여 박막 내부의 결함이나 불순물 등을 제거할 수도 있어 막의 전기적인 성질(누설 전류 등)을 개선하는 효과도 있다. 열처리를 통한 결정화 정도는 박막의 성분비, 기판의 종류 등에 따라 크게 달라질 수 있다(Fig. 3). 따라서 이에 따라 열처리 온도, 시간 및 분위기 등을 조절해야 한다.

열처리 방식은 ALD 사이클마다 열처리하는 In-Cycle Annealing

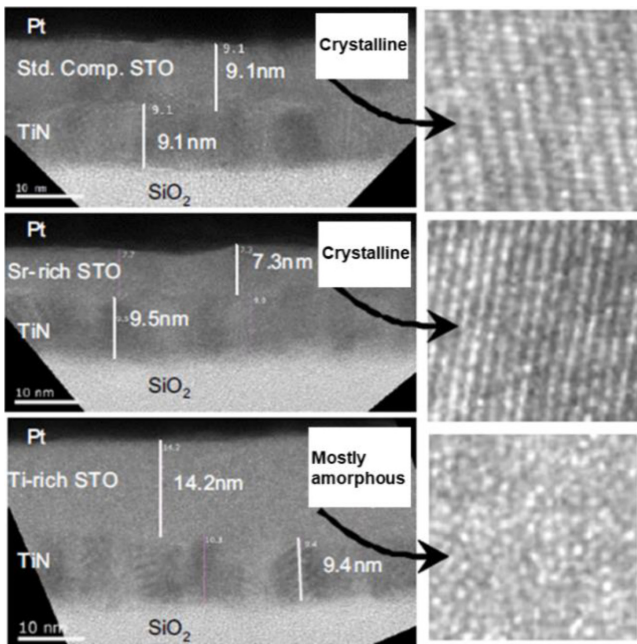


Fig. 3 Transmission electron microscopy (TEM) images of thermally-annealed (550°C, 1 min, N₂) ALD STO films (Pt/STO/TiN) showing the dependence of crystallization on the composition (Sr:Ti ratio). Reproduced from ref. 26

Table 1 Summary of ALD STO and BTO thin films with thermal annealing treatment

Main material	Annealing temperature (°C)	Annealing environment	Ref
STO	500	Air	17
	600/650	N ₂	20
	600	N ₂	21
	525-700	N ₂	23
	650	N ₂	24
	650	N ₂	25
BTO	550	N ₂	26
	600	O ₂	18
	600	O ₂	19

(ICA)과 모든 증착이 완료된 후 열처리하는 Post-Deposition Annealing (PDA)로 나눌 수 있다. 이 중 ICA는 공정 생산성을 저하시킬 수 있다는 문제가 있으나, 이의 해결을 위하여 최근 고 출력 제논(Xe) 램프 등을 이용하여 박막 표면을 급속히 열처리하는 플래시 램프 열처리(Flash Lamp Annealing, FLA) 등의 공정이 개발된 바 있다.²² PDA는 상대적으로 공정이 간단하여 실제 ALD 박막의 결정화에 많이 활용된 바 있으며, PDA의 ALD STO 및 BTO 박막 공정에서의 활용예는 Table 1에 정리되어 있다.

