

고밀도 플라즈마를 이용한 실리콘 식각 시 마스크 두께 영향

김종식¹, 우종창², 김관하³ 

¹ 한국전자통신연구원 반도체소부장기술센터 & (주)해드림 기술연구소

² 한국폴리텍대학 반도체융합캠퍼스 반도체공정장비과

³ 한국폴리텍대학 성남캠퍼스 반도체공정과

The Effect of Mask Thickness in The Silicon Etching by Using High Density Plasma

Jong-Sik Kim¹, Jong-Chang Woo², and Gwan-Ha Kim³

¹ Semi. Materials Components Equipment Technology Center, ETRI, Daejeon 34129, Korea & Haedream Co., Ltd.,
Technical Research Center, Hwasun 58153, Korea

² Department of Semiconductor Process Equipment, Semiconductor Convergence Campus of
KOREA POLYTECHNIC, Anseong 17550, Korea

³ Department of Semiconductor Process, Seongnam Campus of KOREA POLYTECHNIC, Seongnam 13122, Korea

(Received July 22, 2025; Revised October 22, 2025; Accepted November 4, 2025)

Abstract: This study investigates the effect of mask material and thickness on the silicon etching profile using a high-density plasma (HDP) etching system, aiming to reduce optical loss in silicon-based optical waveguides. As the mask thickness increased, the etching sidewall angle became steeper. An etching profile angle of 87° was obtained when tetraethyl orthosilicate (TEOS) was used as the mask material, while 80° was obtained for photoresist (PR). This is attributed to electron charging on the mask surface in the plasma. The charged mask modifies the distribution and strength of the electric field depending on its thickness, thereby affecting the trajectory of positive ions accelerated toward the substrate by the bias voltage. Furthermore, Plasma diagnostics using optical emission spectroscopy (OES) and surface composition analysis using field emission Auger electron spectroscopy (FE-AES) revealed that changes in the mask material also alter the reaction pathways and formation characteristics of active species and silicon by-products in the plasma. These results suggest that the mask material influences the overall plasma characteristics, including electron density and ion energy, and plays a critical role in the precise control of silicon etching profiles for high-performance optical device fabrication.

Keywords: Silicon waveguides, Silicon etching, High density plasma (HDP), TEOS mask

1. 서론

현재 정보통신 기술의 변화 양상은 초고속화, 대용량화, 원격화, 개인화의 방향으로 급속히 진화하고 있으며, 초고속 통신망의 필요성은 각종 정보 유통의 수요 증가와 단위 정보량의 급격한 증대에 기인한다. 이러한 급격한 데이터의 양적 증대와 원거리 통신 수요에 대응하기 위한 핵심기

✉ Gwan-Ha Kim; gwanha@kopo.ac.kr

Copyright ©2026 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.

술로 광전 집적소자 및 실리콘 기반의 포토닉스 집적 기술이 주목받고 있다 [1]. 실리콘 포토닉스는 CMOS 공정과의 호환성 및 저비용 대량 생산의 장점이 있으나, 광원, 고속 광변조기, 광접속기 구현 등의 핵심기술에서 여전히 한계가 존재한다. 이를 극복하기 위해 화합물 반도체와의 이종 통합이 시도되지만, 공정 복잡성, 수율, 재성장 신뢰성 문제로 인해 상용화에는 제약이 따른다.

실리콘은 광원이 필요 없는 병렬 광통신에 유리하며, 특히 보드간·랙간 광통신에서는 다음과 같은 세 가지 이점이 있다. 첫째 단거리 전송으로 인한 신호 손실 부담이 적고 둘째 일부 고급 기능이 불필요하며, 마지막으로 서버 및 컴퓨터 중심의 경제성과 효율성 확보가 가능하다 [2]. 그러나 실리콘 광소자와 전자소자 간 단일 집적화에는 여전히 기술적 어려움이 존재한다. 특히 실리콘 리브 웨이브가이드 (Si rib waveguide) 및 테이퍼 결합구조의 구현은 공정 중 발생하는 측벽 거칠기 (sidewall roughness), 식각 각도 (etching sidewall angle), 표면손상 (surface damage)에 민감하다. 측면 각도는 손실에 큰 영향을 주며, 80°에서 90°로 향상되면 손실이 약 10분의 1로 감소한다. 이러한 문제 해결을 위해 식각 높이, 각도, 거칠기 조절의 정밀성 확보가 필수이며, 이를 위한 건식 식각 공정 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 실리콘 식각에는 습식 (KOH 등)과 건식 (플라즈마 기반) 방법이 있으며, 이 중 반응성 이온 식각 (RIE, reactive ion etching)은 미세 공정 구현 및 고이방성 확보에 적합하여 실리콘 기반 광소자 제작에 널리 사용된다. RIE는 공정이 간단하고 조건에 따라 우수한 식각 특성을 보이거나, 고분자 침적물 형성, 표면손상 등 본질적 한계가 있어 개선 연구가 진행 중이다 [3-7]. 이러한 반응성 이온 식각을 미세 공정에서 적용하기 위하여 Bosch 공정과 cryogenic 식각 공정 등이 연구되었다. Bosch 공정은 SF₆ 가스를 이용하여 실리콘 기판을 식각하면서 fluoro-carbon이 측면을 보호해 줌으로써, 수직 식각에 용이하다. 그러나, Bosch 공정은 상온에서 가능하고 온도 민감성이 적지만 식각 공정 중에 측면의 거칠기 특성이 나빠진다. 이에 비해 cryogenic 식각 공정은 적은 파워로 공정이 가능해 마스크 손상이 적고, 식각 단면이 매끄럽다. 그러나 온도 의존성이 높고 산소의 양을 정밀히 조절해 주어야 하는 단점이 따른다 [8-10]. 유도 결합 플라즈마 (inductively coupled plasma, ICP) 공정은 RF 전력을 코일형태의 안테나를 챔버에 장착하여 플라즈마를 발생시키는 장치로서 고밀도 플라즈마가 필요한 공정에 적용하고, 기판에 바이어스 전력을 인가해 이온의 운동에너지와 방향을 제어할 수 있는 기술이다. 이 방식은 저압 공정, 대형화, 높은 재현성, 공정 제어 용이성 등의 장점을 바탕으로, 실리콘·산화

