

Cl₂/Ar inductively coupled plasma etching of V₂O₅ thin film

Byoung Su Choi, Sungu Hwang*, Jin Kon Kim* and Hyun Cho*[†]

Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University, Miryang 50463, Korea

**Department of Nanomechatronics Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

(Received December 2, 2024)

(Revised December 12, 2024)

(Accepted December 12, 2024)

Abstract V₂O₅ thin films were etched using Cl₂/Ar inductively coupled plasmas, and the effects of plasma composition, ICP source power, rf chuck power, and process pressure on the etch rate of V₂O₅ thin films were investigated. As the Cl₂ gas content in the Cl₂/Ar gas mixtures increased, the etch rate of V₂O₅ thin films generally increased and the etch rate as high as ~82.7 nm/min was obtained at the 66.7 Vol% condition. When the ICP source power increased, the etch rate initially increased up to 500 W, but then decreased at higher power conditions due to the decrease in the removal efficiency of the VCl_x etch products. The V₂O₅ etch rate continuously increased with increasing rf chuck power and process pressure, and a maximum etch rate of ~112.4 nm/min was obtained at 20Cl₂/10Ar, 500 W ICP source power, 250 W rf chuck power, and 5 mTorr condition.

Key words V₂O₅ thin film, Cl₂/Ar, Inductively coupled plasma, Etch rate, Surface roughness

V₂O₅ 박막의 Cl₂/Ar 유도결합 플라즈마 식각

최병수, 황승구*, 김진곤*, 조현*[†]

부산대학교 나노융합기술학과, 밀양, 50463

*부산대학교 나노메카트로닉스공학과, 부산, 46241

(2024년 12월 2일 접수)

(2024년 12월 12일 심사완료)

(2024년 12월 12일 게재확정)

요약 Cl₂/Ar 유도결합 플라즈마를 이용하여 V₂O₅ 박막을 식각하였고, 플라즈마 조성, ICP source power, rf chuck power, 공정압력이 V₂O₅ 박막의 식각속도에 미치는 영향을 조사하였다. Cl₂ 가스 함량이 증가함에 따라 V₂O₅ 박막의 식각속도가 전반적으로 증가하였고, 66.7 Vol% 조건에서 ~82.7 nm/min의 식각속도를 나타냈다. ICP source power를 증가시켰을 때 500 W까지는 식각속도가 증가하다가 그 이상의 power에서는 VCl_x 식각 반응물 제거 효율 감소로 인해 식각속도가 감소하였다. Rf chuck power와 공정 압력을 증가시킴에 따라 V₂O₅ 박막의 식각속도는 계속적으로 증가하였고, 20Cl₂/10Ar, ICP source power 500 W, rf chuck power 250 W, 5 mTorr 조건에서 ~112.4 nm/min의 가장 높은 식각속도가 얻어졌다.

1. 서론

적외선 센서는 0.7 μm~1 mm 영역의 파장을 가지는 적외선을 이용하여 온도 감지, 방사선 세기 감지, 적외선 방출원 및 동작 식별이 가능한 검출 소자로서 감지 메커니즘에 따라 광자형 센서(또는 양자형 센서)와 열형 센서로 구분된다. 반도체 물질로 제조되는 광자형 센서는 적외선이 입사되었을 때 반도체 물질 내에서 일어나는

전자-정공 여기로 인해 유발되는 전류, 전압 변화를 통해 적외선을 감지하는데, 응답속도가 매우 빠르고 감도가 우수하나 근적외선 파장 이외의 장파장 적외선을 감지하고자 할 때는 주변 온도에 의해 야기되는 전자-정공 쌍 형성을 억제하기 위한 냉각장치가 필수적이다. 이에 반해 열형 센서는 넓은 파장대역에 걸쳐 균일한 감지능(detectivity)을 가지며, 냉각이 필요치 않아 소형화할 수 있는 장점이 있는 반면에 응답속도가 상대적으로 느리고 감지능이 다소 낮다는 단점이 있다[1-3].