2.3 플라즈마 처리를 통한 막질 개선

플라즈마 처리는 높은 공정 온도(> 600°C)의 필요성 없이 박막을 결정화시킬 수 있다는 면에서 활용도가 높다.^{7,11,27-32} 플라즈

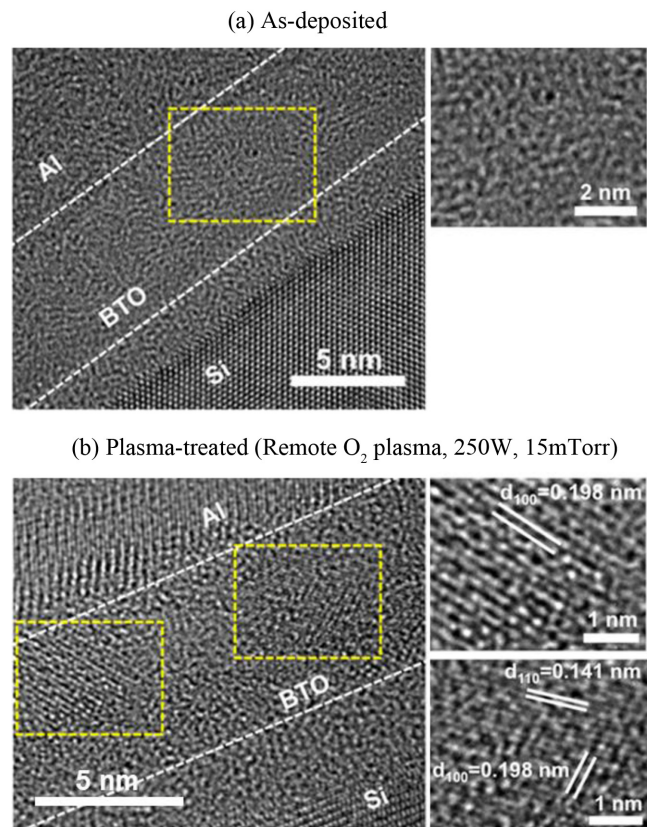


Fig. 4 TEM images of (a) as-deposited and (b) plasma-treated ALD BTO films on Si wafer. Zoomed-in images of yellow dotted regions are shown on the right. Reproduced from ref. 7

Table 2 Summary of ALD STO and BTO thin films with plasma treatment

Main Material	Plasma type	Intra- or post-dep	Crystallinity	Ref
STO	Remote O ₂ plasma	Intra	Partially crystalline	27,28, 31,32
BTO	Remote O ₂ plasma	Post and Intra	Partially crystalline	7,11

마 처리를 통한 결정화는 주로 플라즈마 내부의 이온을 이용한다. 플라즈마 내부에는 전하를 띤 이온 및 전하를 띠지 않은 라디칼 등이 존재하는데, 이 중 이온은 플라즈마와 기판 간의 플라즈마 쉬스(Plasma Sheath)에서 가속되어 기판 표면에 상대적으로 높은 에너지(수십 eV)를 가지고 도달한다. 박막 표면에 충돌하는 이온의 운동 에너지로 인해 표면의 원자가 이동하게 되고 이를 통하여 표면에서 결정화가 발생하게 된다(Fig. 4).⁷

ALD 공정에 활용되는 플라즈마는 발생 위치에 따라 직접 플라즈마(Direct Plasma)와 원격 플라즈마(Remote Plasma)로 나눌 수 있다. 직접 플라즈마는 높은 밀도의 이온을 기판 근접거리에서 발생시킬 수 있다는 장점이 있으나 기판 표면에 손상을 가할 수 있다는 단점이 있다. 반면 원격 플라즈마는 기판에서 먼 거리에서 플라즈마를 발생시키기 때문에 상대적으로 이온의 발생 밀도가

Table 3 Summary of ALD STO and BTO thin films seed layering

Main material	Seed layer (Thickness in nm)	Deposition temperature (°C)	Seed layer annealing temperature	Ref
STO	STO(5)	250	650	33
	STO(1.4)	225	600	27
	STO(3-5)	370	650-700	34
	STO(3)	225	600	28
	STO(5)	250	700	35
	STO(4-6)	370	700	36
	SrO(1.4)	225	600	27
	SrO(2.7)	225	600	28

났다. 그러나 기판 표면의 손상이 없고 플라즈마-기판 간 거리 조절 또는 기판의 전기적 바이어싱 등을 통해 기판 표면에 도달하는 이온의 밀도 및 에너지를 독립적으로 제어할 수 있다는 점 때문에 최근 많이 활용되고 있다. 플라즈마 처리 또한 열처리와 마찬가지로 박막 증착중(Intra-Deposition) 또는 증착 이후(Post-Deposition) 처리가 가능하다. BTO 및 STO 박막을 원격 플라즈마를 이용하여 결정화한 연구 결과는 Table 2에 정리되어 있다.

