

SiO2 하드마스크 습식 등방 언더컷 — 마스크 전환과 등방성 판단

Wet Isotropic Undercut (SiO2 Hard Mask) 시나리오 기술 노트

SemiFab AI

시나리오 등재: 2026년 8월 | 난이도: intermediate | 11단계

초록 Al 750nm 위에 SiO2 296.2nm를 증착하고, PR로 3 μ m 개구를 정의해 SiO2에 창을 연 뒤 PR을 제거하고, 이 SiO2를 하드마스크 삼아 Al을 습식(H3PO4)으로 등방 식각해 사발형 캐비티와 마스크 처마(overhang)를 만드는 플로우를 다룬다. 기준 런(권장 조건)에서 SiO2 식각 단계는 수직으로 막 전량인 296.2nm만 제거되고 그 아래 Al에서 자연히 멈췄지만, 언더컷은 그런 제동 없이 시간 기준 명목값과 같은 0.45 μ m까지 진행되어 수직·수평이 서로 달랐다. 이어지는 Al 식각 단계는 이런 제동 재료를 만나지 않아 수직 500nm·언더컷 0.50 μ m로 두 값이 같게 산출되었다. 본 문서의 수치는 실장비 측정값이 아니라 MiniFab 시뮬레이션 계측값이다.

1. 서론

포토리소그래피(PR)는 대부분의 건식·습식 공정에서 마스크로 쓸 수 있지만, 모든 식각 조합에 그대로 쓸 수 있는 것은 아니다. 이번 플로우처럼 습식 식각액에 장시간(수백 초) 노출되거나, 식각 대상이 PR과 접착·화학 안정성 면에서 궁합이 나쁜 금속(Al)일 경우, PR을 식각 내내 마스크로 남겨 두는 대신 한 번 더 단단한 재질로 패턴을 옮겨 담는 편이 안전하다. 이 플로우가 택한 방법은 이렇다 — 먼저 PR로 SiO2에 패턴을 옮기고(BOE 습식 식각), 그 다음 PR을 O2 애싱으로 완전히 제거한 뒤, 남은 SiO2가 이어서 Al 식각의 마스크 역할을 한다(그림 1). PR은 패턴을 정의하는 임무만 마치고 사라지고, 실제로 오래 버텨야 하는 Al 습식 식각 단계는 훨씬 화학적으로 안정한 SiO2가 감당하는 구조다.

이 식각은 등방(isotropic)으로 진행된다는 점도 서론에서 짚어 둘 필요가 있다. 이방(anisotropic) 식각(RIE 등)은 수직으로만 파고들어 마스크 아래를 거의 건드리지 않지만, 습식 등방 식각은 액체가 닿는 모든 방향으로 같은 속도로 파고든다. 그 결과 마스크 개구보다 안쪽이 더 넓게 파이고, 마스크는 허공에 뜬 처마(overhang) 형태로 남는다. 이 언더컷은 결함도 아니라 이 식각 방식의 본질적인 특징이며, 언더컷의 크기를 예측하고 확인하는 것이 이 시나리오의 핵심 훈련 목표다.

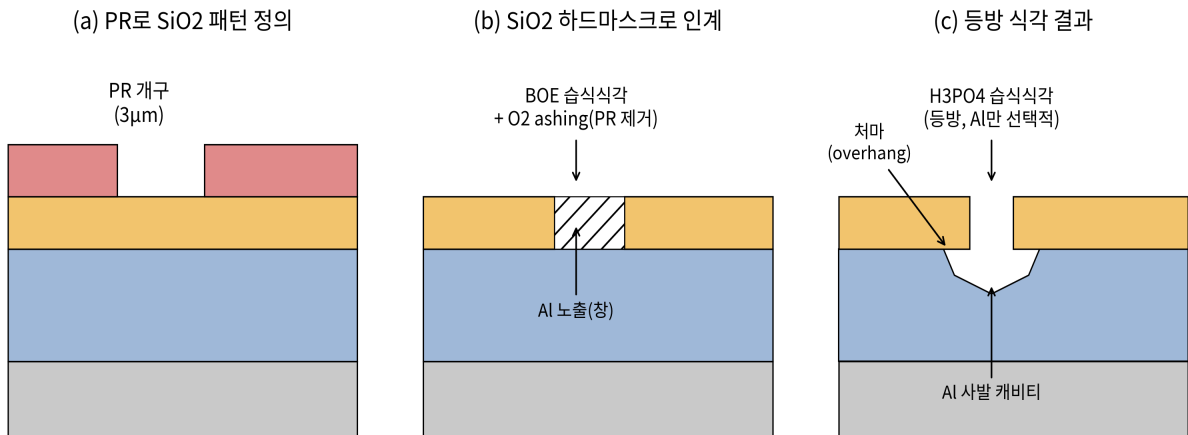


그림 1. 마스크 전환 개념 — (a) PR로 SiO2 패턴 정의, (b) SiO2 하드마스크로 인계, (c) 등방 식각으로 Al 사발 캐비티와 마스크 처마 형성

