

식각 없이 만드는 금속 라인 — 리프트오프에 의한 Al 패터닝

— Metal Lift-off Mini Flow 시나리오 기술 노트 —

SemiFab AI

시나리오 등재: 2026년 7월 | 난이도: 중간 | 11단계

초록 Si 기판 위에 SiO_2 절연층을 만든 뒤, 금속을 깎아 패턴을 만드는 대신 PR로 틀을 먼저 만들고 Al을 전면 증착한 다음 PR을 용해시켜 금속을 건어내는 방식으로 폭 $5\mu\text{m}$ 의 Al 라인을 형성한다. 이 순서의 핵심은 금속이 식각 화학을 한 번도 만나지 않는다는 점이다. 권장 조건으로 진행한 기준 런에서는 Al 증착 목표 150nm 에 대해 단차 147.5nm (웨이퍼 내 불균일도 1.4%), 면저항 $0.176\Omega/\square$, 면저항 환산 라인 저항 $177.5\Omega(W 5\mu\text{m} \cdot L 5\text{mm})$ 이 산출되었고, 광학 검사에서 검출된 결함은 없었다. 본 문서의 수치는 실장비 측정값이 아니라 MiniFab 시뮬레이션 계측값이다. 본 문서는 시나리오를 돌릴 때 옆에 두고 참조하는 용도이다.

1. 서론

금속 배선을 만드는 방법은 두 갈래로 나뉜다. 하나는 금속을 웨이퍼 전면에 깔고 남길 곳만 PR로 덮은 뒤 나머지를 식각해 없애는 방식이다(감법). 다른 하나는 PR로 틀을 먼저 만들어 금속이 들어갈 자리만 열어 둔 뒤, 금속을 전면에 증착하고, PR을 녹여 그 위에 얹힌 금속까지 함께 건어내는 방식이다(가법). 뒤쪽이 리프트오프다. 여기서 PR은 남길 곳을 지키는 보호막이 아니라 금속이 들어갈 자리를 비워 두는 틀이다. 역할이 정반대다.

Al에서 굳이 뒤쪽을 고르는 이유가 있다. Al 식각은 염소계 플라스마(Cl_2 , BCl_3)에 의존하는데, 문제는 공정이 끝난 다음에 생긴다. 패턴 측벽과 PR 안에 염소 성분이 남는다 → 이것이 대기 중 수분과 만난다 → 염산 계열로 바뀐다 → Al을 갉아먹는다. 이를 후부식(post-etch corrosion)이라고 부른다. 그래서 감법으로 Al을 패터닝하면 식각 직후에 부식 방지 처리와 애싱, 잔류물 세정이 따라붙어 공정 하나가 아니라 공정 묶음이 된다. 리프트오프에서는 이 문제 자체가 생기지 않는다. 금속이 식각 화학을 한 번도 만나지 않기 때문이다.

대신 조건이 붙는다. 리프트오프의 성패는 한 문장으로 정리된다 — 증착된 금속막이 PR 벽에서 끊어져야 한다. PR 위의 금속과 개구 바닥의 금속이 측벽을 타고 이어져 있으면, 용매가 PR까지 도달하지 못한다 → PR이 녹지 않는다 → 박리가 되지 않거나 지저분하게 찢어진다. 끊어지게 만드는 수단은 세 가지다. 첫째는 **두께비**로, PR이 금속보다 충분히 두꺼우면(통상 3배 이상) 측벽에 덮인 금속이 상대적으로 얇아져 그 부분이 먼저 끊어진다. 둘째는 **개구 단면**으로, 위가 아래보다 튀어나온 오버행 형상을 만들면 그 그림자가 측벽에 금속이 닿는 것을 막는다. 셋째는 **증착의 방향성**으로, 금속이 곧게 날아와 바닥에만 쌓이면 측벽은 비어 있게 된다. 그림 1은 이 과정을 단면으로 정리한 것이다.