최근에 개발된 반도체 소자 제조기술을 이용한 새로운 개념의 볼로미터 2차원 어레이 기반 열형 센서인 마이

[†]Corresponding author

E-mail: hyuncho@pusan.ac.kr

크로볼로미터(microbolometer) 타입 적외선 센서는 기존 소자에 비해 크게 향상된 응답속도 및 감지능을 가지며, 실리콘 판독회로와 멤브레인 구조의 볼로미터 2차원 어레이를 결합하면 2차원 실시간 열영상 구현이 가능함이 보고되었다[4-8]. 우수한 성능과 각종 모바일 기기에 장착 가능한 소형화 및 대량생산이 가능한 장점을 가지는 비냉각형 마이크로볼로미터 적외선 센서는 사물인터넷(IoT) 기반 스마트홈, 스마트빌딩, 스마트 팩토리, 헬스케어, 소방, 자율주행차, 로봇 및 드론 등 다양한 산업 분야의 높은 활용성을 가져 지대한 관심을 끌고 있다.

마이크로볼로미터 소자는 흡수층(absorber layer), 볼로미터 저항체(resistive bolometer layer), 단열층(thermal insulation layer), 및 반사층(reflective Layer)로 구성된다. 소자의 핵심 요소인 볼로미터 저항체는 높은 저항온도계수(temperature coefficient of resistance, TCR) 특성이 요구되는데 전이금속 산화물인 산화 바나듐(V_2O_5)이 각광받고 있다[9-11]. 고품위의 마이크로볼로미터 적외선 센서소자를 제조하기 위해서 약 $1\ \mu\text{m}$ 의 두께를 가지는 V_2O_5 박막을 높은 정밀도로 미세 패터닝하는 것이 필수적이다. 이를 위해서 높은 속도와 이방성, 그리고 하부 단열층과의 높은 선택도를 확보할 수 있는 식각공정 개발이 매우 중요하다.

본 연구에서는 Cl_2/Ar 유도결합 플라즈마(inductively coupled plasma)를 적용하여 rf magnetron sputtering법으로 증착한 V_2O_5 박막을 건식 식각하였고, 플라즈마 조성, ICP source power, rf chuck power 및 공정 압력이 V_2O_5 박막의 식각속도와 표면 조도에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 과정

Rf magnetron sputtering 법으로 $\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 두께의 V_2O_5 박막을 (100) silicon 기판위에 증착하였다. 증착시 Ar과 O_2 를 혼합한 가스를 sputtering gas로 사용하였고, 인가 파워는 200 W, 압력은 10 mTorr, 기판 온도는 상온으로 유지하였다. 증착 후 박막의 결정성을 개선하기 위하여 400°C , 질소분위기에서 20분 동안 annealing하였다. 이후 V_2O_5 박막 표면을 세정하고, SCR P30 photoresist(세미원(주)) 또는 nickel mask 층으로 패터닝하였다. V_2O_5 박막의 플라즈마 식각은 planar type의 유도결합 플라즈마(inductively coupled plasma, ICP) 식각장치와 고순도의 Cl_2 와 Ar 가스를 혼합한 가스를 식각가스로 사용하여 진행하였다. 이 때 총 유량은 30 sccm(standard cubic centimeter per minute)으로 고정하였고, 식각가스 중 Cl_2 가스의 함량은 16.7, 33.3, 50, 66.7, 83.3 Vol%로 변화시켰다. ICP source power는 300~700 W, rf chuck

power는 50~250 W 범위에서 인가하였고, 공정 압력은 2~30 mTorr로 유지하였다. 식각된 시편 표면에서 mask 층을 제거한 후 식각속도와 표면조도 등의 식각특성을 Stylus profilometry(KLA-Tencor Alpha-Step D-500)와 주사탐침현미경(Park Systems NX10)으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Figure 1은 Cl_2/Ar 유도결합 플라즈마(ICP source power 500 W, rf chuck power 150 W, 5 mTorr)에서 Cl_2 가스 함량에 따른 V_2O_5 박막의 식각속도 변화를 보여주고 있다. Cl_2 가스 유량 비율을 16.7에서 83.3 Vol%까지 증가시켰을 때 66.7 Vol%까지는 V_2O_5 박막의 식각속도가 증가하였다. Cl_2/Ar 플라즈마에서 Cl_2 가스 함량 증가함에 따라 플라즈마 내 염소 radical 밀도가 증가하게 되고, 증가된 염소 radical과 박막 표면원자 간 화학적 반응에 의한 VCl_x (VCl_2 : b.p. 148°C , VCl_3 : b.p. 350°C) 식각 반응물(etched products) 생성 및 Ar^+ 이온 포격(ion bombardment)에 의한 식각 반응물 제거가 촉진된 결과로 식각속도가 증가한 것으로 사료된다. Cl_2 가스 함량을 83.3 Vol%로 더 증가시킨 조건에서는 V_2O_5 박막 표면에서의 VCl_x 식각 반응물 생성은 더 활성화된 반면에 Ar 가스 함량 감소에 따른 플라즈마 내 Ar^+ 이온 밀도 감소로 인해 식각 반응물을 표면으로부터 제거하는 이온 포격 효과가 감소하였기 때문에 식각속도가 감소한 것으로 판단된다.

