

절연층 기반 금속 배선 패턴의 형성과 3축 검증

— Metal Pattern Mini Flow 시나리오 기술 노트 —

SemiFab AI

시나리오 등재: 2026년 7월 | 난이도: beginner | 13단계

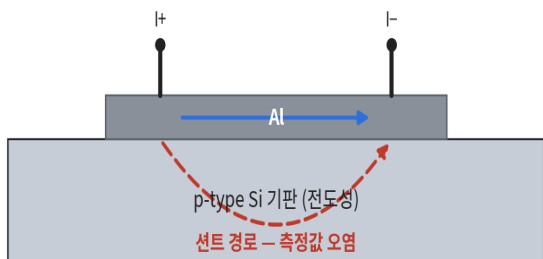
초록 Si 기판 위에 SiO_2 절연층을 만들고, 그 위에 폭 $5\mu\text{m}$ 의 Al 금속 라인을 형성한 뒤, 모양(광학 검사)·두께(프로파일로미터)·전기(저항 측정)의 세 방향에서 잘 되었는지 확인하는 표준 플로우를 다룬다. 권장 조건으로 진행한 기준 런에서는 증착 목표 150nm 에 대해 단차 149nm (웨이퍼 내 편차 약 2%), 면저항 $0.17\Omega/\square$, 라인 저항 약 180Ω 을 얻었고, 서로 다른 두 저항 측정이 같은 값으로 만나는 것을 확인하였다. 본 문서는 시나리오를 돌릴 때 옆에 두고 참조하는 용도이다.

1. 서론

금속선이 잘 만들어졌는지 확인하는 가장 확실한 방법은 저항을 재는 것이다. 그런데 저항을 재려면 한 가지 전제가 필요하다 — **측정하려고 흘린 전류가 금속선만 타고 흘러야 한다**는 것이다. 문제는 Si 기판도 전기가 통한다는 점이다(p형으로 도핑되어 있기 때문이다). 금속을 기판 위에 바로 올리면, 전류의 일부가 금속선 대신 기판으로 돌아서 흐른다. 이렇게 몰래 생기는 우회로를 셉트(shunt) 경로라고 부른다. 셉트가 생기면 잦 값이 금속선의 저항인지, 기판까지 합쳐진 저항인지 구분할 수 없게 된다.

해결책은 단순하다. 금속을 올리기 전에 **전기가 통하지 않는 SiO_2 층을 먼저 깔아서 기판으로 가는 길을 막는 것**이다(그림 1). 이 플로우의 공정 순서가 "산화 → 금속 증착 → 패터닝 → 측정"으로 정해진 이유가 바로 이것이다 — 순서 자체가 측정을 믿을 수 있게 만드는 설계이다.

(a) 절연층 없음



(b) 절연층 있음

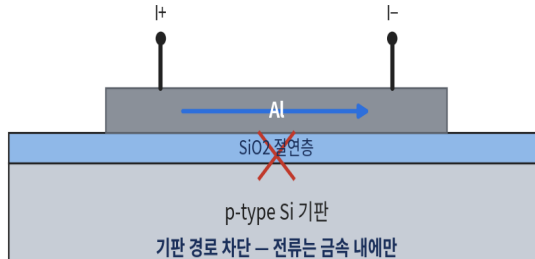


그림 1. 절연층 유무에 따른 측정 전류 경로 비교 — (a) 셉트 발생, (b) 차단

2. 실험 방법

2.1 실험 환경. 본 공정은 MiniFab의 시나리오 모드에서 수행된다. 시나리오 모드는 단일 공정 시뮬레이터와 달리 여러 공정을 순서대로 이어서 하나의 완성 구조를 만드는 방식이다. 화면 좌측의 단계 목록을 따라 각 단계의 파라미터를 직접 입력하고, 공정이 끝나면 측정 리포트와 레이어 스택 요약을 확인한다. 개별 공정을 깊게 파고 싶다면 별도의 단일 공정 시뮬레이터(RIE, 스퍼터, 확산 등)를 이용한다.

2.2 공정 구성. 공정은 5개 구간, 13단계로 이루어진다(표 1). 기준 런은 각 단계에서 시나리오가 제시하는 권장 조건을 그대로 사용했다. 완성하려는 구조는 그림 2와 같다.