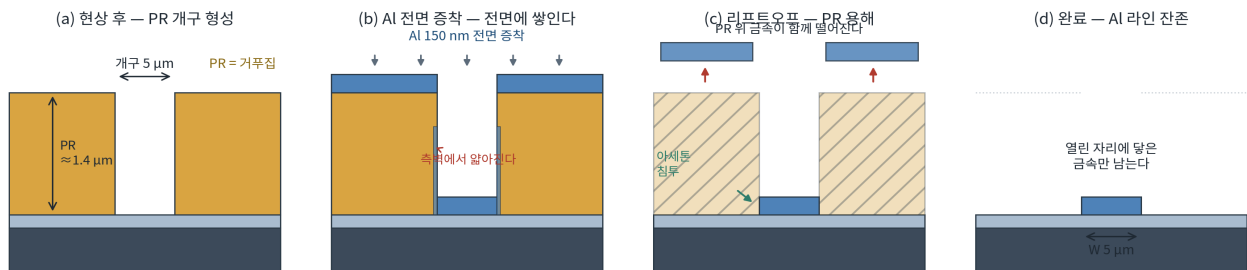


그림 1. 리프트오프 단면 진화 — PR로 틀을 만들고(a), 전면 증착 후(b), PR을 용해시켜(c) 열린 자리의 금속만 남긴다(d)

2. 실험 방법

2.1 실험 환경. 본 공정은 MiniFab 공정 센터에서 수행된다. 각 단계의 파라미터를 입력하고 순서대로 실행하면 완료 후 공정 결과 레포트가 생성되며, 레포트는 시편 정보 · 최종 레이어 스택 · 공정 이력(단계별 입력 파라미터) · 측정 결과의 네 부분으로 이루어진다. 본 문서에 실린 수치는 모두 이 레포트에서 확인된 값이다. 다만 레포트의 측정 결과는 시뮬레이션 모델이 산출한 값이며 실장비 계측값이 아니다. 이후 본문에서 '기준 런 계측값'이라고 쓴 것은 모두 이 시뮬레이션 산출값을 가리킨다. 시편은 p형 (100) Si 기판이다.

2.2 공정 구성. 공정은 4개 구간, 11단계로 이루어진다(표 1). 구조를 만드는 공정 8단계와 결과를 확인하는 계측 3단계로 나뉜다. 기준 런은 각 단계에서 시나리오가 제시하는 권장 조건을 그대로 사용했다. 완성하려는 구조는 그림 2와 같다.

표 1. 공정 구성 — 4구간 11단계 (기준 런 조건)

구간	단계	기준 런 조건	이 구간이 하는 일
준비	1. 표면 세정 → 2. 열산화	SC-1, $70^\circ\text{C} \cdot 120\text{s}$ / dry O_2 , $1000^\circ\text{C} \cdot 24\text{min}$	오염 제거 + SiO_2 절연층 10.1nm 성장
리소 (틀 형성)	3. PR 도포 → 4. 베이킹 → 5. 노광 → 6. 현상	az5214, 3000rpm · 30s / $100^\circ\text{C} \cdot 60\text{s}$ / 120mJ , hard contact / TMAH 2.38%, 60s	line/space $5\mu\text{m}$ 개구를 PR에 정의
증착 · 박리	7. Al 증착 → 8. 리프트오프	스퍼터 Al, 200W · 5mTorr · 300s / 아세톤 180s	전면 증착 후 PR 용해 → Al 패턴 형성
검증	9. 광학 검사 → 10. 두께 측정 → 11. 저항 측정	광학 현미경 / 프로파일로미터 / 4점 탐침기	형상 · 두께 · 전기의 3축 확인

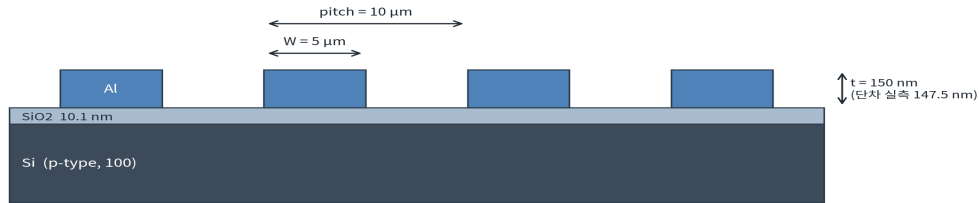


그림 2. 기준 런의 목표 구조 — Si / SiO₂ / Al 라인 (line 5μm, pitch 10μm)

각 단계의 입력이 권장 범위를 벗어나면 결과 어딘가에 흔적이 남는다. 리프트오프에서 특히 중요한 것은 원인 단계와 증상이 드러나는 단계 사이에 시차가 있다는 점이다. 3단계에서 PR을 얇게 만든 결과는 4단계가 아니라 8단계에서 터진다. 표 2는 어떤 입력이 어긋나면 무엇이 잘못되고, 그것이 세 가지 계측 중 어디에서 드러나는지를 정리한 것이다. 결과를 해석할 때 이 표가 역추적의 지도가 된다.