2.4 Seed Layer를 통한 막질 개선

결정화된 Seed Layer를 이용하면 그 위에 증착되는 박막의 결정성을 향상시킬 수 있다.^{27,28,33-36} 극히 얇은 (보통 < 5 nm) 박막을 기판에 먼저 증착하고 추가적으로 수 분간의 짧은 열처리(보통 > 600°C)를 해주면 매우 결정성이 높은 Seed Layer를 얻을 수 있는데, 이 위에 박막을 증착하게 되면 결정성이 높은 박막을 얻을 수 있다. 박막의 결정성은 Seed Layer의 종류, 두께, 결정화도 등에 영향을 받을 수 있으므로 이에 대한 공정 최적화가 수행되어야 한다. 예를 들어 ALD STO 박막의 증착을 위하여는 보통 STO 또는 SrO 박막이 Seed Layer로 활용된다. 관련 연구 결과는 Table 3에 정리되어 있다.

3. 결론

본 논문에서는 차세대 에너지 변환/저장 및 정보 저장용 소재로 주목받고 있는 페로브스카이트 고유전율 박막을 증착하고 막질을 개선하기 위한 ALD 공정에 대하여 리뷰하였다. ALD공정의 낮은 증착 온도 및 불완전한 리간드 교환 반응으로 인하여 발생할 수 있는 막 결정성의 저하 및 불순물 함유 등의 문제점을 열처리, 플라즈마 처리 및 Seed Layering 등을 통하여 개선한 결과를 정리하였다. 또한 각 공정을 통한 막질 개선의 원리에 대하여도 간단히 논하였다.

최근 플래시 램프 열처리(FLA), 원격 플라즈마 처리 등 새로운 박막 처리 공정들이 연구 및 개발되면서 고품질의 ALD 페로브스카이트(BTO 및 STO) 고유전율 박막의 제작이 가능해졌다. 또한 고품질의 박막 제작에 필수적인 신규 전구체 개발 및 박막 정밀

분석 기법의 발전으로 인하여 향후 추가적인 막질의 개선이 기대된다. 향후 고품질 고유전율 ALD 페로브스카이트 박막은 에너지 변환 및 저장용, 정보 저장용 분야뿐만 아니라 새로운 적용 분야에서 해당 공정 및 박막의 활용도가 제고될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행하였음.

REFERENCES

1. Kingon, A. I., Maria, J.-P., and Streiffer, S., "Alternative Dielectrics to Silicon Dioxide for Memory and Logic Devices," *Nature*, Vol. 406, No. 6799, pp. 1032-1038, 2000.
2. Seo, M., Kim, S. K., Han, J. H., and Hwang, C. S., "Permittivity Enhanced Atomic Layer Deposited HfO₂ Thin Films Manipulated by a Rutile TiO₂ Interlayer," *Chemistry of Materials*, Vol. 22, No. 15, pp. 4419-4425, 2010.
3. Leskelä, M. and Ritala, M., "Atomic Layer Deposition (ALD): From Precursors to Thin Film Structures," *Thin Solid Films*, Vol. 409, No. 1, pp. 138-146, 2002.
4. Wang, Z., Yasuda, T., Hatatani, S., and Oda, S., "Enhanced Dielectric Properties in SrTiO₃/BaTiO₃ Strained Superlattice Structures Prepared by Atomic-Layer Metalorganic Chemical Vapor Deposition," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 38, No. 12, p. 6817, 1999.
5. Lee, S. W., Kwon, O. S., Han, J. H., and Hwang, C. S., "Enhanced Electrical Properties of SrTiO₃ Thin Films Grown by Atomic Layer Deposition at High Temperature for Dynamic Random Access Memory Applications," *Applied Physics Letters*, Vol. 92, No. 22, Paper No. 222903, 2008.
6. Schafranek, R., Giere, A., Balogh, A. G., Enz, T., Zheng, Y., et al., "Influence of Sputter Deposition Parameters on the Properties of Tunable Barium Strontium Titanate Thin Films for Microwave Applications," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 29, No. 8, pp. 1433-1442, 2009.
7. An, J., Usui, T., Logar, M., Park, J., Thian, D., et al., "Plasma Processing for Crystallization and Densification of Atomic Layer Deposition BaTiO₃ Thin Films," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 6, No. 13, pp. 10656-10660, 2014.
8. Kim, Y., Schindler, P., Dadlani, A. L., Acharya, S., Provine, J., et al., "Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition of Barium Titanate with Aluminum Incorporation," *Acta Materialia*, Vol. 117, No. pp. 153-159, 2016.
9. George, S. M., "Atomic Layer Deposition: An Overview," *Chemical Reviews*, Vol. 110, No. 1, pp. 111-131, 2009.