물·금속 식각 및 감광막 제거 공정 등에 널리 활용되며, 미세소자 제작의 핵심 공정으로 자리 잡고 있다. 또한, 최근 마스크의 재질 및 두께 특성이 플라즈마 식각 결과에 유의미한 영향을 주고, 측벽 거칠기와 형상 변화는 파동 가이드에서 광손실을 증가시킨다는 실험적이고 이론적인 근거와 사실을 여러 연구들이 인식하고 있으나, 동일한 패턴과 조건에서도 마스크 두께, 재질의 미세한 차이에 따라 식각 프로파일과 도파로에서의 광손실 차이가 발생하는 현상은 여전히 활발한 연구 주제로 남아 있다 [11-16].

본 연구에서는 ICP와 용량성 결합 플라즈마 (capacitively coupled plasma, CCP)의 장점을 적용한 고밀도 플라즈마 식각 시스템을 실리콘 식각 공정에 적용하여 최적의 공정 조건이 도출된 상태에서 마스크 두께 및 재질의 미세변화에 따라 실리콘 식각 프로파일의 변화를 관찰하였고 FE-AES (field emission Auger electron spectroscopy)를 이용하여 식각 후 시료 표면의 구성 성분을 분석하였으며 OES (optical emission spectroscopy)를 통해 마스크 물질 변화에 따른 플라즈마 상태 진단을 수행하였다.

2. 실험 및 방법

본 연구에 이용된 고밀도 플라즈마 시스템 장치는 그림 1의 개략도로 플라즈마를 이용할 때 식각 챔버 (chamber)는 알루미늄 (Al) 재질의 벽면과 유지 보수를 위하여 anodized 된 liner로 되어 있으며 별개의 RF 전력을 유도 코일 전력과 직류 바이어스 전력으로 사용하였으며 RF 전력은 별개의 매칭 박스를 통하여 정합을 형성하였다. 이와 같은 구조는 별도의 외부 자장을 사용하지 않아 구조가 간

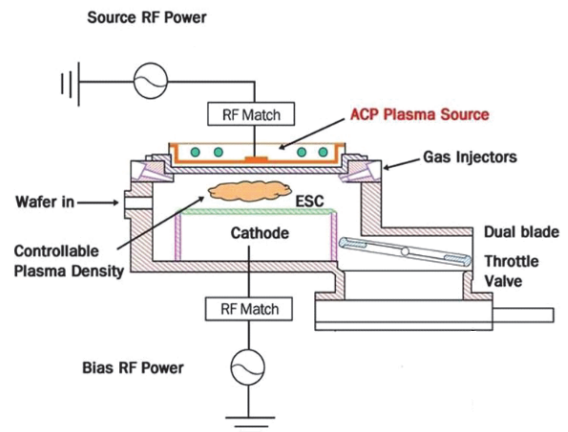


Fig. 1. Schematic of a high-density plasma etching system used for silicon etching.

단하고 공간적으로 균일한 플라즈마를 얻을 수 있다. 상부 플라즈마 유도 코일은 다발 나선형의 구조로 ICP 특성을, 중심부의 부싱(bushing)은 CCP 특성을 보여 낮은 전자 온도와 고밀도 플라즈마 특성을 보여 차세대 나노 패터닝 장비로 응용할 수 있다 [17]. 반응로는 아래 방향으로 배기되게 구성되어 있으며, 챔버의 플라즈마와 RF 코일과는 세라믹 등의 절연체로 분리되어 있다. 하부 전극에는 웨이퍼를 지지할 수 있는 하부 전극 및 정전적으로 구성되어 있으며 정전척에는 중심부와 가장자리에는 독립된 He 냉각 순환 구조가 있어 식각 공정 중 일정한 온도로 유지할 수 있다. 챔버 상부에 가스 주입부가 위치하였고 측면에는 종말점 검출(end point detection) 포트가 구성되어 있다.