2. 실험 방법

2.1 실험 환경

본 공정은 MiniFab의 시나리오 모드에서 수행된다. 시나리오 모드는 여러 단위 공정을 순서대로 이어 하나의 완성 구조를 만드는 방식이며, 화면 좌측의 단계 목록을 따라 각 단계의 파라미터를 입력하고 공정이 끝나면 측정 리포트와 레이어 스택 요약을 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 4개 구간, 11단계로 이루어진다(표 1). 기준 런은 각 단계에서 시나리오가 제시하는 권장 조건을 그대로 사용했다. 완성하려는 구조는 그림 2와 같다.

구간	단계	조건 (기준 런)	핵심
준비	SC-1 세정	70°C · 120s	표면 오염 제거, 친수성화
적층	Al 스퍼터 → SiO2 PECVD	Al 750nm (500W/5mTorr/600s) SiO2 296.2nm (300W/150mTorr/300s)	금속층 + 하드마스크 원자재 형성
리소	PR 도포 → 베이크 → 노광 → 현상 → 하드베이크	az5214 · 3000rpm 개구 3μm · dose 120mJ	SiO2 패턴 정의용 PR 마스크
식각·전환	SiO2 BOE 식각 → O2 애싱 → Al H3PO4 식각	BOE 300s → 애싱 150W/90s → H3PO4 500s	PR→SiO2 마스크 전환 후 Al 등방 식각

표 1. 공정 구성

목표 구조 — Si / Al(사발 캐비티) / SiO2 하드마스크(처마)

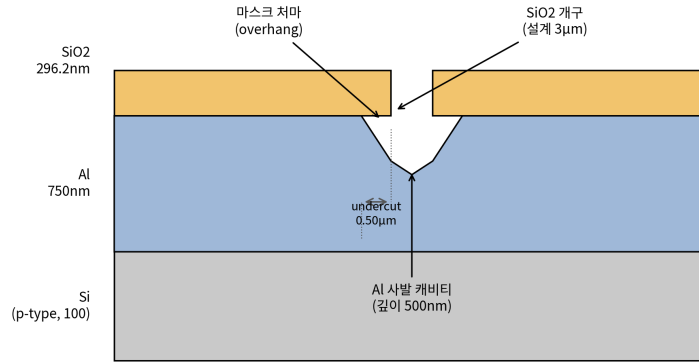


그림 2. 목표 구조 — Si / Al(사발 캐비티, 깊이 500nm) / SiO2 하드마스크(296.2nm, 처마 형성). 두께·형상은 레포트 수치를 따르되 미세 프로파일은 개략 표현이다.

표 2는 각 단계의 조작 변수가 결과를 어느 방향으로 바꾸는지, 그리고 그 변화가 어떤 계측에서 드러나는지 정리한 것이다. 선풍이 아니라 식각 깊이·언더컷이 핵심 변수이므로, 검출 계측도 그에 맞춘다.

파라미터	줄이면	늘리면	검출 계측
SiO2 식각(BOE) time_sec	창이 덜 열림 · SiO2 잔막 위험	수직은 Al에서 etch-stop되어 296.2nm 이상 안 깊어지지만, 언더컷은 계속 증가 (처마 위험)	프로파일로미터 · 광학 검사
O2 애싱 time_sec / rf_power_w	PR 잔류 → 후속 식각 마스크 오염	PR 잔량 감소 (과도 시 SiO2 표면 손상 우려)	광학 검사
Al 식각(H3PO4) time_sec	캐비티 얕음 · 관통 미달	캐비티·언더컷 모두 증가 (750nm 초과 시 Si 도달 가능)	프로파일로미터

표 2. 파라미터 민감도와 검출 계측

3. 결과

등방 식각은 액체가 닿는 모든 방향으로 같은 속도로 진행되지만, 그 속도가 실제로 얼마나 깊이 도달하는지는 방향마다 다른 재료를 만나는데 달려 있다. 진행을 막는 재료가 없을 때 식각률과 시간만으로 정해지는 양을 명목 식각량(N)이라 하면, 실제 수직 깊이(D)는 그 경로에 etch-stop 재료가 있을 경우 N보다 작아질 수 있다. 언더컷(U, 수평 방향)에 그런 재료가 없다면 U는 N을 그대로 따른다.