$20Cl_2/10Ar$ 유도결합 플라즈마에서 ICP source power 변화에 따른 V_2O_5 박막의 식각속도 변화를 Fig. 2에 나타내었다. ICP source power 500 W까지는 식각속도가 점진적으로 증가하다가 더 높은 파워 조건에서는 식각속도가 급격하게 감소하였다. Cl_2/Ar 유도결합 플라즈마에

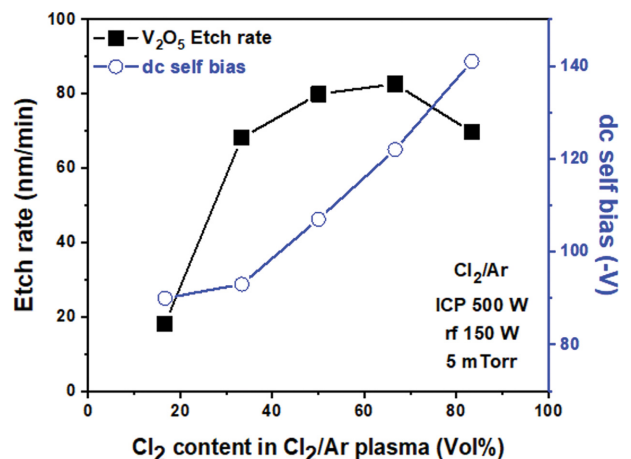


Fig. 1. V_2O_5 etch rate as a function of Cl_2 content in the Cl_2/Ar ICP discharges (500 W ICP source power, 150 W rf chuck power, 5 mTorr).

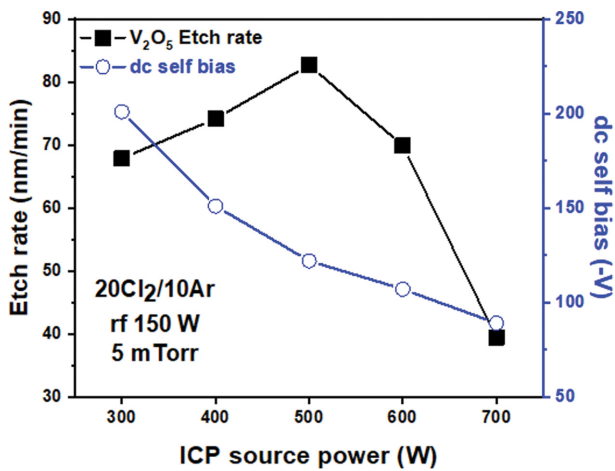


Fig. 2. V₂O₅ etch rate as a function of ICP source power in the 20Cl₂/10Ar ICP discharges (150 W rf chuck power, 5 mTorr).

서 ICP source power가 높아지면 해리반응(dissociation reaction)이 촉진되어 플라즈마 내 염소 radical과 Ar⁺ 이온의 밀도는 증가하는 반면에 Ar⁺ 이온의 에너지는 감소하게 된다[12]. 박막 표면을 포격하는 Ar⁺ 이온의 에너지는 박막 시편이 위치하는 chuck에 자생적으로 발생하는 dc self bias에 비례하는데, 그래프에 제시된 바와 같이 ICP power가 증가함에 따라 dc self bias가 계속적으로 감소하는 것을 통해 확인할 수 있다. 즉 ICP source power가 증가함에 따라 V₂O₅ 박막 표면에서 VCl_x 식각 반응물이 생성되는 반응은 증진되지만 식각 반응물 제거에 필수적인 이온 포격 효과는 점진적으로 감소하게 된다. 원활한 식각 반응이 진행되기 위해서는 식각 반응물 생성과 제거 간의 균형을 유지하는 것이 필수적인데, 500 W보다 높은 source power에서는 Ar⁺ 이온 에너지의 과다한 감소로 인해 박막 표면에 생성된 식각 반응물이 효율적으로 제거되지 못함에 따라 식각속도가 감소하였음을 알 수 있다.