실리콘 패턴은 그림 2에서 보는 것과 같이 P-type Si (100) 기판 위에 표준 세정 공정을 진행한 이후, PECVD 방법을 이용하여 TEOS를 각각 3,000 Å, 6,000 Å, 12,000 Å 두께로 증착하였으며, 1.2 µm 두께의 감광막(photoresist, PR)을 도포한 후 노광작업을 통해 라인 패턴을 준비하였다. 이와 같이 준비된 PR 마스크의 라인 패턴으로 TEOS를 식각하고 플라즈마 에싱(ashing)과 SPM 세정을 진행 후 TEOS 마스크의 시료를 제작하였다. PR 마스크의 Si 식각을 진행하기 위하여 앞서 언급한 것과 같이 1.2 µm 두께의 라인 패턴으로 시료를 제작하였다. Si 식각 후 FE-SEM (field emission scanning electron microscopy) 분석을 위하여 마스크 물질 제거를 위해 BHF (6:1), 플라즈마 에싱과 SPM 세정 공정을 각각 진행하였다. 한편 식각 공정의 주요 파라미터인 가스 HBr/Cl₂/CF₄/O₂ = (140:60:15:10 sccm) 비율, 유도 코일 전력(400 W), 직류 바이어스 전력(80 W), 공정 압력(12 mTorr)와 가스 HBr/Cl₂/O₂ = (140:40:5 sccm) 비율, 유도 코일 전력(600 W), 직류 바이어스 전력(100 W), 공정 압력(10 mTorr)으로 최적화된 공정 조건으로 진행하였다.

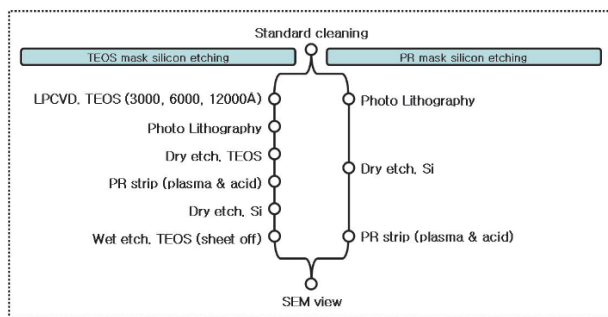


Fig. 2. Experiment flow chart of silicon etching using TEOS, PR mask.

FE-SEM을 이용하여 식각 단면(cross section)의 프로파일을 관찰하였다. 식각 후 시료 표면을 구성하고 있는 원소의 종류 및 양의 분석에 FE-AES를 사용하였으며 빛 방출 분석기(OES)를 이용하여 식각 중 마스크 물질에 따른 플라즈마의 내의 활성종(active species)의 분석을 통한 플라즈마 특성을 파악하였다.

3. 결과 및 고찰

TEOS 마스크 두께에 따른 실리콘 식각 프로파일의 변화를 그림 3에서 보여준다. 마스크의 두께는 각각 3,000 Å, 6,000 Å, 12,000 Å이었으며 실리콘 식각은 40초간 진행되었다. 동일한 가스 종류 및 혼합비율, 플라즈마 유도 코일 전력, 바이어스 전력, 공정 압력, 공정 온도의 공정 조건에서 식각 프로파일은 80°, 82°, 87°이다. 이와 같은

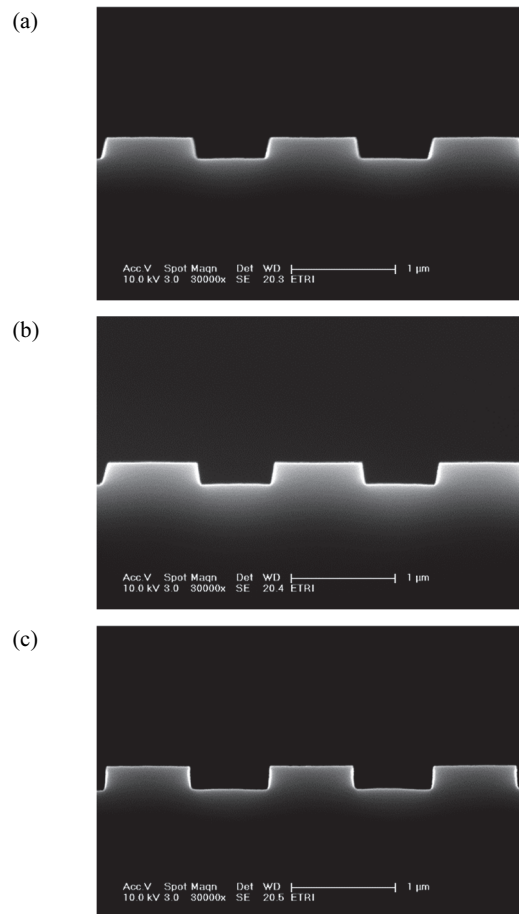


Fig. 3. Silicon etch profile according to TEOS mask thickness. TEOS thickness: (a) 3,000 Å, (b) 6,000 Å, and (c) 12,000 Å.

