

RF 스퍼터링으로 증착된 MoS₂ 박막의 Cl₂/Ar 플라즈마 식각 특성 분석

우종창¹, 엄두승², 김관하³ 

¹ 한국폴리텍대학 반도체융합캠퍼스 반도체공정장비과

² 제주대학교 전자공학과

³ 한국폴리텍대학 성남캠퍼스 반도체공정과

Analysis of Cl₂/Ar Plasma Etching Characteristics for RF-Sputtered MoS₂ Films

Jong-Chang Woo¹, Doo-Seung Um², and Gwan-Ha Kim³

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

²Department of Electronic Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

³Department of Semiconductor Process, Seongnam Campus of Korea Polytechnic, Seongnam 13122, Korea

(Received June 30, 2025; Revised July 22, 2025; Accepted July 22, 2025)

Abstract: Molybdenum disulfide (MoS₂) is a promising 2D semiconductor material for low-power electronics due to its excellent electrical properties and compatibility with conventional processes. In this study, MoS₂ thin films deposited by RF sputtering were etched using Cl₂/Ar plasma in an ICP system. The effects of Cl₂ gas ratio, RF power, and process pressure on etch rate and MoS₂/SiO₂ selectivity were investigated. Optimal results were obtained at 25% Cl₂, achieving ~38 nm/min etch rate and selectivity of 3.0. Increased source power improved both etch rate and selectivity, while higher bias power enhanced etching but reduced selectivity due to stronger ion bombardment. XPS analysis confirmed Mo–Cl and S–Cl bond formation after etching, indicating chemical reactions and some by-product residue. These results provide insights into optimized plasma etching of sputtered MoS₂ films for advanced 2D device fabrication

Keywords: RF sputtering, MoS₂ thin film, Dry etching, Cl₂/Ar plasma

1. 서론

최근 나노전자 및 차세대 소자 기술의 발전과 함께 원자 단위의 두께를 갖는 2차원(2D) 재료가 주목받고 있다 [1]. 이러한 재료들은 전통적인 벌크 반도체와 달리 표면 효과가 지배적인 양자 구조를 가지며, 이에 따라 새로운 전자·

광학적 특성을 나타낸다 [2]. 특히 2D 재료는 유연 기판 위에 쉽게 적층이 가능할 뿐만 아니라, 밴드 구조나 전도 특성을 외부 전기장, 응력, 유전체 환경 등을 통해 정밀하게 제어할 수 있어 고성능·저전력 소자 구현을 위한 차세대 플랫폼으로 간주하고 있다 [3]. 이러한 2D 재료 중에서도 이황화몰리브덴(MoS₂)은 전이금속 칼코게나이드(TMD)의 대표적인 반도체 소재로서 특별한 주목을 받고 있다 [4-6]. MoS₂는 단일층에서 약 1.8 eV의 직접 밴드갭을 가지므로, 밴드갭이 존재하지 않아 스위칭 특성 구현이 어려운 그래핀의 한계를 근본적으로 극복할 수 있다 [7]. 이러한 특성은 디지털 논리 소자나 고속 스위칭 소자 등에서의 활용 가

✉ 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.

능성을 크게 높이는 핵심 요소가 된다 [8,9]. 더욱이 MoS₂ 단일층의 밴드 구조는 주변 유전체 환경에 민감하게 반응하므로, 소자 구조 설계 시 유전체 선택이 전기적 특성에 결정적인 영향을 미치며, 이는 다양한 유전체 조합을 통한 성능 향상 가능성을 제시한다 [10]. 그뿐만 아니라 MoS₂의 소자 응용 측면에서 중요한 또 다른 특성은 우수한 계면 특성이다. MoS₂는 표면에 dangling bond가 존재하지 않기 때문에, 산화물 기반 고유전율 게이트 절연체(HfO₂, Al₂O₃ 등)와의 계면에서도 낮은 계면 상태 밀도와 적은 누설 전류를 유지할 수 있다 [11,12]. 이러한 특성은 높은 문턱전압 안정성, 낮은 subthreshold swing, 그리고 낮은 off-state 전류로 직결되어 초저전력 소자 설계에 매우 유리한 조건을 제공한다 [13]. 선행 연구 결과에 따르면 MoS₂ 기반 박막 트랜지스터는 수십에서 수백 cm²/V·s 수준의 전계효과 이동도와 108 이상의 온/오프 전류비를 달성하여, 논리 회로, RF 트랜지스터, 저전력 메모리 소자 등의 채널 물질로서 충분한 잠재력이 입증되어 왔다 [14-16].

