

크기별 비아홀의 ICP Si 식각과 종횡비 의존 식각(ARDE)

— ICP Via-Hole Etch (graded hole ARDE) Flow 시나리오 기술 노트 —

SemiFab AI

시나리오 등재: 년 월 | 난이도: | 11단계

초록 Si 기판 위 SiO₂ 하드마스크에 지름 0.5 / 1 / 2 / 4 μm의 비아홀 어레이를 열고, Cl₂/HBr/Ar ICP로 15분간 Si를 식각하여 같은 조건에서도 지름에 따라 깊이가 달라지는 현상(ARDE)을 다루는 11단계 플로우이다. 권장 조건의 기준 런에서 최대 식각 깊이 약 1550 nm, 같은 시간 동안의 하드마스크 소모 8.2 nm가 산출되어 Si:SiO₂ 선택비는 약 190:1로 계산되며, 지름이 작을수록 얇게 식각되는 경향이 산출되었다. 본 문서는 시나리오를 돌릴 때 옆에 두고 참조하는 용도이다. **본 문서의 수치는 실장비 측정값이 아니라 MiniFab 시뮬레이션 계측값이다.**

1. 서론

비아홀 식각의 목표는 빨리 깎는 것이 아니라 **수직으로, 균일하게** 깎는 것이다. 구멍이 옆으로 퍼지면 이웃 구조와 닿고, 바닥이 고르지 않으면 나중에 채우는 물질이 제대로 들어가지 않는다. 그런데 같은 챔버에서 같은 가스로 같은 시간을 식각해도, 웨이퍼 위 구멍의 지름이 다르면 깊이가 달라진다. 넓은 구멍은 깊게, 좁은 구멍은 얇게 파인다. 장비 고장이나 레시피 오류가 아니라, 구멍의 **종횡비(aspect ratio = 깊이 ÷ 지름)**가 식각 속도를 바꾸기 때문에 생기는 현상이다. 이를 종횡비 의존 식각(ARDE, Aspect Ratio Dependent Etching)이라 하고, 현장에서는 RIE lag이라고도 부른다.

원인은 구멍 바닥까지 내려오는 재료와 빠져나가는 재료의 수지로 설명된다(그림 1). ① 플라즈마에서 내려오는 이온은 완벽하게 수직이 아니라 좁은 각도 분포를 가진다. 구멍이 넓으면 조금 기운 이온도 바닥에 닿지만, 구멍이 좁으면 같은 각도의 이온이 바닥에 닿기 전에 측벽에 먼저 부딪힌다. 그만큼 바닥에 도달하는 이온이 줄어든다. ② 식각은 이온만으로 일어나지 않고, 방향성 없이 사방으로 움직이는 Cl 라디칼 같은 중성종이 표면과 반응해야 한다. 통로가 좁고 깊을수록 중성종이 바닥까지 들어가기 어렵다. ③ 반응으로 생긴 SiCl₄ 같은 부산물은 밖으로 빠져나가야 하는데, 좁고 깊은 통로에서는 배출이 느려 다음 반응을 방해한다. 세 가지 모두 종횡비가 커질수록 심해지므로, 같은 웨이퍼 위에서도 구멍마다 식각 난이도가 다르다.