10. Schindler, P., Logar, M., Provine, J., and Prinz, F. B., "Enhanced Step Coverage of TiO₂ Deposited on High Aspect Ratio Surfaces by Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition," *Langmuir*, Vol. 31, No. 18, pp. 5057-5062, 2015.
11. Schindler, P., Kim, Y., Thian, D., An, J., and Prinz, F. B., "Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition of BaTiO₃," *Scripta Materialia*, Vol. 111, No. pp. 106-109, 2016.
12. Shim, J., Choi, H., Kim, Y., Torgersen, J., An, J., et al., "Process-Property Relationship in High-k ALD SrTiO₃ and BaTiO₃: A Review," *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 5, No. 32, pp. 8000-8013, 2017.
13. Cho, J., Park, J., Prinz, F. B., and An, J., "Thermal Conductivity of Ultrathin BaTiO₃ Films Grown by Plasma-Assisted Atomic Layer Deposition," *Scripta Materialia*, Vol. 154, pp. 225-229, 2018.
14. Parker, L. H. and Tasch, A. F., "Ferroelectric Materials for 64 Mb and 256 Mb DRAMS," *IEEE Circuits and Devices Magazine*, Vol. 6, No. 1, pp. 17-26, 1990.
15. Shaw, T., Trolrier-McKinstry, S., and McIntyre, P., "The Properties of Ferroelectric Films at Small Dimensions," *Annual Review of Materials Science*, Vol. 30, No. 1, pp. 263-298, 2000.
16. Stengel, M. and Spaldin, N. A., "Origin of the Dielectric Dead Layer in Nanoscale Capacitors," *Nature*, Vol. 443, No. 7112, pp. 679-682, 2006.
17. Vehkamäki, M., Hatanpää, T., Hänninen, T., Ritala, M., and Leskelä, M., "Growth of SrTiO₃ and BaTiO₃ Thin Films by Atomic Layer Deposition," *Electrochemical and Solid-State Letters*, Vol. 2, No. 10, pp. 504-506, 1999.
18. Vehkamäki, M., Hatanpää, T., Ritala, M., Leskelä, M., Väyrynen, S., et al., "Atomic Layer Deposition of BaTiO₃ Thin Films - Effect of Barium Hydroxide Formation," *Chemical Vapor Deposition*, Vol. 13, No. 5, pp. 239-246, 2007.
19. Matero, R., Rahtu, A., Haukka, S., Tuominen, M., Vehkamäki, M., et al., "Scale-Up of the BaTiO₃ ALD Process onto 200 mm Wafer," *ECS Transactions*, Vol. 1, No. 10, pp. 137-141, 2006.
20. Aslam, N., Longo, V., Keuning, W., Roozeboom, F., Kessels, W., et al., "Influence of Stoichiometry on the Performance of MIM Capacitors from Plasma-Assisted ALD SrTiO₃ Films," *Physica Status Solidi (a)*, Vol. 211, No. 2, pp. 389-396, 2014.
21. Longo, V., Leick, N., Roozeboom, F., and Kessels, W., "Plasma-Assisted Atomic Layer Deposition of SrTiO₃: Stoichiometry and Crystallinity Studied by Spectroscopic Ellipsometry," *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, Vol. 2, No. 1, pp. 15-22, 2013.
22. Langston, M. C., Dasgupta, N. P., Jung, H. J., Logar, M., Huang, Y., et al., "In Situ Cycle-by-Cycle Flash Annealing of Atomic Layer Deposited Materials," *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 116, No. 45, pp. 24177-24183, 2012.
23. Menou, N., Popovici, M., Clima, S., Opsomer, K., Polspoel, W., et al., "Composition Influence on the Physical and Electrical Properties of Sr_xTi_{1-x}O₃-based Metal-Insulator-Metal Capacitors Prepared by Atomic Layer Deposition Using Tin Bottom Electrodes," *Journal of Applied Physics*, Vol. 106, No. 9, p. 094101, 2009.
24. Lee, S. W., Han, J. H., Han, S., Lee, W., Jang, J. H., et al., "Atomic Layer Deposition of SrTiO₃ Thin Films with Highly Enhanced Growth Rate for Ultrahigh Density Capacitors," *Chemistry of Materials*, Vol. 23, No. 8, pp. 2227-2236, 2011.