그러나 이러한 우수한 물성을 실제 전자 소자 또는 시스템 수준에서 활용하기 위해서는 단순한 물성 확보를 넘어서는 공정 기술의 확립이 필수적이다 [17]. 특히 웨어러블, IoT, 고집적 논리 회로 등의 실용적 응용을 위해서는 기존 반도체 제조 공정과의 호환성, 대면적 균일성, 그리고 공정 반복 가능성을 모두 만족하는 박막 형성 및 패터닝 기술이 요구된다 [18]. 이를 위해서는 수 나노미터 두께의 고균일 박막을 대면적으로 구현하고, 이를 기반으로 고해상도의 정밀 패터닝 공정을 안정적으로 수행할 수 있어야 한다. 이러한 공정 요구사항 중에서도 정밀 미세 패터닝 기술은 특히 도전적인 과제이다 [19]. MoS₂는 화학적으로 매우 안정적인 층상 구조를 가지고 있어, 일반적인 플라즈마 식각 공정에서는 낮은 식각 속도와 수직 방향성 부족, 식각 부산물 잔류 등의 식각 품질 저하를 유발할 수 있는 요소들이 존재한다 [20]. 이러한 문제들은 소자 경계의 모호성이나 활성층 표면 상태의 열화를 야기하여 결과적으로 소자 특성 저하로 이어질 수 있다. 따라서 MoS₂의 물리화학적 특성을 고려한 소재 특화 식각 공정 개발이 절실히 요구되고 있다.

최근에는 MoS₂의 화학적 특성에 적합한 식각 반응 경로로서, 염소계 플라즈마의 활용 가능성이 여러 연구에서 검토되고 있다. Cl₂ 플라즈마는 MoS₂ 식각에 화학적으로 매우 유리한 반응 경로를 제공하는데, Mo 원자와 직접 반응하여 휘발성 염화 몰리브데넘(MoCl_x)을 형성하는 동시에 황(S) 또한 SCl₂와 같은 기화성 화합물로 전환해 플라즈마 환경 내에서 효과적으로 제거 가능하다 [21,22]. 이러한 반응 메커니즘의 장점은 식각 부산물의 높은 기화성으로 인

해 식각 후 잔류물이 적고 표면 손상을 최소화할 수 있다는 것이다. 또한 Cl₂/Ar 혼합 플라즈마는 식각 반응성을 향상하게 시키면서도 우수한 공정 제어성을 제공하여, 고해상도 패터닝을 요구하는 집적 소자에 적합한 이방성 식각 특성을 확보할 수 있다. 하지만 현재까지의 연구 동향을 살펴보면, 대부분 CVD 방식으로 합성된 MoS₂ 박막을 대상으로 하고 있으며, 공정 조건이나 결정성이 다른 스퍼터링 기반 MoS₂ 박막에 대한 Cl₂ 플라즈마 식각 특성 연구는 상당히 미흡한 실정이다. CVD 방법은 화학반응을 이용해 고온에서 증착되므로 일반적으로 더 우수한 결정성을 얻을 수 있지만, 기판의 온도 제한이 있을 수 있으며, 스퍼터링은 물리적인 방법으로 저온에서도 증착가능하며 후속 열처리 공정을 통하여 기판 또는 소자가 허용 가능한 온도 범위에서 결정성을 얻을 수 있다. 스퍼터링으로 증착된 박막은 비정질성, 조성 균일도, 밀도 등이 CVD 박막과 현저히 다르므로 동일한 식각 조건을 적용하더라도 반응 속도, 식각 균일성, 손상 정도 등에서 상당한 차이를 보일 수 있다.

본 연구에서는 RF 스퍼터링 방식으로 증착된 MoS₂ 박막에 대해 Cl₂ 기반 플라즈마 식각 특성을 체계적으로 조사하였으며, Cl₂/Ar 혼합비, 상부 RF 전력, 하부 RF 전력 등 주요 공정 변수에 따른 식각 특성 및 표면 화학 변화를 분석하였다. Cl₂ 농도 25% 조건에서 식각률은 약 38 nm/min까지 가파르게 증가하였으며, 선택비는 Cl₂ 25% 조건에서 최대 약 3.0을 기록하였다. 상부 전력의 증가는 플라즈마 밀도를 높여 식각 속도와 선택비를 향상시키고, 하부 전력의 증가는 기판에 도달하는 이온 에너지를 높여 식각속도를 향상시켰으나, 과도한 물리적 스퍼터링 효과로 인해 선택비는 감소하는 양상을 보였다. 또한, XPS 분석을 통해 식각 후 Mo-Cl 및 S-Cl 결합의 형성이 확인되었고, 이는 Cl₂ 기반 식각 공정에서 화학 반응과 물리적 스퍼터링이 결합된 식각 메커니즘이 유효하게 작동함을 시사한다. 이러한 결과는 스퍼터링 기반 MoS₂ 박막의 정밀 패터닝을 위한 최적 공정 조건 도출과 표면 반응 메커니즘 규명에 이바지하며, 향후 2차원 반도체 소자의 대면적 시스템 통합 공정에 핵심적인 기반 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험 및 방법