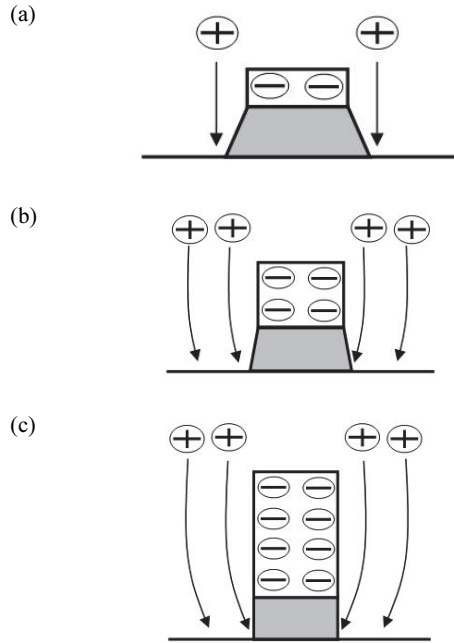


Fig. 4. Characteristics of electric field distribution according to TEOS mask thickness. TEOS thickness: (a) 3,000 Å, (b) 6,000 Å, and (c) 12,000 Å.

식각 프로파일 변화는 그림 4에서 보여주고 있는 것과 같이 마스크 두께에 따른 전계 분포의 차이에서 기인된다고 사료된다. 많은 선행 연구들에서 실리콘 식각 특성에 영향을 주는 인자는 식각 반응 가스의 종류 및 혼합 비율, 플라즈마 유도 코일 전력, 바이어스 전력, 공정 압력, 공정 온도, 실리콘 도핑 농도 등을 보고하였지만 [18], 본 실험에서는 동일한 공정 조건에서 실험하였으며 마스크 두께의 차이만을 보이고 있다. 유전체를 유기된 플라즈마 내로 삽입하였을 때 플라즈마 내의 양이온과 음이온의 질량 차이가 원인이 되어 유전체는 음의 전하를 띠게 된다. 이때 마스크가 유전체 역할을 하게 되어 음의 전하를 띠게 되나 마스크 두께에 따라 대전되는 영역 및 강도의 차이를 보이게 된다. 이렇게 대전된 마스크는 두께에 따라 전계 형성 강도의 차이를 보이게 되고 플라즈마 내에서 기판 바이어스에 의해 하부로 가속되는 양이온들의 궤적에 영향을 미치게 된다. 3,000 Å의 마스크 두께에서는 마스크 표면에 대전되는 전자의 양이 많지 않아 하부 기판으로 향하는 양이온의 궤적에 미치는 영향이 미미하지만 마스크 두께가 6,000 Å, 12,000 Å으로 급격히 증가할 때 대전되는 전자가 많아져 마스크에 의한 전계의 영향이 강해져 양이온의 궤적에 주요한 영향을 주게 된다. 이러한 영향으로 마스크 두께가 증가할수록 양이온은 패턴의 측벽에 집중되게 되어 식

각 반응 중 반응 가스에 의해 바닥과 측벽에 형성된 폴리머 등을 효과적으로 제거하게 되어 식각 프로파일의 향상을 가져오게 된다.

마스크 두께에 따라 패턴과 패턴 사이 스페이스 바닥면의 평판도의 차이를 보이는 결과를 그림 3에서 확인할 수 있다. 이 또한, 위에서 설명한 바와 같이 마스크 두께에 따라 마스크 대전의 차이로 인하여 기인되는 것으로 사료된다. 그림 4에서 확인할 수 있듯이 마스크 두께가 작을 때에는 참고문헌 [19]에서 설명한 바와 같이 이온에 의한 스퍼터링 효과에 따른 결과라 유추할 수 있으며 마스크 두께가 증가할수록 스페이스 영역의 바닥 부분에서 스퍼터링 되는 이온의 분포는 가장자리로 집중되게 되고 중심부분에는 공핍되게 되어 반응 가스에 의해 형성된 폴리머를 효과적으로 제거하지 못하여 식각 속도의 차이를 보이게 되어 연유된 결과이다. Zheng 등 [20]은 프로브 측정과 수치해석을 통해 마스크 두께 변화에 따른 전계 분포의 정량적 변화를 보고하였다. 이들은 마스크 두께를 0.3 μm에서 1.0 μm로 증가시킬 경우, 국소 전계(local electric field)가 약 25% 증가하고 평균 이온 입사각(average ion incidence angle)이 약 3-5° 증가함을 관찰하였으며, 이러한 변화가 식각 시 측벽 각도(sidewall angle)의 증가와 직접적으로 연관되어 있음을 밝혔다. 본 연구에서도 TEOS 마스크(측벽 각도 약 87°)가 PR 마스크(측벽 각도 약 80°)에 비해 더 가파른 식각 프로파일을 나타낸 결과는, 마스크 가장자리 부근에서의 sheath 전계 분포의 재배치(reconfiguration of sheath electric field distribution)에 기인한 것으로 해석될 수 있으며, 이는 Zheng 등의 보고와 일치한다고 할 수 있다.