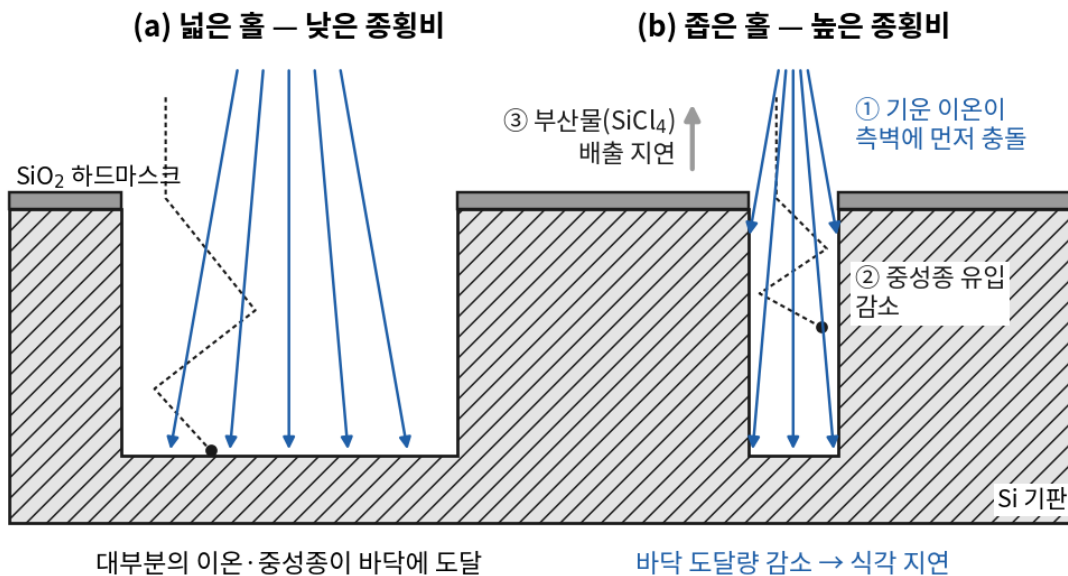


그림 1. ARDE의 세 기전 — (a) 넓은 홀과 (b) 좁은 홀에서 이온·중성종·부산물의 거동 비교 (개념도)

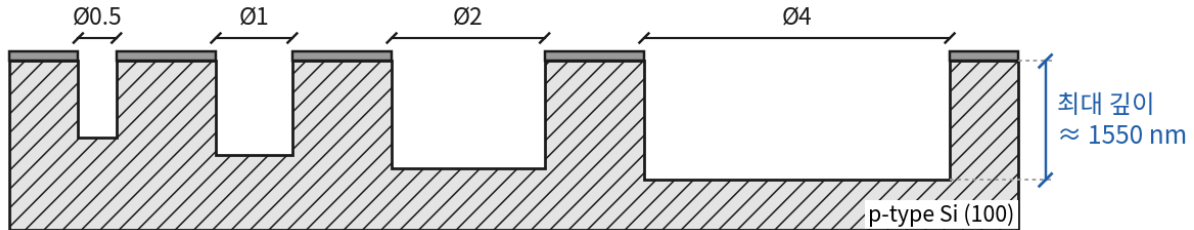
2. 실험 방법

2.1 실험 환경. 본 공정은 SemiFab AI 공정 센터에서 수행된다. 11개 단계를 순서대로 진행하며 각 단계의 파라미터를 입력하고, 공정이 끝나면 공정 결과 레포트(시편 정보·최종 레이어 스택·공정 이력·측정 결과·3D 단면 캡처)로 결과를 확인한다. **레포트의 측정 결과는 시뮬레이션 모델이 산출한 값이며 실장비 계측값이 아니다. 이후 본문에서 '기준 런 계측값'이라고 쓴 것은 모두 이 시뮬레이션 산출값을 가리킨다.**

2.2 공정 구성. 공정은 6개 구간, 11단계로 이루어진다(표 1). 기준 런은 시나리오가 제시하는 권장 조건을 그대로 사용했다. 본 식각은 ⑤의 한 단계뿐이고, 나머지 열 단계는 그 한 단계를 제대로 하기 위한 준비(마스크 만들기)와 뒷정리(마스크 벗기기)이다. 완성하려는 구조는 그림 2와 같다.

표 1. 공정 구성

구간	단계	기준 런 조건
① 준비	01 SC-1 세정 → 02 열산화	SC-1 70 °C · 120 s / dry O ₂ 1000 °C · 120 min
② 리소	03 PR 도포 → 04 소프트 베이킹 → 05 노광 → 06 현상 → 07 하드 베이킹	AZ5214 3000 rpm / 100 °C · 60 s / 120 mJ, 홀 어레이 마스크(hex) / TMAH 2.38 % · 60 s / 130 °C · 120 s
③ 마스크 전사	08 RIE 식각	CHF ₃ , 150 W, 20 mTorr, 84 s — SiO ₂ 에 구멍 창을 연다
④ PR 제거	09 O ₂ 애싱	120 W, 300 mTorr, 60 s
⑤ Si 식각	10 ICP 식각	source 800 W / bias 100 W, 10 mTorr, Cl ₂ 50 · HBr 20 · Ar 100, 900 s
⑥ 마스크 제거	11 BOE 습식 식각	25 °C, 60 s



SiO₂ 하드마스크: ICP 후 잔여 42.2 nm (두께 과장 표시) · 지름이 작을수록 얇다 (깊이 차는 경향만 도식)

그림 2. 목표 구조 — ICP 식각 직후의 Si 비아홀 어레이 (지름 단위 μm, 11단계 BOE 전)

ICP 단계의 입력값을 바꾸면 결과는 방향을 가지고 움직인다. 표 2는 각 파라미터를 올리거나 내렸을 때 결과가 움직이는 방향과, 그 변화를 무엇으로 확인하는지를 정리한 것이다. 방향은 일반적인 ICP Si 식각 거동이며, source와 V_{dc}의 관계는 레포트의 모델 서술과 일치한다.