2.1 MoS₂ 박막 증착 방법

MoS₂ 박막은 6인치 SiO₂(400 nm)/Si 웨이퍼 위에 스퍼터링 시스템을 이용하여 증착하였다. 본 실험에 사용된 스퍼터링 시스템에서 타겟과 기판 사이의 거리는 95 mm이

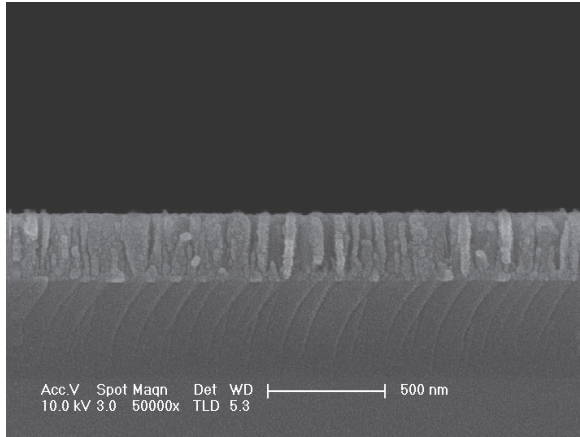


Fig. 1. SEM image of MoS₂ thin film deposited using the RF sputtering system.

며, 챔버의 베이스 압력은 8×10^{-6} mTorr로 유지하였다. 증착은 Ar 가스를 25 sccm 유량으로 공급하면서 10 mTorr의 압력, 100 W의 RF 전력을 인가한 상태에서 진행되었다. 타겟으로는 순도 99.5%, 지름 4인치, 두께 1/8 인치의 MoS₂ 타겟을 사용하였으며, Cu 백킹 플레이트가 부착되어 사용되었다. 증착 과정 동안 기판은 5 rpm의 속도로 회전하였으며, 공정 온도는 약 25°C로 유지하였다. 그림 1은 스퍼터링 시스템을 이용하여 증착한 박막으로 이를 통해 본 실험에 이용한 MoS₂ 박막의 측면 SEM 이미지이다.

2.2 MoS₂ 박막 식각 방법

식각 실험은 planar형 ICP (inductively coupled plasma) 식각 장비를 사용하여 수행하였다. 그림 2는 본 식각 실험에서 사용된 ICP 시스템의 개략도를 보여준다. Cl₂/Ar 플라즈마를 이용한 식각에서 주요 조건으로는 Cl₂ 유량(5-25 sccm), 상부 RF 전력(400~700 W), 하부 RF 전력(150-300 W)을 변화시켰으며, 총 유량은 50 sccm, 공정 압력은 7.5 mTorr, 기판 온도는 20°C로 고정하였다. 식각 시간은 60초로 유지되었다. 식각된 두께는 표면 단차 측정기 (Bruker DektakXT Stylus)를 이용하여 측정하였고, 이를 통해 식각 속도를 계산하였다.

2.3 MoS₂ 박막 분석 방법

XPS 분석을 위해 1 cm × 1 cm 크기의 MoS₂ 샘플을 준비하였으며, 식각 조건에서 30초 동안 노출시킨 후 분석을

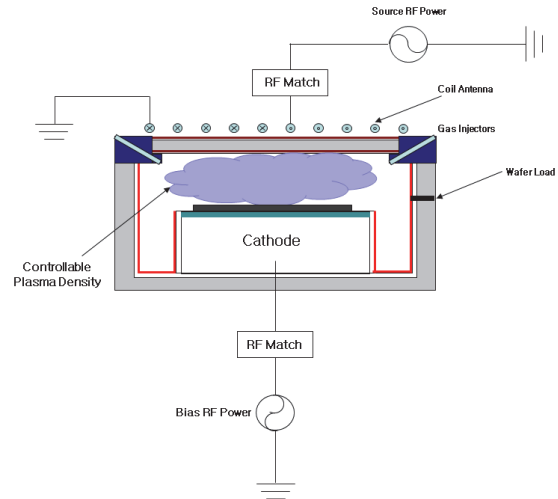


Fig. 2. Schematic diagram of the inductively coupled plasma system for MoS₂ thin film etching.