그림 5는 두께가 1.2 μm의 TEOS, PR 마스크로 실리콘 식각을 진행한 후에 마스크를 제거한 식각 단면의 FE-SEM 이미지이다. 그림 5(a)는 CF₄가 함유된 가스 혼합비에서 TEOS 마스크를 사용했으며 5(b)는 PR 마스크를 사용하여 실리콘 식각을 진행한 결과이다. 그림 6(a)는 CF₄가 함유되지 않은 가스 혼합비에서 TEOS 마스크를 사용했으며 그림 6(b)는 PR 마스크를 사용하였다. 이는 실리콘 식각 프로파일에 마스크 물질이 미치는 영향을 비교하기 위하여 수행되었으며 CF₄ 가스에 의한 폴리머 형성이 실리콘 식각에 미치는 영향을 배제하기 위하여 그림 5, 6과 같이 CF₄ 함유된 것과 그렇지 않은 가스 구성을 채택하였다.

그림 5에서 볼 수 있듯이 TEOS를 마스크로 사용한 경우와 PR을 마스크로 사용한 경우 실리콘 식각 프로파일은 각각 87°, 80°를 보이며 이는 그림 6에서 CF₄ 가스를 함유하지 않은 레시피에서도 같은 경향을 나타낸다. Balachova [21] 등에 의하면 CF₄ 가스는 CF_x 형태의 폴리머를 시료

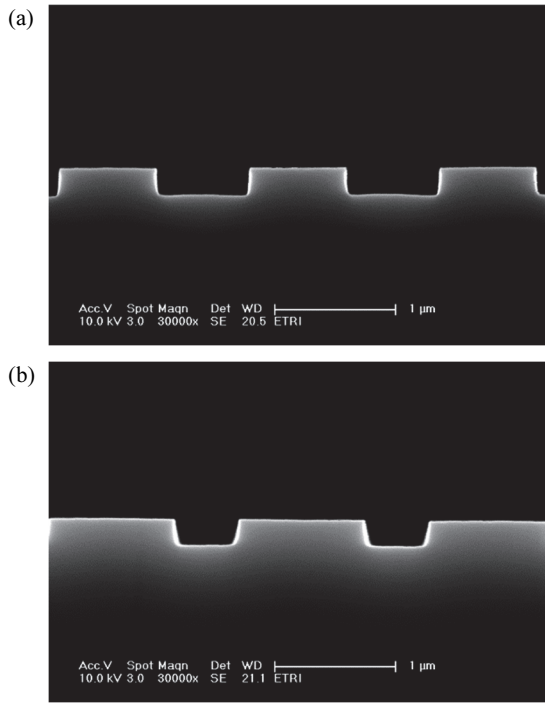


Fig. 5. Silicon etch profiles according to mask materials in gas mixtures with CF₄. (a) TEOS thickness: 12,000 Å and (b) PR thickness: 12,000 Å.

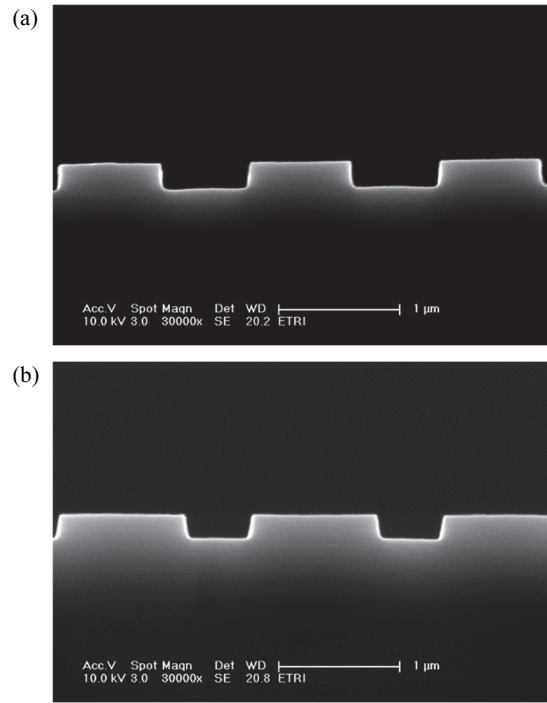


Fig. 6. Silicon etch profiles according to mask materials in gas mixtures without CF₄. (a) TEOS thickness: 12,000 Å and (b) PR thickness: 12,000 Å.