표 2. 파라미터 민감도와 검출 계측

파라미터	부족 · 짧음	과다 · 김 · 범위 이탈	검출 계측
PR 도포 회전수	PR 두꺼움 → 현상 시간 부족 위험	PR 얇아짐 → 두께비 붕괴 → 박리 불량	광학 검사
노광량	잔막(스کم) 잔류 → 금속 밀착 불량	개구 확대 → 라인 폭 증가 · 측벽 완만	광학 검사(CD) + 라인 양단 저항
현상 시간	개구 미개방 · 잔막	개구 확대 · PR 손실	광학 검사
스퍼터 압력	권장 범위를 벗어나면 두께 불균일도 상승(양방향)	작동	프로파일로미터 (중심 · 엣지 비교)
스퍼터 시간	금속 얇음 → 면저항 상승	금속 두꺼움 → 두께비 하락 → 박리 난이도 상승	프로파일로미터 + 4점 탐침
리프트오프 시간	PR 잔류 → 버(fence) · 잔막	라인 손상 · 단선	광학 검사 + 연속성 확인

3. 결과

측정에는 순서가 있다 — 재기 전에 먼저 예측하는 것이다. 값을 미리 계산해 두어야 결과가 나왔을 때 잘 됐는지 이상한지를 그 자리에서 판단할 수 있다. 예측에 쓰는 식은 두 개뿐이다.

$$R_s = \rho / t \cdot R(\text{라인}) = R_s \times (L / W)$$

(ρ : 금속 비저항, t : 막 두께, L : 라인 길이, W : 라인 폭)

첫 식은 막이 얇을수록 면저항이 커진다는 뜻이다. 둘째 식은 라인을 한 변이 W 인 정사각형이 L/W 개 이어진 것으로 보고 그 개수를 곱한다는 뜻이며, 이 개수를 스쿼어 수라고 부른다. 폭 5μm에 길이 5mm면 정사각형 1000개가 이어진 셈이다. Al의 비저항은 대략 2.7μΩ·cm이므로, 두께 150nm에서 면저항은 0.18Ω/□ 부근, 라인 저항은 180Ω 부근으로 예측된다. 기준 런의 예측값과 계측값을 표 3에 정리했다.

표 3. 이론 예측값과 기준 런 시뮬레이션 계측값

항목	계측	이론 예측	기준 런 계측값 (시뮬레이션)
형상 · 결함	광학 현미경	결함 없음	검출 결함 0개 — 정상 패턴
단차 (금속 두께)	프로파일로미터	≈150nm (중착 목표)	147.5nm (중심) · 145.4nm (엣지) 불균일도 1.4%
라인 폭 · 피치	프로파일 스캔 (미세 CD 계측 아님)	5μm / 10μm (마스크 설계)	5μm / 10μm
면저항 R_s	4점 탐침기 (측정 위치 레포트 미표기)	0.176~0.18Ω/□ (ρ/t)	0.176Ω/□
라인 저항 R	4점 탐침기 환산 (1000 squares)	176~180Ω ($R_s \times 1000$)	177.5Ω ($W 5\mu m \cdot L 5mm$)

다섯 항목 모두 예측 범위 안에서 산출되었고, 라인 저항은 면저항에서 계산한 예측 구간(176~180Ω) 안에 들어왔다. 다만 이것을 서로 독립된 두 측정이 같은 답에 도달한 것으로 읽으면 안 된다. 두께와 저항은 같은 시뮬레이션 모델 안에서 함께 계산되는 값이다. 여기서 확인되는 것은 측정의 독립적 검증이 아니라 기준 런 결과의 내부 일관성이며, 실장비에서 두 경로가 독립적으로 만나는지는 따로 확인해야 한다.