수행하였다. 표면의 화학 조성은 XPS(ESCALAB 200R, VG Scientific)를 사용하여 분석하였다. 이때 Al Kα(1486 eV) 광원을 300 W로 사용하였으며, 5-320 eV의 패스 에너지를 사용하여 화학 결합 상태를 정량적으로 측정하였다. 고해상도 XPS 측정에서는 220 W, 11.1 mA 조건으로 고정되었으며, 25 eV 패스 에너지에서 0.45 eV의 스펙트럼 해상도를 확보하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 가스비에 따른 식각 특성

그림 3은 Cl₂/Ar 혼합 가스를 이용하여 수행한 MoS₂ 박막의 플라즈마 건식 식각 실험 결과로서, Cl₂ 혼합비 변화에 따른 식각속도 및 SiO₂에 대한 선택비의 거동을 나타내고 있다. 실험 초기 Ar 가스 단독 조건에서 MoS₂ 박막의 식각속도는 약 4 nm/min을 기록하였으며, SiO₂에 대한 선택비는 약 0.7로 매우 낮은 수준을 보였다. 이는 Ar 이온에 의한 물리적 스퍼터링만으로는 MoS₂의 화학적 결합을 효과적으로 끊기 어려우며, 생성된 반응 부산물의 제거 또한 제한적이기 때문으로 해석된다 [23]. Cl₂ 가스의 혼합비가 점진적으로 증가하면서 Cl 활성화종에 의한 화학적 식각 반응이 활성화되었고, 이에 따라 식각속도가 급격한 향상되게 나타났다. 특히 Cl₂/(Cl₂+Ar) 비율이 25%에 도달하였을 때 식각속도와 선택비는 각각 약 38 nm/min과 3.0을 달성하였다. 이러한 결과는 MoS₂ 표면의 Mo 원자와 Cl

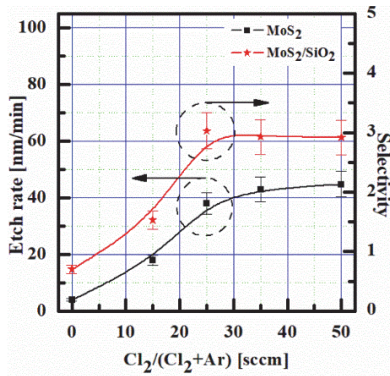


Fig. 3. Etch rate and selectivity of the MoS₂ thin films as a function of the Cl₂/Ar gas mixing ratio.

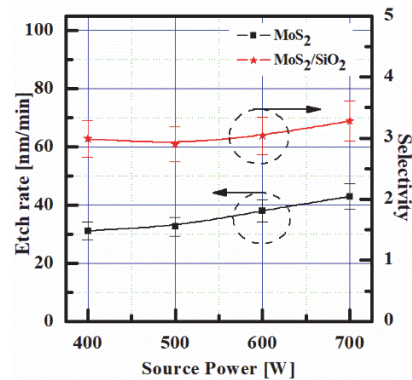


Fig. 4. Etch rate and selectivity of the MoS₂ thin films as a function of the source power in the Cl₂/Ar gas mixture.

라디칼 간의 반응을 통해 휘발성이 우수한 MoCl_x 화합물 (예: MoCl₅)이 생성되고, 동시에 Ar⁺ 이온의 물리적 충돌이 반응 부산물의 효율적인 제거를 촉진하였기 때문으로 분석된다. 이와 같은 이온 보조 화학적 식각 메커니즘은 Cl₂와 Ar의 조합에서 나타나는 상승 효과로서, 순수한 물리적 또는 화학적 식각보다 월등히 향상된 식각 성능을 제공하는 것으로 확인되었다. 그러나 Cl₂ 비율이 25%를 초과하는 영역에서는 식각속도의 증가 속도가 둔화되어 완만한 증가만을 나타내는 경향을 보였으며, 100% Cl₂ 조건에서 최대 식각속도는 45 nm/min이었다. 이는 반응에 참여할 수 있는 Mo 표면의 활성 사이트가 제한되어 있으며, 과잉으로 공급된 Cl 라디칼이 비휘발성 부산물인 MoCl₄, MoCl₃ 등을 형성하여 표면에 재증착되거나 잔류함으로써 오히려 식각 반응을 억제할 수 있기 때문으로 판단된다. 또한 Cl₂ 농도가 증가할수록 Ar의 상대적 비율이 감소하게 되어 이온 충돌에 의한 물리적 보조 효과가 약화되는 것도 포화 현상을 야기하는 주요 원인 중 하나로 분석된다 [24]. 선택비 측정 결과에서도 동일한 경향성이 관찰되었으며, Cl₂ 25% 조건에서 최대 선택비 3.0을 기록한 이후 더 높은 Cl₂ 농도 구간에서는 의미 있는 개선 없이 포화 양상을 보였다.