25. Lee, W., Han, J. H., Jeon, W., Yoo, Y. W., Lee, S. W., et al., "Atomic Layer Deposition of SrTiO₃ Films with Cyclopentadienyl-Based Precursors for Metal-Insulator-Metal Capacitors," *Chemistry of Materials*, Vol. 25, No. 6, pp. 953-961, 2013.
26. Menou, N., Wang, X., Kaczer, B., Polspoel, W., Popovici, M., et al., "0.5 nm EOT Low Leakage ALD SrTiO₃ on TiN MIM Capacitors for Dram Applications," *Electron Devices Meeting*, pp. 1-4, 2008.
27. Ahn, J.-H., Kang, S.-W., Kim, J.-Y., Kim, J.-H., and Roh, J.-S., "Effect of Sr-Ruthenate Seed Layer on Dielectric Properties of SrTiO₃ Thin Films Prepared by Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 155, No. 10, pp. 185-188, 2008.
28. Ahn, J.-H., Kim, J.-Y., Kim, J.-H., Roh, J.-S., and Kang, S.-W., "Enhanced Dielectric Properties of SrTiO₃ Films with a SrRuO₃ Seed by Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition," *Electrochemical and Solid-State Letters*, Vol. 12, No. 2, pp. 5-8, 2009.
29. Langereis, E., Roijmans, R., Roozeboom, F., Van De Sanden, M., and Kessels, W., "Remote Plasma ALD of SrTiO₃ Using Cyclopentadienyl-Based Ti and Sr Precursors," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 158, No. 2, pp. 34-38, 2011.
30. Kim, J., Kim, S., Jeon, H., Cho, M.-H., Chung, K.-B., et al., "Characteristics of HfO₂ Thin Films Grown by Plasma Atomic Layer Deposition," *Applied Physics Letters*, Vol. 87, No. 5, p. 053108, 2005.
31. Kwon, O. S., Kim, S. K., Cho, M., Hwang, C. S., and Jeong, J., "Chemically Conformal ALD of SrTiO₃ Thin Films Using Conventional Metallorganic Precursors," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 152, No. 4, pp. 229-236, 2005.
32. Lee, S. W., Kwon, O. S., and Hwang, C. S., "Chemically Conformal Deposition of SrTiO₃ Thin Films by Atomic Layer Deposition Using Conventional Metal Organic Precursors and Remote-Plasma Activated H₂O," *Microelectronic Engineering*, Vol. 80, pp. 158-161, 2005.
33. Kwon, O. S., Lee, S. W., Han, J. H., and Hwang, C. S., "Atomic Layer Deposition and Electrical Properties of SrTiO₃ Thin Films Grown Using Sr (C₁₁H₁₉O₂)₂, Ti (Oi-C₃H₇)₄, and H₂O," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 154, No. 6, pp. 127-133, 2007.
34. Lee, S. W., Han, J. H., Kwon, O. S., and Hwang, C. S., "Influences of a Crystalline Seed Layer During Atomic Layer

- Deposition of SrTiO₃ Thin Films Using Ti (O-iPr)₂ (Thd)₂, Sr (Thd)₂, and H₂O,” Journal of The Electrochemical Society, Vol. 155, No. 11, pp. 253-257, 2008.
35. Menou, N., Popovici, M., Opsomer, K., Kaczer, B., Pawlak, M. A., et al., “Seed Layer and Multistack Approaches to Reduce Leakage in SrTiO₃-Based Metal–Insulator–Metal Capacitors using Tin Bottom Electrode,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 49, No. 4S, <http://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.49.04DD01/meta> (Accessed 6 Nov 2018)
36. Popovici, M., Tomida, K., Swerts, J., Favia, P., Delabie, A., et al., “A Comparative Study of the Microstructure–Dielectric Properties of Crystalline SrTiO₃ ALD Films Obtained Via Seed Layer Approach,” Physica Status Solidi (a), Vol. 208, No. 8, pp. 1920-1924, 2011.

**Jihwan An**

Assistant Professor

Department of Manufacturing Systems and Design Engineering

Seoul National University of Science and Technology (SeoulTech) Research interests: thin film processes, next-generation energy conversion devices

E-mail: jihwanan@seoultech.ac.kr