표면에 형성하여 식각 프로파일 제어 및 식각 특성 결정에 이용되지만 위 그림 6에서 볼 수 있듯이 CF₄ 가스가 함유되지 않은 가스 구성에서도 마스크 물질에 따라 다른 식각 특성을 보인다. 이는 마스크 물질에 따라 유기된 플라즈마 내의 활성종과의 반응의 차이로 인하여 기인된다. 실리콘 식각에서 반응가스와 마스크, 실리콘과 SiCl_x, SiF_x, SiBr_x, Si_xH_y, O_x, O_xF_y, H_xO_y 등의 결합 [22]을 형성하게 되나 마스크 물질의 구성 성분의 차이로 인하여 플라즈마와 마스크 물질과의 반응 형성이 달라지게 되고 실리콘과의 반응에 관여되는 잔여 활성종이 같지 않게 되어 식각 반응에 영향을 미치게 된다. PR은 주요 구성 성분인 C, H, O와 플라즈마 내의 활성종이 반응하게 되어 식각되는 실리콘의 측벽과 아래 부분에 형성되는 폴리머가 TEOS 마스크를 사용하여 식각을 진행할 때보다 적게 되어 이온에 의한 스퍼터링 효과가 우세하여 tapered 프로파일의 특성을 확인할 수 있다.

이는 표 1의 FE-AES 분석에서도 확인할 수 있다. FE-AES 분석은 식각 후 표면 반응 분석을 하기 위하여 다른 공정을 진행하지 않은 상태에서 패턴과 패턴 사이의 스페이스 영역에서 진행하였다. 각각의 가스 구성에서 TEOS 마스크와 PR 마스크로 하여 실리콘 식각 공정 후 Si, O, C

Table 1. Composition of silicon surface after etching (unit: atomic %).

	TEOS mask			PR mask		
	Si	O	C	Si	O	C
With CF ₄ recipe	77.7	11.1	11.2	86.2	11.5	2.3
Without CF ₄ recipe	73.4	12.0	14.7	85.4	10.2	4.5

이 검출되었다. 검출된 O의 비율은 네 경우 모두 비슷하였으나 PR 마스크에서 C의 양이 현저히 줄어들고 Si의 양이 상대적으로 많아짐을 확인할 수 있다. 이는 주입된 반응 가스의 플라즈마 상태 중 많은 활성종이 PR과 반응하여 챔버 외부로 배기되고 식각 중 시료 표면에 흡착되는 경우가 줄어들어 생긴 결과이며 O의 상대적 양이 일정한 경우는 실리콘 표면과의 반응이 일정하여 연유된 것으로 사료된다.

그림 7은 식각 반응 가스의 구성 및 마스크 물질에 따른 실리콘 식각 시 OES로 측정된 빛 방출 특성을 나타낸다. OES를 이용한 플라즈마 진단은 실제 플라즈마 식각 공정에 영향을 미치지 않고 식각 공정에서 발생하는 빛의 파장을 측정하여 실시간 분석을 수행할 수 있다는 장점이 있다.

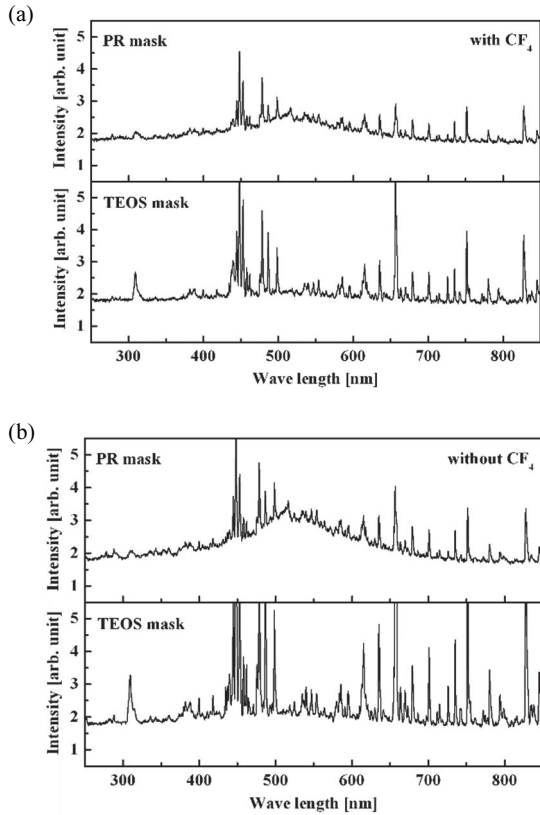


Fig. 7. Characteristics of light emission during silicon etching according to reactive gases and mask materials. (a) Gas mixtures with CF_4 and (b) gas mixtures without CF_4 .