3.2 상부 RF 전력(Source RF Power)에 따른 식각 특성

Cl₂/(Cl₂+Ar) 가스 혼합비를 25%로 고정한 상태에서, 상부 RF 전력(이하 소스 파워)의 변화가 MoS₂ 박막 식각 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 소스 파워는 400 W에서 700 W까지 100 W 간격으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 그림 4는 소스 파워 변화에 따른 MoS₂ 박막의 식각속도 및

SiO₂와의 선택비(MoS₂/SiO₂)를 나타낸 것이다. 400 W 조건에서의 식각 속도는 약 31 nm/min, 선택비는 2.9로 측정되었으며, 이는 앞서 혼합비 조건 실험에서의 최적 조건과 동일한 값이다. 500 W로 소스 파워를 증가시켰을 경우, 선택비가 소폭의 감소가 관찰되었으나, 식각속도와 선택비는 전체적으로는 상승하는 경향을 보였다. 최종적으로 700 W 조건에서 식각속도는 약 43 nm/min, 선택비는 3.3으로 최대값을 기록하였다. 이러한 경향은 고주파 전력 증폭에 따른 플라즈마 밀도(plasma density)의 증가와 관련이 있다. 소스 파워는 주로 전자 밀도 증가 및 반응종 생성 효율 향상에 영향을 미치며, Cl₂ 가스로부터 생성되는 Cl 라디칼의 밀도 증가가 화학적 식각 반응을 촉진하는 주요 요인으로 작용한다. 일반적으로 식각 공정에서 전력 증가는 플라즈마 내 활성종(Cl, Cl⁺, Ar⁺ 등)의 공급량을 증가시키며, 이는 식각속도와 선택비 모두를 향상시키는 경향을 보인다. 선택비의 상승은 MoS₂와 SiO₂의 상이한 반응성 차이에 기인한 것으로 볼 수 있다. Cl₂ 기반 플라즈마에서는 SiO₂ 표면의 반응성이 상대적으로 낮아, MoS₂에 대한 화학적 반응이 우세해질수록 선택비 또한 증가하는 경향을 보인 것으로 판단된다.

3.3 하부 RF 전력(Bias RF Power)에 따른 식각 특성

Cl₂/(Cl₂+Ar) 혼합비를 25%, 소스 파워를 400 W로 고정한 상태에서, 하부 RF 전력(이하 바이어스 파워)의 변화가 MoS₂ 박막 식각 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 바이어스 파워는 150 W에서 시작하여 50 W 간격으로 300 W까지 증가시키며 식각 실험을 수행하였다. 그림 5는 바이어스 파워 변화에 따른 MoS₂ 박막의 식각속도 및 SiO₂에 대한 선택비(MoS₂/SiO₂)의 변화를 나타낸다. 바이어스

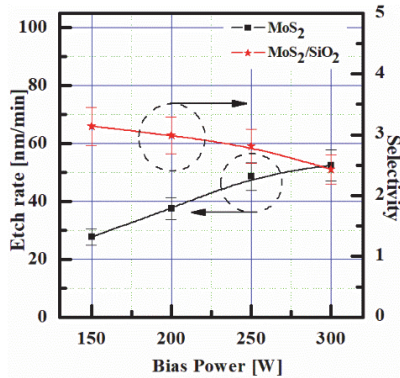


Fig. 5. Etch rate and selectivity of the MoS₂ thin films as a function of the bias power in the Cl₂/Ar gas mixture.

파워가 증가함에 따라 식각속도는 전반적으로 상승하는 경향을 보였으며, 150 W에서 약 28 nm/min이었던 식각속도는 300 W에서 약 52 nm/min까지 증가하였다. 반면, 선택비는 바이어스 파워가 증가할수록 점차 감소하는 경향을 보였다. 150 W 조건에서는 선택비가 3.1로 가장 높았으며, 300 W에서는 2.4로 낮아졌다. 이러한 결과는 바이어스 파워가 플라즈마 내 이온 에너지(ion energy)를 직접 제어하는 역할을 하기 때문으로 해석된다. 하부 전력의 증가는 기판에 도달하는 이온의 에너지를 높여, 물리적 스퍼터링 효과(physical sputtering)를 증가시킨다. 그에 따라 MoS₂ 박막 표면에서의 반응 부산물 제거가 더욱 활발히 이루어지며, 전반적인 식각 속도가 향상된다 [25]. 이는 특히 Mo-S 결합을 포함한 금속-비금속 계면에서의 결합 파괴를 수반하는 식각 반응을 촉진시키는 데 기여한다.

반면, 선택비 감소는 SiO₂에 대한 이온 충돌 식각이 상대적으로 더 크게 영향을 받기 때문으로 이해된다. 고에너지 이온은 SiO₂의 비반응성 표면에서도 표면 원자를 물리적으로 제거할 수 있으며, 이로 인해 SiO₂의 식각속도 또한 증가하게 된다. 결과적으로, 화학 반응에 기반한 선택성이 감소하고 물리적 식각 효과가 두 물질 모두에 영향을 미치면서 선택비가 낮아지는 양상을 보인다. 즉, 바이어스 파워는 식각속도 향상에 기여하지만, 과도한 이온 충돌 에너지는 선택비를 저해하는 요소로 작용할 수 있다.