표 2. ICP 파라미터 민감도와 확인 수단

파라미터	올리면 (↑)	내리면 (↓)	확인 수단
Source power	플라즈마 밀도 ↑ → 식각률 ↑. 같은 bias에서 V _{dc} ↓ → 데미지 ↓	식각률 ↓	레포트 V _{dc} · 데미지 지수, SEM 단면 깊이
Bias power	이온 에너지 ↑ → 수직성 · 바닥 식각 ↑, 마스크 소모 · 데미지 ↑	마스크 보존 ↑, 이방성 ↓	레포트 V _{dc} · 마스크 잔여, SEM 단면
Pressure	이온 각도 분산 ↑ → 수직성 ↓, 지름별 깊이 차 확대	수직성 ↑, ARDE 완화	SEM 단면 (지름별 깊이 비교)
Cl ₂ 유량	주 식각종 ↑ → 식각률 ↑, 과하면 측벽 언더컷	식각률 ↓	SEM 단면 (측벽 형상)
HBr 유량	측벽 패시베이션 ↑ → 수직성 ↑, 과하면 바닥 식각 저하	측벽 보호 ↓	SEM 단면 (측벽 형상)
시간	깊이 ↑ (좁은 홀은 덜 따라옴), 마스크 소모 ↑	깊이 ↓	SEM 단면, 마스크 잔여

3. 결과

재기 전에 먼저 예측한다. 값을 미리 계산해 두어야 결과를 받았을 때 정상인지 이상한지를 그 자리에서 판단할 수 있다. 쓰는 식은 세 개다.

$$d \approx R \times t \cdot S = d_{\text{Si}} / d_{\text{SiO}_2} \cdot AR = d / D$$

(d: 식각 깊이, R: 식각률, t: 식각 시간, S: 선택비, d_{Si} · d_{SiO₂}: 같은 시간에 깎인 Si와 SiO₂ 두께, AR: 종횡비, D: 구멍 지름)

첫 식은 "깊이는 식각률에 시간을 곱한 것"이라는 뜻이고, 둘째 식은 "Si가 깎이는 동안 마스크가 얼마나 덜 깎이는가"를, 셋째 식은 "구멍이 폭에 비해 얼마나 깊은가"를 나타낸다. 기준 런의 공정 이력을 보면, ③ RIE는 SiO₂ 50.4 nm를 뚫는 데 55.4 nm 분량을 식각하여 노출부를 완전히 열었고, 그 아래 Si는 0.33 nm만 깎였다. ④ 애싱은 남은 PR 1382 nm를 전량 제거했다. ⑤ ICP 단계에서 레포트는 DC self-bias -176 V, 데미지 지수 0.55를 산출했다. 기준 런의 예측과 계측을 표 3에 정리했다.

표 3. 기준 런의 이론 예측값과 기준 런 시뮬레이션 계측값

항목	근거 · 측정 방식	이론 예측	기준 런 계측값 (시뮬레이션)
최대 식각 깊이	최종 레이어 스택	≈ 103.5 nm/min × 15 min ≈ 1.55 μm	약 1550 nm
지름별 깊이	3D 단면 뷰 (SEM)	작은 지름일수록 얇다 (ARDE)	작은 지름일수록 얇게 산출
하드마스크 소모	공정 이력 (ICP)	0.54 nm/min × 15 min ≈ 8 nm	8.2 nm 소모, 42.2 nm 잔여
Si : SiO ₂ 선택비	$S = d_{\text{Si}} / d_{\text{SiO}_2}$	—	약 190 : 1 (1550 ÷ 8.2)
형상 결함	광학 현미경	결함 없음	검출 결함 0개
비아 깊이 (단차계)	프로파일로미터	스타일러스 진입 불가 → 측정 불가	평탄으로 읽힘 (측정 불가)

종횡비로 보면 차이가 분명하다. 최대 깊이가 약 1.55 μm를 기준으로 하면 Ø4 μm 홀의 종횡비는 약 0.39에 불과하지만, Ø0.5 μm 홀이 같은 깊이까지 파였다면 종횡비는 3.1이 된다. 좁은 홀은 실제로 그보다 얇게 산출되었으나, 같은 웨이퍼 위에서 구멍마다 난이도가 한 자릿수 가까이 차이 난다는 점은 이 계산으로 드러난다. 표 3의 예측과 계측은 같은 시뮬레이션 모델 안에서 함께 계산되는 값이다. 여기서 확인되는 것은 측정의 독립적 검증이 아니라 기준 런 결과의 내부 일관성이며, 실장비에서 같은 관계가 성립하는지는 따로 확인해야 한다.