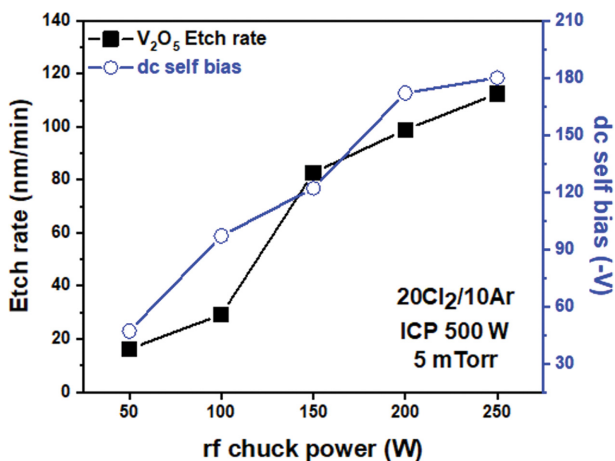


Fig. 3. V₂O₅ etch rate as a function of rf chuck power in the 20Cl₂/10Ar ICP discharges (500 W ICP source power, 5 mTorr).

Figure 3에 20Cl₂/10Ar 유도결합 플라즈마(ICP source power 500 W, 5 mTorr)에서 rf chuck power 증가에 따른 V₂O₅ 박막의 식각속도 변화를 제시하였다. 인가된 rf chuck power가 증가에 비례하여 V₂O₅ 박막의 식각속도가 계속적으로 증가하고, 250 W 조건에서 ~112.4 nm/min의 가장 높은 식각속도를 확보하였다. 플라즈마 식각 반응은 화학적 요소와 물리적 요소로 구성되는데 rf chuck power는 물리적 요소, 즉 표면에 생성된 식각 반응물 제거를 지배하는 Ar⁺ 이온의 에너지를 제어하는 공정변수이다[13]. Rf chuck power 증가는 염소 radical과 V₂O₅ 박막 표면원자 간 화학적 반응을 통해 형성된 VCl_x 식각 반응물들을 표면으로부터 제거하는 이온 포격 효과를 증진시킴에 따라 V₂O₅ 박막의 식각속도가 증가하였음을 알 수 있다.

20Cl₂/10Ar 유도결합 플라즈마에서 공정 압력이 V₂O₅ 박막의 식각속도에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 5 mTorr 압력까지는 식각 속도가 빠르게 증가하였고 이후 더 높은 압력 영역에서는 식각 속도가 완만하게 증가하였다. 플라즈마 식각에서 공정 압력 증가는 식각 반응물이 생성되는 식각의 화학적 요소를 증진시키게 된다. 공정 압력이 증가함에 따라 VCl_x 식각 반응물 생성 반응이 촉진되고, Ar⁺ 이온 포격에 의해 식각 반응물들이 효율적으로 제거됨에 따라 식각속도가 증가한 것으로 사료된다.

Figure 3에 제시한 rf chuck power 조건들에서(20Cl₂/10Ar, 500 W ICP source power, 5 mTorr) 식각된 V₂O₅ 박막 표면을 주사탐침현미경으로 관찰한 이미지와 측정된 rms(root-mean-square) 표면 조도를 Fig. 5에 제시하였다. 식각 전, 후 표면 조도 비교를 위하여 식각하지 않은 V₂O₅ 박막 표면 분석 결과를 함께 제시하였다. 20Cl₂/10Ar 플라즈마에서 식각된 V₂O₅ 박막 표면이 식각 이전