3.4 XPS 분석을 통한 식각 전후 MoS₂ 표면 화학 상태

MoS₂ 박막의 식각 후 박막의 표면상에서 박막의 구성 성분과 플라즈마 활성종과의 반응을 살펴보고자 Cl₂/Ar 플라즈마 식각 전후의 시료에 대해 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) 분석을 수행하였다. 분석 대상은 초

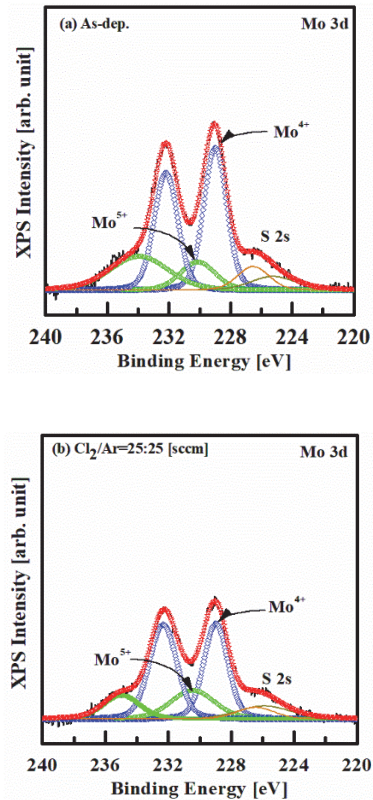


Fig. 6. Mo 3d XPS narrow scan spectra of MoS₂ surface etched with the chemistry. (a) As-deposited and (b) Cl₂/Ar=(25:25%) gas mixture.

기 MoS₂ 박막과 Cl₂/Ar=25:25 sccm 혼합비 조건에서 식각이 수행된 시료이다. MoS₂ 박막의 C 1s 피크 바인딩 에너지는 다음과 같았다. 증착 상태에서는 284.5 eV에서 284.6 eV에 위치한 C 1s 피크는 전하 보정 기준으로 사용되었으며, 이에 따라 모든 Mo 3d 및 S 2p 피크는 0.1 eV 만큼 높은 바인딩 에너지 쪽으로 이동되었다.

그림 6은 Cl₂/Ar 가스 조건에서 식각 후 MoS₂ 박막 표면의 Mo 3d narrow scan 결과이다. Cl₂/Ar 가스의 혼합비가 25%일때, MoS₂ 표면의 Mo 3d의 성분 peak는 세 쌍의 peak로 나타낼 수 있다. 그림 6(a)에서 229 eV와 232.2 eV에 해당하는 Mo⁴⁺ peak, 230.2 eV와 234 eV에 해당하는 Mo⁵⁺ peak와 226 eV와 225.4 eV에 해당하는 S 2s peak로 구분 가능하다. 반면에 그림 6(b)와 같이 Cl₂ 가스 첨가량이 높은 플라즈마에 노출되었을 때, 모든 peak의 밀도가 감소하고 Binding energy가 높은 쪽으로 Mo⁴⁺ peak (229.1, 232.3 eV), Mo⁵⁺ peak (234.3 eV), Mo⁴⁺ peak (230.5, 234.3 eV)가 이동되는 것을 볼 수 있다. 이는 Cl₂ 가스가 첨가됨에 따라 Cl 라디칼이 증가하고, 이로 인해 Cl

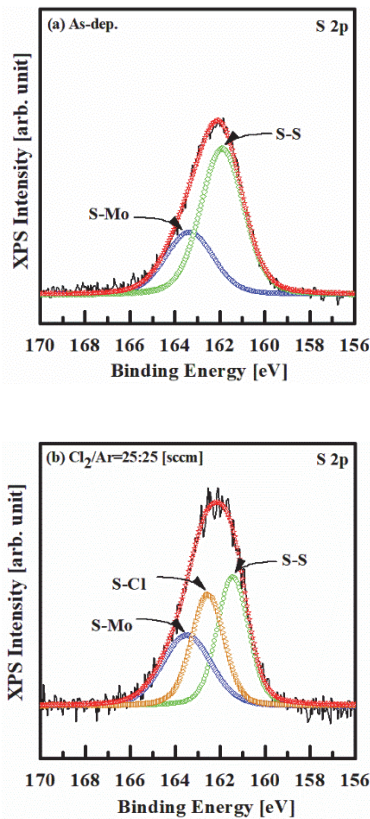


Fig. 7. S 2p XPS narrow scan spectra of MoS₂ surface etched with the chemistry. (a) As-deposited and (b) Cl₂/Ar=(25:25%) gas mixture.