$D \leq N$, $U \approx N$ (N: 명목 식각량 = 식각률 × 시간, D: 실제 수직 깊이, U: 언더컷 — 수직 경로에 etch-stop이 있으면 $D < N$, 없으면 $D = N$)

단계	명목 식각량 N	실제 수직 깊이 D (기준 런)	언더컷 U (기준 런)	관계
SiO2 식각 (BOE, 300s)	450.0nm	296.2nm (SiO2 전량, Al에서 etch-stop)	0.45μm (= 450nm, N과 일치)	$D < N = U$
Al 식각 (H3PO4, 500s)	500.0nm	500.0nm (Al 내부, etch-stop 없음)	0.50μm (= 500nm)	$D = N = U$

표 3. 기준 런의 명목 식각량·실제 수직 깊이·언더컷 — SiO2 단계는 etch-stop으로 $D < N = U$, Al 단계는 etch-stop 없이 $D = N = U$

BOE 단계는 시간 기준 명목 식각량이 450nm이지만, 창 아래 SiO2가 296.2nm에서 끝나고 그 아래는 Al이다. 09단계 레포트는 이 Al을 두고 "이 화학에 안 깎임(자연 etch-stop)"이라고 표기하는데, 그 덕에 수직 방향은 SiO2가 다 걸린 296.2nm에서 멈췄다. 반면 옆으로 파고드는 언더컷 방향에는 이런 etch-stop이 없어, 같은 시간 동안 명목값 그대로인 0.45μm까지 진행되었다. 즉 이 단계는 수직과 수평이 서로 다른 재료 환경(하나는 etch-stop 있음, 하나는 없음)을 만나 실제 깊이와 언더컷이 갈라진 경우다.

Al 단계는 다르다. 500초 동안 수직으로 500.0nm, 언더컷도 0.50μm로 산출되어 두 값이 같았다. 이 단계는 Al 750nm 두께 안에서 시간에 의해서만 진행이 멈췄고(750nm를 넘지 않아 Si에 닿지 않는다), 수직·수평 모두 같은 재료(Al) 안에서

진행되었기 때문에 등방 식각의 기본 관계($D=U$)가 그대로 유지되었다.

광학 현미경 검사에서는 검출 결함 0개, SiO₂ 보호 영역과 창으로 노출된 Al 사이의 간섭색 경계가 관찰되어 패턴이 정상적으로 열렸음을 확인했다.

프로파일로미터는 중심 781.5nm · 엣지 787.6nm(불균일도 0.8%)의 단차를 보고했다. 레포트는 이 단차가 어느 두 지점 사이의 높이차인지 표기하지 않는다. 층 두께로 역산하면, 마스크가 남은 필드 표면(Si 기준 Al 750nm + SiO₂ 296.2nm = 1046.2nm)과 Al 캐비티 바닥(Si 기준 750nm - 500nm = 250nm)의 전체 단차는 1046.2 - 250 = 796.2nm로, 보고값(781.5nm)과 가깝다(차이 약 15nm, 약 1.8%). "마스크 필드 표면 → Al 캐비티 바닥"의 전체 단차일 가능성이 높다는 뜻이지만, 근사적 정합에 근거한 해석이며 레포트에서 직접 확인되는 사실은 아니다.

4. 고찰

무엇이 확인되었는가. 이번 기준 런은 등방 식각에서 수직 깊이와 언더컷이 항상 같지는 않다는 것을 보여준다. SiO₂ 단계처럼 수직 경로에 자연 etch-stop(Al)이 있으면 수직은 그 경계에서 멈추지만 언더컷은 그렇지 않아 두 값이 갈라진다(표 3, $D < N=U$). 반대로 Al 단계처럼 수직·수평 모두 같은 재료 안에서 시간에 의해서만 진행이 끝나면 두 값이 같게 산출된다($D=N=U$).

무엇이 확인되지 않았는가. 이 결과가 "언더컷은 항상 명목 식각량과 같다"는 일반 규칙이라고 볼 수는 없다. 기준 런은 한 번($n=1$)이고, 그 한 번도 모델이 계산한 값이다. 실제 습식 식각은 액 농도, 교반 여부, 온도 균일도, 좁은 개구(3μm처럼)에서의 액 순환 지연에 따라 언더컷이 명목값보다 작게 나오는 경우도 흔히 보고된다 — 즉 $U=N$ 이 항상 보장되는 관계가 아니라, 이번 모델이 그렇게 계산했다는 것만 확인된 것이다.