4. 고찰

이번 기준 런이 깨끗하게 끝난 조건은 두께비에 있다. 스퍼터는 스텝 커버리지가 좋다. 즉 측벽까지 잘 덮는다. 다른 공정에서는 장점이지만 리프트오프에서는 불리한 성질이다 — 측벽이 덮이면 막이 끊어지지 않기 때문이다. 서론의 셋째 수단(중착 방향성)은 스퍼터에서 기대하기 어렵다. 그럼에도 이번 기준 런에서는 검출 결함이 없었고, 남은 설명은 첫째 수단이다. az5214를 3000rpm으로 도포하면 통상 1.4μm 부근의 두께가 되며, Al 150nm에 대해 약 9배다. 일반적으로 요구되는 3배를 크게 넘는다. 그러나 두께비만으로 리프트오프가 보장된다고 읽으면 안 된다. 여기서 확인된 것은 약 9:1의 두께비 조건에서 시뮬레이션 모델이 정상 박리를 산출했다는 사실이다. 실제 스퍼터

공정에서는 측벽 피복량, PR 측벽 프로파일, 떨어져 나온 금속의 재증착, 용매의 침투 경로에 따라 버(fence)나 잔류막이 생길 수 있다. 실공정으로 옮길 때는 언더컷 프로파일을 먼저 확인하는 것이 순서다. 덧붙여 PR 두께는 레포트에 표기되지 않는 값이고 도포 조건에서 가져온 통상값이므로, 이 두께비 자체가 확정된 계측값이 아니라 추정이다.

오버행은 이번 런에 없었다. 3단계의 az5214는 이미지 리버설이 가능한 레지스트다. 그러나 기준 런의 공정 이력에는 리버설 베이킹도 플러드 노광도 없다. 즉 포지티브 모드로 동작했고, 이 경우 개구 단면은 빛과 현상액이 위부터 닿는 탓에 위가 넓고 아래가 좁은 형태로 나온다 — 오버행의 반대다. 서론의 둘째 수단은 쓰이지 않았다. 이것이 조건의 여유를 어디에 의존하고 있는지를 말해 준다. 금속을 두껍게 가거나 PR을 얇게 가서 두께비가 3배 근처로 내려오면, 그때부터는 오버행을 만들어야 한다. 이미지 리버설 처리를 넣거나 LOR·PMGI 같은 희생층을 아래에 까는 이중층이 그 방법이다. 정리하면 이번 기준 런은 az5214를 리프트오프에 쓰는 본래 이유, 곧 리버설로 오버행을 만드는 것을 실제로는 사용하지 않은 구성이다. 오버행의 효과를 직접 보려면 리버설 베이킹과 플러드 노광을 포함한 별도 시나리오가 필요하다.

단차 147.5nm와 공칭 150nm의 차이는 증착 분포에서 온다. 감법 식각 플로우였다면 이 차이의 원인 후보에 오버에치가 들어간다 — 식각이 노출부 금속을 다 없앤 뒤에도 잠시 계속되어 아래 SiO_2 가 살짝 깎이고, 단차를 재는 기준면이 내려가기 때문이다. 그러나 리프트오프에는 식각 단계가 아예 없다. 기준면이 깎일 이유가 없다. 남은 원인은 증착 자체의 두께 분포이며, 중심 147.5nm와 엣지 145.4nm의 차이(불균일도 1.4%)가 그것을 직접 보여 준다. 스퍼터 압력이 권장 범위를 벗어나면 이 불균일도가 가장 먼저 커지므로, 단차의 중심-엣지 차이는 증착 조건을 되짚는 신호로 쓰인다.

절연층 10.1nm는 이 측정 조건에서 섀트를 막는 역할을 한다. 저항을 재려면 흘린 전류가 Al 라인만 타고 흘러야 한다. 그런데 Si 기판도 전기가 통한다(p형으로 도핑되어 있다) → 절연층이 없으면 전류의 일부가 기판으로 돌아 흐른다 → 이 우회로를 섀트(shunt)라고 부른다 → 섀트가 생기면 켜 값이 라인의 저항인지 기판까지 합쳐진 값인지 구분할 수 없다. 2단계의 열산화가 앞에 오는 이유가 이것이다. 본 시뮬레이션 모델에서는 24분의 dry 산화로 얻은 정상적인 10.1nm SiO_2 막이 4점 탐침이 거는 낮은 전압 조건에서 이 경로를 억제하는 것으로 다룬다. 실제 절연 성능은 두께만으로 정해지지 않는다. 막의 핀홀, 계면 품질, 인가 전압, 프로브가 어디에 닿는지가 함께 작용한다. 10.1nm는 얇은 절연이므로, 더 높은 전압을 걸거나 패드를 잡는 용도로 확장할 때는 산화 시간을 늘리고 절연 내압을 따로 확인해야 한다.