4. 고찰

하드마스크가 15분을 버틴 이유와 그 한계. ICP 식각은 15분 동안 이온이 계속 표면을 때리는 환경이다. 유기물인 PR은 이 시간 동안 가장자리부터 후퇴하기 쉽고, 마스크가 후퇴하면 구멍이 옆으로 벌어진다. 그래서 이 플로우는 SiO_2 에 패턴을 옮기고(③) PR을 태워 없앤 뒤(④) 본 식각에 들어간다. 기존 런에서 시뮬레이션 모델은 50.4 nm 마스크 중 8.2 nm만 소모되고 42.2 nm가 남는 결과를 산출했고, 이는 약 190:1의 선택비에 해당한다. 그러나 이 두께가 어떤 조건에서도 충분하다고 읽으면 안 된다. 선택비는 bias를 올리면 낮아지고, 실공정에서는 마스크 모서리가 비스듬히 깎이는 파세팅(faceting)이 구멍 입구를 넓힐 수 있으므로, 조건을 바꾸면 마스크 잔여와 입구 형상을 SEM 단면으로 먼저 확인한다.

하드마스크 전사의 오버에치. 막 두께와 식각률은 웨이퍼 전체에서 완벽히 균일하지 않다 → 가장 두꺼운 곳까지 확실하게 뚫으려면 막 두께보다 조금 더 깎아야 한다 → 이것이 의도된 오버에치다. 기준 런의 ③ RIE는 50.4 nm 막에 55.4 nm 분량, 즉 약 10 %의 오버에치로 산출되었다. 그 대가로 노출된 Si가 깎이는데, CHF_3 화학은 Si를 SiO_2 보다 훨씬 느리게 깎으므로 손실은 0.33 nm에 그쳤다. 실공정에서는 오버에치가 길어지면 Si 손상과 PR 후퇴가 함께 커지므로 오버에치 비율을 조건마다 정한다.

ARDE는 없애는 것이 아니라 설계에 넣는 것이다. 기준 런에서 모델은 지름이 작을수록 얇은 결과를 산출했으며, 이는 서론의 세 기전이 가리키는 방향과 같다. 지름별 깊이는 3D 단면 뷰에서 절단면을 골라 확인한다. 실공정에서는 여기에 측벽이 볼록해지는 보잉(bowing), 바닥 모서리가 더 깊게 파이는 마이크로트렌칭, 미세 잔류물이 마스크 역할을 해 바닥이 거칠어지는 블랙 실리콘, 고종횡비에서 식각이 멈추는 에치 스톱이 더해질 수 있다. 저압·고밀도 조건이 ARDE를 줄이는 기본 처방이지만 완전히 없애지는 못하므로, 가장 좁은 구멍을 기준으로 식각 시간을 정하고 넓은 구멍에 생기는 추가 식각을 감수하는 방식으로 설계한다.

ICP가 딥 에치에 쓰이는 이유. 용량결합(CCP) 방식은 RF 하나로 플라즈마 밀도와 이온 에너지를 함께 정하므로 "많이, 그러나 약하게" 때리는 조합을 만들기 어렵다. ICP는 상부 코일의 source power로 밀도를, 하부 척의 bias power로 이온 에너지를 따로 정한다. 레포트의 모델 서술에 따르면 source를 올려 밀도를 높이면 bias를 그대로 두어도 V_{dc} 가 내려간다. 풀어 쓰면, 밀도가 높아진다 → 같은 bias 전력을 더 많은 이온이 나눠 받는다 → 이온 하나당 에너지가 낮아진다 → 식각량은 유지하면서 데미지를 줄일 수 있다. 다만 실장비의 V_{dc} 는 챔버 형상·RF 주파수·가스 조성 등에 따라 달라지므로, 같은 전력 값이 같은 이온 에너지를 보장하지 않는다.