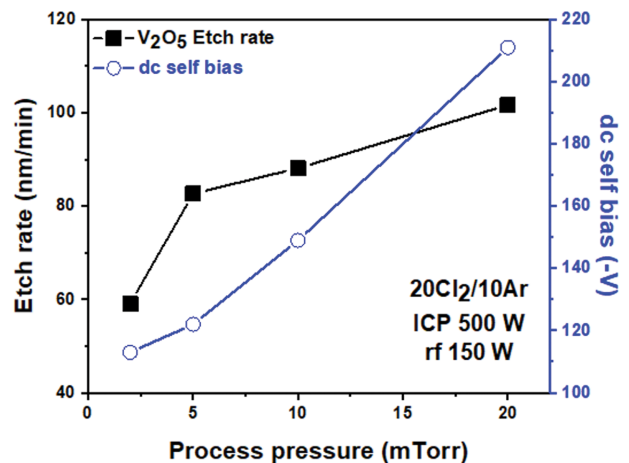


Fig. 4. V₂O₅ etch rate as a function of process pressure in the 20Cl₂/10Ar ICP discharges (500 W ICP source power, 150 W rf chuck power).

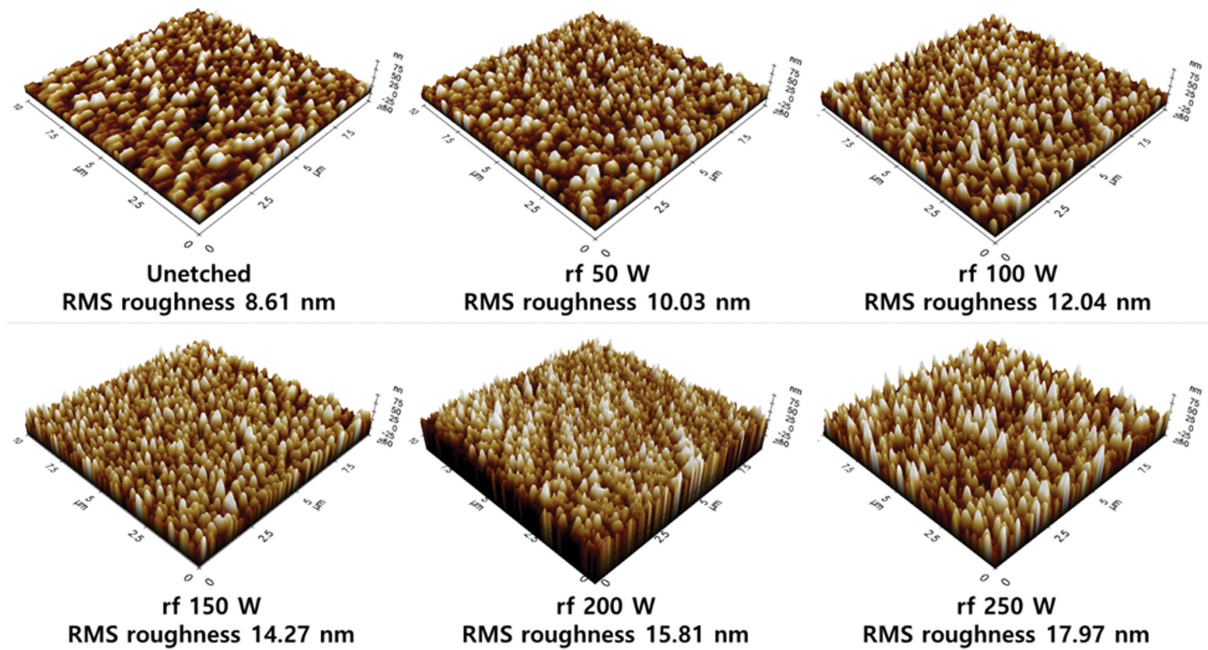


Fig. 5. AFM surface scans of V_2O_5 films etched in $20Cl_2/10Ar$ ICP discharges with different rf chuck powers (500 W ICP source power, 5 mTorr).

에 비해 더 높은 표면 조도를 나타내고, 표면 조도가 rf chuck power 증가에 비례하여 계속 증가함을 알 수 있다. 이 결과를 통하여 rf chuck power 증가에 따라 증진된 이온 포격 효과는 V_2O_5 박막의 식각 속도를 증가시키는 긍정적 효과가 있는 반면에 표면 특성을 저하시킬 수 확인할 수 있었다.