원자들과 Mo 원자들에 의해 화학적 반응이 일어난 것으로 여겨진다.

그림 7(a)은 식각 전 MoS₂ 박막의 S 2p 스펙트럼으로, S-Mo 결합에 해당하는 피크와 함께 S-S 결합으로 추정되는 피크가 함께 관찰되었으며, 그림 7(b)는 동일한 박막에 Cl₂/Ar=25:25 sccm 가스 조건으로 식각 공정을 수행한 후의 스펙트럼을 나타낸 것이다. 식각 공정 이후에는 S-Mo 및 S-S 결합 피크 외에 S-Cl 결합으로 추정되는 새로운 피크가 추가로 관찰되었다. 이 결과는 Cl 라디칼이 MoS₂ 표면의 S 원자와 반응하여 S-Cl 결합을 형성하였음을 의미하며, 이는 식각 과정에서 발생하는 화학 반응 부산물의 일부가 박막 표면에 잔류하고 있음을 보여준다. 이러한 표면 화학 조성의 변화는 앞서 확인된 식각 속도 및 선택비의 변화와 밀접하게 관련된다. Cl₂가 일정 비율 이상 공급되면, Mo 원자 및 S 원자와 반응하여 휘발성 부산물인 MoCl_x 및 SCl_x가 생성되고, 이는 플라즈마 이온 충돌에 의해 제거되면서 식각이 진행되는 것으로 예상할 수 있다. 한

편, 일부 반응 부산물은 휘발성이 낮아 표면에 잔류할 수 있으며, 관찰된 S-Cl 결합은 이러한 표면 잔류 반응물의 존재를 나타내는 근거로 해석될 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 RF 스퍼터링으로 증착된 MoS₂ 박막에 대해 Cl₂/Ar 혼합 플라즈마를 이용한 식각 특성을 체계적으로 분석하였다. Cl₂의 혼합비, 상부 RF 전력(Source RF Power), 하부 RF 전력(Bias RF Power)의 변화에 따른 식각 속도 및 선택비의 변화를 정량적으로 비교하였으며, XPS 분석을 통해 식각 전후 박막 표면의 화학 조성 변화를 확인하였다. Cl₂/(Cl₂+Ar) 혼합비가 증가함에 따라 MoS₂ 박막의 식각 속도와 SiO₂ 대비 선택비는 빠르게 향상되었으며, 특히 25% 가스 혼합비 조건에서 식각 속도 약 39 nm/min, 선택비 약 3.2에 도달하였다. 이후 Cl₂ 비율이 더 증가함에 따라 식각 속도와 선택비 모두 완만한 증가 또는 포화 경향을 보였다. 상부 전력의 경우, 700 W 조건에서 식각 속도와 선택비 모두 최댓값을 나타냈으며, 이는 플라즈마 밀도 증가에 따른 화학 반응 활성화의 결과로 해석된다. 반면 하부 전력은 식각 속도가 증가시키는 반면 선택비는 점차 감소하는 경향을 보였는데, 이는 물리적 스퍼터링 효과가 강화되며 SiO₂ 식각에도 영향을 주었기 때문으로 판단된다. XPS 분석 결과, Cl₂/Ar 플라즈마 식각 이후의 MoS₂ 박막 표면에서는 S-Mo, S-S 결합 외에도 S-Cl 결합이 새롭게 관찰되었으며, 이는 식각 과정 중 황 원자와 Cl 라디칼 간의 화학 반응에 의해 생성된 반응 부산물이 표면에 잔류하고 있음을 보여준다. 이러한 결과는 Cl₂ 기반 플라즈마에서의 식각 메커니즘이 화학적 반응과 이온 보조 물리적 효과가 결합된 형태로 이루어진다는 점을 뒷받침한다.

본 연구를 통해 스퍼터링 기반 MoS₂ 박막에 적합한 Cl₂/Ar 플라즈마 식각 조건 및 메커니즘을 규명하였으며, 이는 향후 MoS₂를 기반으로 하는 고집적 소자 및 유연 전자소자 구현을 위한 정밀 공정 기술 개발에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

ORCID

Gwan-Ha Kim

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

감사의 글

김창일 교수님의 정년퇴임을 진심으로 축하드리며, 그동안 보여주신 학문적 열정과 따뜻한 가르침에 깊은 존경과 감사를 드립니다.