왜 4점으로 재는가. 바늘 두 개로 재면 바늘과 시료가 닿는 자리에서 생기는 접촉 저항이 측정값에 섞여 들어간다. 4점 탐침은 바늘 네 개를 일렬로 대고 바깥 두 개로 전류를 흘리며 안쪽 두 개로 전압만 읽는다. 전압을 읽는 회로에는 전류가 거의 흐르지 않으므로 접촉 저항이 측정에서 빠진다. 면저항 0.176Ω/□처럼 작은 값을 잴 때 이 구조가 필요한 이유다.

계측 조건에는 레포트가 정하지 않은 부분이 있다. 4점 탐침은 바늘 네 개를 일렬로 대는 방식이다. 실제 장비에서 탐침 간격은 mm 단위이므로 폭 5μm 라인 위에 그대로 올릴 수 없다. 그래서 면저항은 같은 조건으로 증착한 넓은 금속 영역에서 재는 것이 표준이다 — 동일 웨이퍼 안에 함께 배치한 모니터 패턴이거나, 패턴 없이 증착만 한 별도의 모니터 웨이퍼다. 기준 런 레포트는 이 측정 위치를 표기하지 않으며, 따라서 본 문서도 그것을 특정하지 않는다. 실공정으로 옮길 때 가장 먼저 정해야 하는 항목이다. 라인 폭과 피치도 같은 성격이다. 표 3의 5μm / 10μm는 프로파일 스캔에서 얻은 값이며, 스타일러스 팁 반경과 팁 컨볼루션의 영향을 받는 미세 CD 측정에는 광학 현미경이나 SEM이 적합하다. 마지막으로 한 가지 — 본 문서의 수치는 전부 기준 런(권장 조건)의 것이다. 조건을 바꾸면 값도 달라진다. 기준 런 값은 비교의 출발점이지 정답이 아니다.

5. 응용

① **식각 레시피가 없는 금속의 패터닝.** 새로운 금속을 쓰기 시작할 때 가장 먼저 막히는 것이 식각 조건이다. 적절한 화학과 플라즈마 조건을 찾는 데는 시간이 걸리고, 찾아도 후부식 같은 뒤처리 문제가 따라온다. 리프트오프는 그 단계를 건너뛰고 패턴을 얻는 경로다. 연구실 시제작과 소자 단위 실험에서 이 방식이 표준처럼 쓰이는 이유가 여기에 있다.

② **센서 · MEMS의 전극 형성.** 압력 센서, 가스 센서, 바이오칩 같은 소자는 신호를 뽑아낼 금속 전극을 필요로 한다. 소자를 만들기 전에 이런 단순 라인 구조로 자기 장비와 조건에서 금속 배선이 제대로 나오는지 먼저 확인하는 것을 테스트 비히클(test vehicle)이라고 부르며, 이 플로우가 그 최소 단위다.

③ **두께비를 직접 무너뜨려 보는 조건 탐색 연습.** 이번 기준 런은 두께비 약 9배에서 정상 박리가 산출되었다. 한 번에 파라미터 하나만 바꾸는 방식으로 PR 회전수를 올리거나 증착 시간을 늘려 두께비를 낮추면, 어느 지점에서 박리가 지저분해지기 시작하는지를 관찰할 수 있다. 원인 단계와 증상이 드러나는 단계가 떨어져 있는 구조라 실험계획법(DOE)의 사고를 익히기에 적합하다.

④ **감법 플로우와의 대조 학습.** 같은 목표 구조($\text{Si} / \text{SiO}_2 / \text{Al}$ 5μm 라인)를 금속 식각으로 만드는 플로우와 나란히 놓으면, 공정 순서가 어디서 갈라지고 그 결과 어떤 실패 모드가 새로 생기거나 사라지는지가 선명해진다. 단차 차이의 원인이 한쪽에서는 오버에치이고 다른 쪽에서는 증착 분포라는 점이 그 대표적인 예다. 실장비 실습 전의 예습으로도, 실장비가 없는 환경의 대체 실습으로도 유효하다.

6. 참고문헌

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

[2] M. J. Madou, Fundamentals of Microfabrication, 2nd ed., CRC Press, 2002.

[3] B. E. Deal and A. S. Grove, "General Relationship for the Thermal Oxidation of Silicon," Journal of Applied Physics, vol. 36, no. 12, pp. 3770–3778, 1965.

[4] F. M. Smits, "Measurement of Sheet Resistivities with the Four-Point Probe," Bell System Technical Journal, vol. 37, no. 3, pp. 711–718, 1958.

[5] SemiFab AI, MiniFab — Metal Lift-off Mini Flow 시나리오. semifabai.com