깊이는 무엇으로 재는가. 광학 현미경은 위에서 내려다보는 장비라 형상과 결함은 보지만 깊이는 보지 못한다. 또 $\varnothing 0.5 \mu\text{m}$ 는 광학 분해능 한계에 가까워, 미세 지름(CD) 확인에는 SEM이 적합하다. 프로파일로미터는 스타일러스 팁으로 표면을 긁어 높낮이를 읽는데, 팁이 구멍 안으로 들어가지 못하면 입구 위를 지나가며 평탄한 면으로 읽는다. 기준 런에서 $\varnothing 4 \mu\text{m}$ 홀조차 깊이를 읽지 못한 이유다. 따라서 비아 깊이는 SEM 단면으로 확인하며, AFM은 종횡비가 낮은 구조에서만 대안이 된다.

마무리를 습식으로 하는 이유. ⑥ BOE는 SiO_2 는 녹이지만 Si는 사실상 깎지 않는다. 화학 자체가 멈춤층 역할을 하므로 담그는 시간이 조금 길어져도 식각해 둔 비아가 손상되지 않는다. 세계 깎는 일은 건식으로, 벗겨내는 마무리는 선택비가 큰 습식으로 나누는 것은 공정 순서에서 자주 보이는 구조다. 끝으로, 본 문서의 수치는 기준 런(권장 조건)의 것이다. 조건을 바꾸면 값도 달라지며, 기준 런 값은 비교의 출발점이지 정답이 아니다.

5. 응용

이 플로우는 만드는 것은 크기만 다른 구멍 네 종류지만, 여기서 익히는 "지름이 결과를 바꾼다"는 감각과 마스크 전사·계측 선택의 논리는 Si 식각이 들어가는 여러 곳에 그대로 쓰인다.

① **Si 트렌치·홀 식각의 설계 감각.** 소자 분리 트렌치, 딥 트렌치, MEMS 구조처럼 한 웨이퍼에 크기가 다른 개구부가 섞이면, 같은 식각 시간에도 깊이가 달라진다. 가장 좁은 개구부를 기준으로 시간을 정하고 넓은 곳의 추가 식각을 어떻게 흡수할지를 함께 설계해야 한다는 점을 이 시나리오로 먼저 익힐 수 있다.

② **ICP 파라미터 조건 찾기 연습.** source, bias, 압력을 한 번에 하나씩만 바꾸고 V_{dc} , 마스크 잔여, 지름별 깊이가 어느 방향으로 움직이는지 확인하는 것이 실험계획법(DOE)의 출발점이다. 특히 source만 올렸을 때 V_{dc} 가 줄어드는 방향은 직관과 반대여서 첫 실험으로 적합하다.

③ **패턴 전사 체인의 이해.** PR → SiO_2 하드마스크 → Si로 패턴을 옮겨 가는 구조는 식각 공정 전반의 기본 틀이다. 각 단계에서 무엇이 마스크이고 무엇이 깎이는 대상인지, 그 사이의 선택비가 얼마인지를 따지는 습관을 이 11단계로 훈련할 수 있다. 실장비 실습 전의 연습으로도 유효하다.

④ **후속 시나리오와의 연결.** RIE 마이크로로딩 시나리오(#004)가 주변 패턴 밀도에 따른 식각 차이를 다룬다면, 이 시나리오는 개별 구멍의 종횡비에 따른 차이를 다룬다. 두 현상을 나란히 두면 "식각 결과는 조건뿐 아니라 패턴의 모양과 배치가 정한다"는 점이 분명해진다. 더 깊은 Si 식각으로 확장하면 SF_6 식각과 C_4F_8 보호막 증착을 번갈아 하는 Bosch 공정이 등장하며, 이 시나리오의 ICP 단계에도 두 가스의 유량 항목이 있다.

6. 참고문헌

- [1] R. A. Gottscho, C. W. Jurgensen, D. J. Vitkavage, "Microscopic uniformity in plasma etching," Journal of Vacuum Science & Technology B, vol. 10, pp. 2133–2147, 1992.
- [2] M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, 2nd ed., Wiley, 2005.
- [3] S. Franssila, Introduction to Microfabrication, 2nd ed., Wiley, 2010.
- [4] SemiFab AI, 공정 센터 — ICP 비아홀 식각 (홀패턴·크기별 ARDE) 플로우. semifabai.com