실공정에서 무엇을 더 봐야 하는가. 두 가지를 먼저 확인해야 한다. 첫째, 마스크 처마의 기계적 안정성이다 — 언더컷이 깊어질수록 SiO₂ 처마가 지지되지 않는 폭이 늘어나고, 오버에치가 누적되면 처마가 스스로 무게를 못 이기고 부서지거나 떨어져 나가 캐비티 안에 잔류물로 남을 수 있다. 둘째, BOE→H₃PO₄로 이어지는 두 화학의 선택비가 실장비에서도 유지되는가이다 — 이번 시뮬레이션은 각 화학이 반대 재질을 공격하지 않는 것으로 다루었지만, 실제 습식조에서는 미량의 교차 공격이나 표면 잔류물에 의한 선택비 저하가 관찰되곤 한다. 언더컷 프로파일과 처마 상태를 먼저 SEM 단면으로 확인하는 것이 이 두 가지를 함께 점검하는 방법이다.

왜 Al 단계의 결과를 "성공"이 아니라 "내부 일관성"으로 읽어야 하는가. 11단계의 수직 깊이(500nm)와 언더컷(0.50μm)은 모두 같은 시뮬레이션 모델이 계산한 값이다. 두 값이 같게 나온 것은 모델이 등방 식각을 그렇게 정의해 계산했기 때문이며, 이는 독립적인 두 측정이 서로 다른 경로로 같은 결론에 도달한 것과는 다르다. 여기서 확인되는 것은 기준 런 결과의 내부 일관성이고, 실장비에서 이 관계가 그대로 재현되는지는 별도로 확인해야 한다.

그리고 한 가지 — 본 문서의 수치는 기준 런(권장 조건)의 것이다. 식각 시간·온도·농도 조건을 바꾸면 언더컷과 캐비티 깊이도 달라진다. 기준 런 값은 비교의 출발점이지 정답이 아니다.

5. 응용

① 마스크 재질 전환이 필요한 공정의 표준 사고 틀. PR이 식각 조건을 버티지 못하는 조합은 이 플로우 말고도 흔하다 — 장시간 습식, 고온 공정, PR과 반응하는 화학 등. "패턴은 무른 재질(PR)로 정의하고, 실제로 버텨야 하는 식각은 단단한 재질(하드마스크)에 넘긴다"는 이 순서 자체가 재사용 가능한 설계 패턴이다.

② MEMS·센서의 캐비티·멤브레인 구조 예습. 압력 센서 다이어프램, 마이크로채널, 희생층 제거처럼 표면 아래를 파먹어 빈 공간을 만드는 구조는 등방 습식 식각을 그대로 활용한다. 이 플로우의 사발 캐비티는 그런 구조의 최소 단위이며, 언더컷을 의도적으로 만드는 감각을 여기서 먼저 익힐 수 있다.

③ 등방 대 이방 비교 실습의 기준점. 같은 개구에서 습식 등방 대신 RIE 같은 이방 건식 식각을 쓰면 언더컷이 거의 없이 수직으로만 파인다. 이 플로우로 등방 결과를 먼저 만들어 두면, 이후 이방 식각 시나리오와 나란히 놓고 "같은 개구, 다른 식각 방식이 만드는 형상 차이"를 직접 비교할 수 있다.

④ etch-stop 유무를 판별하는 DOE 연습. 표 3에서 확인했듯, 같은 등방 식각이라도 수직 경로에 etch-stop이 있는 단계(BOE)와 없는 단계(H₃PO₄)는 시간에 따른 거동이 다르다. H₃PO₄ time_sec만 바뀌가며 캐비티 깊이와 언더컷이 나란히 늘어나는지, 혹은 BOE time_sec을 바뀌가며 수직은 296.2nm에서 멈추고 언더컷만 계속 늘어나는지를 관찰하는 것은, 파라미터 하나를 고정하고 나머지를 관찰하는 실험계획법(DOE)의 기초 훈련이자 etch-stop 판별 연습으로 그대로 쓸 수 있다.

6. 참고문헌

[1] S. M. Sze, M. K. Lee, Semiconductor Devices: Physics and Technology, 3rd ed., Wiley, 2012.

[2] S. Franssila, Introduction to Microfabrication, 2nd ed., Wiley, 2010.

[3] K. R. Williams, R. S. Muller, "Etch Rates for Micromachining Processing," IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 5, no. 4, pp. 256–269, 1996.

[4] SemiFab AI, MiniFab — Wet Isotropic Undercut (SiO₂ Hard Mask) 시나리오. semifabai.com