4. 결 론

우수한 감도와 빠른 응답속도 특성이 기대되는 마이크로 볼로미터 타입 적외선 센서의 감지층 소재로 많은 관심이 집중되고 있는 V_2O_5 박막의 Cl_2/Ar 유도결합 플라즈마 식각특성을 조사하였다. Cl_2/Ar 플라즈마 내 Cl_2 가스 함량을 66.7 Vol%까지 증가시켰을 때 식각의 화학적 요소가 증진됨에 따라 V_2O_5 박막 식각속도가 증가하였고, 더 높은 Cl_2 가스 함량에서는 이온 포격 효과 감소로 인해 식각속도가 감소하였다. $20Cl_2/10Ar$ 유도결합 플라즈마에서 ICP source power를 증가시켰을 때에도 이와 유사한 경향성을 나타내었다. V_2O_5 박막 식각속도는 rf chuck power 증가에 비례하며 빠르게 증가하는 강한 의존성을 나타낸 반면에 증진된 이온 포격 효과로 인해 식각된 V_2O_5 박막 표면 조도는 증가하였다. Rf chuck power 250 W 조건에서 가장 높은 ~ 112.4 nm/min의 식각속도를 확보하였다. 2~30 mTorr 영역에서 공정 압력을 증가시켰을 때 화학적 식각 요소가 증진됨에 따라 V_2O_5 박막 식각속도가 증가하였다.

감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] A. Rogalski, "Third-generation infrared photon detectors", *Opt. Eng.* 42 (2003) 3498.
- [2] W.B. Song and J.J. Talghader, "Design and characterization of adaptive microbolometers", *J. Micromech. Microeng.* 16 (2006) 1073.
- [3] P.W. Kruse, "A comparison of the limits to the performance of thermal and photon detector imaging arrays", *Infrared Phys. Technol.* 36 (1995) 869.
- [4] D. Xu, Y. Wang, B. Xiong and T. Li, "MEMS-based thermoelectric infrared sensors: a review", *Front. Mech. Eng.* 12 (2017) 557.
- [5] K.C. Liddiard, "Thin-film resistance bolometer IR detectors", *Infrared Phys.* 24 (1984) 57.
- [6] A. Subrahmanyam, Y. Bharat Kumar Reddy and C.L. Nagendra, "Nano-vanadium oxide thin films in mixed phase for microbolometer applications", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41 (2008) 195108.
- [7] S. Vadnala, N. Paul, A. Agrawal and S.G. Singh, "Enhanced infrared sensing properties of vanadium pentoxide nanofibers for bolometer application", *Mater. Sci. Semicond. Process.* 81 (2018) 82.
- [8] Y.H. Han, I.H. Choi, H.K. Kang, J.Y. Park, K.T. Kim, H.J. Shin and S. Moon, "Fabrication of vanadium oxide thin film with high-temperature coefficient of resistance using $V_2O_5/V/V_2O_5$ multi-layers for uncooled microbo-

- lometer”, *Thin Solid Films* 425 (2003) 260.
- [9] M. Abdel-Rahman, N. Al-Khalli, M.F. Zia, M. Alduraibi, B. Ilahi, E. Awad and N. Debbar, “Fabrication and design of vanadium oxide microbolometer”, *AIP Conf. Proc.* 1809 (2017) 020001.
- [10] V. Devthade and S.W. Lee, “Synthesis of vanadium dioxide thin films and nanostructures”, *J. Appl. Phys.* 128 (2020) 231101.
- [11] E.S. Awad, N. Al-khalli, M. Abdel-Rahman and N. Debaar, “Comparison of V₂O₅ microbolometer optical performance using NiCr and Ti thin films”, *IEEE Photonics Tech. Lett.* 27 (2014) 462.
- [12] J.H. Um, B.S. Choi, D.H. Jeong, H.U. Choi, S. Hwang, D.W. Jeon, J.K. Kim and H. Cho, “Chlorine-based high density plasma etching of α -Ga₂O₃ epitaxy layer”, *Electron. Mater. Lett.* 17 (2021) 142.
- [13] J.H. Um, B.S. Choi, W.S. Jang, S. Hwang, D.W. Jeon, J.K. Kim and H. Cho, “Fluorine-based inductively coupled plasma etching of α -Ga₂O₃ epitaxy film”, *Korean J. Met. Mater.* 59 (2021) 121.