마스크 물질에 따라 플라즈마 내의 활성종과의 반응 차이로 인하여 식각되는 실리콘 표면에 형성되는 폴리머의 차이로 인하여 식각 특성의 변화를 앞서 설명하였지만 그림 7의 빛 방출 특성에서 보듯이 마스크 물질의 차이는 근본적인 플라즈마 유기 특성을 변화시킬 수 있다. 그림에서 CF_4 가스를 함유한 공정 조건(그림 7(a))과 그렇지 않은 공정 조건(그림 7(b))에서의 플라즈마 특성 차이는 반응 가스의 구성 및 혼합비율 차이로 인한 결과이며 같은 공정 조건에서도 플라즈마 특성이 변화를 보임을 확인할 수 있다. 그림 7(a)의 PR 마스크와 TEOS 마스크의 실리콘 식각 특성에서 확인할 수 있듯이 많은 피크들은 식각 부산물에 대응된다고 할 수 있지만 500 nm 전후의 파장대에서 폭이 넓은 영역은 Cl_2^+ 로 생각할 수 있으며 [23] 유기된 플라즈마 특성을 극명하게 보여준다. 그림 7(a), (b) 상단의 PR 마스크 공정에서 빛 방출 특성에서는 Cl_2^+ 피크가 확연히 존재하나 하단부의 TEOS 마스크 공정에서는 Cl_2^+ 피크의 세기가 감소하고 Cl 원자 피크 (452.6 nm, 460.0 nm, 725.6 nm, 754.7 nm) [24]의 세기가 증가하는 것을 보여

준다. 이와 같은 특성은 플라즈마 내의 활성종과 마스크 물질, 실리콘과의 반응에 의한 실리콘 부산물의 형성뿐만 아니라 유기되는 플라즈마 특성을 변화시켜 실리콘 식각 특성에 영향을 주는 것이라고 사료된다.

4. 결론

실리콘은 지구상에서 산소 다음으로 풍부한 원소로, 원료 확보가 용이하고 저렴한 가격으로 공급되기 때문에 반도체 산업에서 생산하고 있는 대부분의 전자소자의 핵심 재료로 널리 사용되고 있다. 특히, 복잡한 반도체 제조 공정단계 중에서 식각공정은 특정 식각 용액/반응 가스를 이용하여 화학 및 물리적인 방법으로 반도체 웨이퍼에 요구하는 나노미터 수준의 회로패턴 형성을 위해 결정적인 역할을 하며, 고해상도 회로복제를 가능하게 하여 현재의 정밀전자소자의 제조기술에서는 매우 중요한 기술이다. 이와 같은 정밀 식각을 구현하기 위해서는 높은 식각률과 선택비를 확보할 수 있는 고밀도 플라즈마 기반의 식각 기술 개발이 필수적이다. 또한 식각 깊이가 깊어질수록 식각 반응 후 식각 부산물의 배출이 어려워짐에 따라 소자 내에서 식각 균일도가 저하되는 문제가 되는데 이는 근본적으로 식각장치 및 플라즈마 특성에 의존성이 크므로 고밀도 플라즈마 원을 활용한 식각 공정이 기술적으로 유리한 대안으로 평가받고 있다.

본 연구에서는 마스크 두께에 따라 마스크 표면에 대전되는 전하량에 기인한 전계 분포 차이로 인하여 식각 프로파일의 변화와 마스크 물질 변화에 따라 유기된 플라즈마 특성 변화에 연유된 식각 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 마스크 두께가 3,000 Å, 6,000 Å, 12,000 Å으로 증가함에 따라 식각 측벽의 프로파일은 각각 80°, 82°, 87°로 증가하였으며 TEOS 및 PR을 식각 마스크로 사용하였을 때 각각의 식각 프로파일은 87°, 80°를 나타냈다. 이러한 결과는 플라즈마 내의 전자가 마스크 표면에 대전되면서 대전된 마스크는 두께에 따라 전계 형성 분포 및 강도의 차이를 보이게 되어 플라즈마 내에서 기판 바이어스에 의해 하부로 가속되는 양이온들의 궤적에 영향을 주기 때문으로 해석된다. 이러한 영향으로 마스크 두께가 증가할수록 양이온은 패턴의 측벽에 집중되게 되어 식각 반응 중 반응 가스에 의해 바닥과 측벽에 형성된 폴리머 등을 효과적으로 제거하게 되어 식각 프로파일의 향상을 가져오게 된다. 또한, 마스크 두께가 증가할수록 스페이스 영역의 바닥 부분에서 스퍼터링 되는 이온의 분포는 가장자리로 집중되고 중심부분에는 공핍되어 반응 가스에 의해 형성된 폴리

머를 효과적으로 제거하지 못하여 식각 속도의 차이를 보이게 되어 식각 바닥면의 평탄도에도 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 마스크 재질의 변화에 따른 플라즈마 특성 변화 역시 중요한 요인이다.

본 연구에서 수행된 FE-AES 및 OES 분석에서 확인할 수 있듯이 마스크 물질의 변화에 따라 플라즈마 내의 활성 종 조성뿐만 아니라 실리콘과의 반응 경로 및 실리콘 부산물의 생성 특성에도 유기되는 플라즈마 특성을 변화시켜 실리콘 식각 특성에도 유의미한 차이가 발생함을 확인하였다. 이는 마스크 소재가 플라즈마의 전반적인 물성(전자 밀도, 이온 에너지 등)에 영향을 주며, 결국 실리콘 식각 특성의 정밀 제어에 결정적인 역할을 한다고 하겠다.