REFERENCES

- [1] S. Xiao, P. Xiao, X. Zhang, D. Yan, X. Gu, F. Qin, Z. Ni, Z. J. Han, and K. K. Ostrikov, *Sci Rep.*, **6**, 19945 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1038/srep19945>
- [2] S. B. Mitta, M. S. Choi, A. Nipane, F. Ali, C. Kim, J. T. Teherani, J. Hone, and W. J. Yoo, *2D Mater.*, **8**, 012002 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1088/2053-1583/abc187>
- [3] S. T. Hoang, L. Hu, A. K. Katiyar, and J. H. Ahn, *Matter*, **5**, 4116 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.matt.2022.10.016>
- [4] R. Ganatra and Q. Zhang, *ACS Nano*, **8**, 4074 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1021/nn405938z>
- [5] A. Hasani, Q. V. Le, M. Tekalgne, M. J. Choi, T. H. Lee, H. W. Jang, and S. Y. Kim, *NPG Asia Mater.*, **11**, 47 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41427-019-0145-7>
- [6] A. George, M. V. Fistul, M. Gruenewald, D. Kaiser, T. Lehnert, R. Mupparapu, C. Neumann, U. Hubner, M. Schaal, N. Masurkar, L. M. R. Arava, I. Staude, U. Kaiser, T. Fritz, and A. Turchanin, *npj 2D Mater. Appl.*, **5**, 15 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41699-020-00182-0>
- [7] X. Yang and B. Li, *Nanophotonics*, **9**, 1557 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0533>
- [8] H. Wang, L. Yu, Y. H. Lee, Y. Shi, A. Hsu, M. L. Chin, L. J. Li, M. Dubey, J. Kong, and T. Palacios, *Nano Lett.*, **12**, 4674 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1021/nl302015v>
- [9] R. Cheng, S. Jiang, Y. Chen, Y. Liu, N. Weiss, H. C. Cheng, H. Wu, Y. Huang, and X. Duan, *Nat. Commun.*, **5**, 5143 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1038/ncomms6143>
- [10] J. Ryou, Y. S. Kim, S. KC, and K. Cho, *Sci. Rep.*, **6**, 29184 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1038/srep29184>
- [11] N. Thomas, S. Mathew, K. M. Nair, K. O'Dowd, P. Forouzandeh, A. Goswami, G. McGranaghan, and S. C. Pillai, *Mater. Today Sustain.*, **13**, 100073 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2021.100073>
- [12] X. Zou, J. Wang, C. H. Chiu, Y. Wu, X. Xiao, C. Jiang, W. W. Wu, L. Mai, T. Chen, J. Li, J. C. Ho, and L. Liao, *Adv. Mater.*, **26**, 6255 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201402008>
- [13] R. Mathew and J. Ajayan, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **160**, 107397 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.107397>
- [14] X. Tong, E. Ashalley, F. Lin, H. Li, and Z. M. Wang, *Nano-Micro Lett.*, **7**, 203 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1007/s40820-015-0034-8>
- [15] Q. Gao, Z. Zhang, X. Xu, J. Song, X. Li, and Y. Wu, *Nat. Commun.*, **9**, 4778 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07135-8>
- [16] Y. Zou, P. Li, C. Su, J. Yan, H. Zhao, Z. Zhang, and Z. You, *ACS Nano*, **18**, 9627 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c13220>
- [17] Y. Y. Illarionov, A. Karl, Q. Smets, B. Kaczer, T. Knobloch, L. Panarella, T. Schram, S. Brems, D. Cott, I. Asselberghs, and T. Grasser, *npj 2D Mater. Appl.*, **8**, 8 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41699-024-00445-0>
- [18] M. Weinhold and P. J. Klar, *RSC Adv.*, **11**, 29887 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1039/D1RA04982H>
- [19] Y. Zhang, Q. Liu, D. Zhang, Y. Hong, and Q. Li, *ChemPhysMater*, **3**, 341 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.chphma.2024.07.001>
- [20] F. Ghasemi, A. Abdollahi, and S. Mohajerzadeh, *ACS Omega*, **4**, 19693 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02367>
- [21] C. Kim, M. Kim, S. Kim, M. Kang, M. S. Choi, and H. U. Kim, *Adv. Electron. Mater.*, **10**, 2300835 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1002/aelm.202300835>
- [22] T. Lin, B. Kang, M. Jeon, C. Huffman, J. Jeon, S. Lee, W. Han, J. Lee, S. Lee, G. Yeom, and K. Kim, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 15892 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.5b03491>
- [23] J. C. Woo, X. Yang, D. S. Um, and C. I. Kim, *Ferroelectrics*, **407**, 117 (2010).
doi: <https://doi.org/10.1080/00150193.2010.484750>
- [24] J. C. Woo, T. K. Ha, D. S. Um, J. Park, Y. C. Kang, and C. I. Kim, *Thin Solid Films*, **520**, 1141 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.08.078>
- [25] J. F. de Marneffe, D. Marinov, A. Goodyear, P. J. Wyndaele, N. St. J. Braithwaite, S. Kundu, I. Asselberghs, M. Cooke, and S. De Gendt, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **40**, 042602 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1116/6.0001726>