ORCID

Gwan-Ha Kim

<https://orcid.org/0000-0002-3914-264>

REFERENCES

- [1] H. C. Liu, Y. H. Lin, and W. Hsu, *Microsyst. Technol.*, **10**, 29 (2003).
doi: <https://doi.org/10.1007/s00542-003-0309-8>
- [2] N. M. Park, J. H. Shin, C. Huh, K. H. Kim, T. Y. Kim, G. Y. Sung, and T. H. Jeong, *Electron. Telecommun. Trends*, **20**, 84 (2005).
doi: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2005.J.200507>
- [3] U. M. Mescheder and Ch. Koetter, *Sens. Actuators A: Phys.*, **76**, 425 (1999).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00212-5](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00212-5)
- [4] G. S. Oehrlein, *Mater. Sci. Eng. B*, **4**, 441 (1989).
doi: [https://doi.org/10.1016/0921-5107\(89\)90284-5](https://doi.org/10.1016/0921-5107(89)90284-5)
- [5] D. S. Veselov, A. D. Bakun, and Yu. A. Voronov, *J. Phys. Conf. Ser.*, **748**, 012017 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/748/1/012017>
- [6] G. C. Swatz and P. M. Schaible, *J. Vac. Sci. Technol.*, **16**, 410 (1979).
doi: <https://doi.org/10.1116/1.569962>
- [7] E. A. Ogryzlo, D. E. Ibbotson, D. L. Flamm, and J. A. Mucha, *J. Appl. Phys.*, **67**, 3115 (1990).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.345388>
- [8] N. Roxhed, P. Griss, and G. Stemme, *J. Micromech. Microeng.*, **17**, 1087 (2007).
doi: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/5/031>
- [9] E. Quévy, B. Parvais, J. P. Raskin, L. Buchaillet, D. Flandre, and D. Collard, *J. Micromech. Microeng.*, **12**, 328 (2002).
doi: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/12/3/320>
- [10] R. Dussart, M. Boufnichel, G. Marcos, P. Lefauchaux, A. Basillais, R. Benoit, T. Tillocher, X. Mellhaoui, H. Estrade-Szwarckopf, and P. Ranson, *J. Micromech. Microeng.*, **14**, 190 (2004).
doi: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/14/2/004>
- [11] L. Zhou, F. Luo, and M. Cao, *Thin Solid Films*, **489**, 229 (2005).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.04.074>
- [12] J. Bobinac, T. Reiter, J. Piso, X. Klemenschits, O. Baumgartner, Z. Stanojevic, G. Strof, M. Karner, and L. Filipovic, *Micromachines*, **14**, 665 (2023).
doi: <https://doi.org/10.3390/mi14030665>
- [13] Y. Zhang, Z. Hou, C. Si, G. Han, Y. Zhao, X. Lu, J. Liu, J. Ning and F. Yang, *Micromachines*, **14**, 306 (2023).
doi: <https://doi.org/10.3390/mi14020306>
- [14] D. Bose, M. W. Harrington, A. Isichenko, K. Liu, J. Wang, N. Chauhan, Z. L. Newman, and D. J. Blumenthal, *Light Sci. Appl.*, **13**, 156 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41377-024-01503-4>
- [15] Y. Zhang, Y. Wu, Q. Sun, L. Shen, J. Lan, L. Guo, Z. Shen, X. Wang, J. Xiao, and J. Xu, *Micromachines*, **14**, 846 (2023).
doi: <https://doi.org/10.3390/mi14040846>
- [16] K. Racka-Szmidt, B. Stonio, J. Żelazko, M. Filipiak, and M. Sochacki, *Materials*, **15**, 123 (2022).
doi: <https://doi.org/10.3390/ma15010123>
- [17] X. Yang, D. S. Um, G. H. Kim, S. H. Song, and C. I. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **22**, 1005 (2009).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2009.22.12.1005>
- [18] A. Grill, *Cold plasma in materials fabrication: From fundamentals to applications*, (IEEE Press, New York, NY, USA, 1993), p. 216.
- [19] G. H. Kim, *Master's thesis*. Chung-Ang University, Seoul, Korea. (2003).
doi: <https://doi.org/10.23169/cau.000000005190.11052.0000240>
- [20] D. Yang, H. Wang, B. Zheng, X. Zou, X. Wang, and Y. Fu, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **31**, 115002 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac9a6e>
- [21] O. V. Balachova, M. A. R. Alves, J. W. Swart, E. S. Braga, and L. Cescato, *Microelectron. J.*, **31**, 213 (2000).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0026-2692\(99\)00140-8](https://doi.org/10.1016/S0026-2692(99)00140-8)
- [22] D. R. Lide, *CRC handbook of chemistry and physics*, (CRC Press, Washington, DC, USA, 1998), pp. 4–66.
doi: <https://doi.org/10.1201/b17118>
- [23] F. F. Chen and J. P. Chang, *Lecture notes on principles of plasma processing*, (Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, NY, USA, 2003), p. 156.
doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0181-7>
- [24] R. W. B. Pearse and A. G. Gaydon, *The identification of molecular spectra*, (John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1976), p. 310.
doi: <https://doi.org/10.1126/science.95.2460.199.a>