표 1. 공정 구성

구간	단계	핵심
준비	RCA 세정 → 열산화 (dry)	표면 정리 + SiO_2 절연층 성장
금속	Al 스퍼터 증착	금속층 형성 (기준 런 목표 150nm)
리소	PR 도포 → 소프트 베이크 → UV 노광 → 현상 → 하드 베이크	line/space $5\mu\text{m}$ 패턴 정의
식각	RIE 식각 → O_2 ashing	노출부 Al 제거 + PR 제거
검증	광학 검사 → 두께 측정 → 저항 측정	형상 · 두께 · 전기 3축

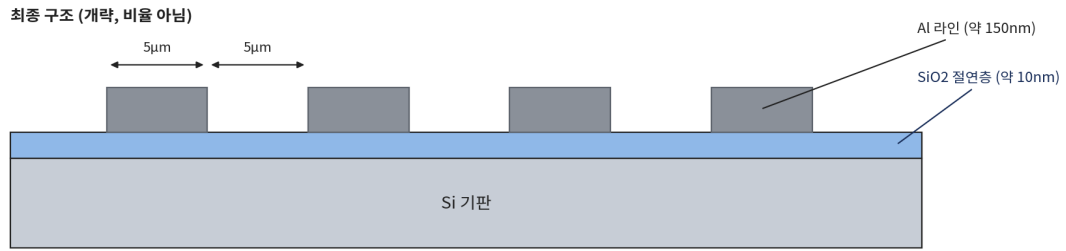


그림 2. 목표 구조 — Si / SiO₂ / Al 라인 (line/space 5μm)

각 단계의 입력값이 권장 범위를 벗어나면 결과 어딘가에 흔적이 남는다. 표 2는 어떤 입력이 어긋나면 무엇이 잘못되고, 그것이 세 가지 측정 중 어디에서 드러나는지를 정리한 것이다. 뒤에서 결과를 해석할 때 이 표가 역추적의 지도가 된다.

표 2. 파라미터 민감도와 검출 측정

파라미터	부족·짧음	과다·김·이탈	검출 측정
세정 시간·온도	오염 잔류	—	광학 검사
스퍼터 압력	범위 이탈 시 두께 불균일도 상승 (양방향)	좌동	프로파일로미터 (중심·엣지 비교)
현상 시간	노광부 PR 잔류 → 패턴 불량	패턴 과다 손실	광학 검사
RIE 시간	Al 잔류	오버에치 → 단차 기준면 하강	광학 검사 + 프로파일로미터

3. 결과

측정에는 순서가 있다 — **재기 전에 먼저 예측하는 것이다**. 값을 미리 계산해 두어야, 실측이 나왔을 때 "잘 됐다" 또는 "이상하다"를 그 자리에서 판단할 수 있다. 예측에 쓰는 식은 두 개뿐이다.

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

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

첫 식은 "막이 얇을수록 면저항이 커진다"는 뜻이고, 둘째 식은 "라인을 정사각형 몇 개가 이어진 것으로 보고 개수를 세면 저항이 나온다"는 뜻이다. 폭 5μm에 길이 5mm면 정사각형 1000개가 이어진 셈이다. 기준 런의 예측값과 실측값을 표 3에 정리했다.

표 3. 기준 런의 예측값과 실측값

항목	측정 방식	예측	실측 (기준 런)
형상	광학 현미경	결함 없음	결함 미관찰 — 정상 패턴
단차 (금속 두께)	프로파일로미터	≈150nm (중략 목표)	149nm · 불균일도 약 2%
면저항 R_s	4-point probe	0.17~0.18Ω/□	0.17Ω/□
라인 저항 R	2-point (라인 양단)	≈180Ω (0.17×1000개)	약 180Ω

네 항목 모두 예측 범위 안에서 관찰되었다. 특히 면저항에서 계산한 라인 저항 예측(약 180Ω)과 실제로 라인 양단에서 잰 값(약 180Ω)이 만났다 — 서로 다른 두 측정이 같은 답을 내면, 그 답은 믿을 수 있다.

4. 고찰 — 이 플로우에서 유의해야 할 조건들

기준 런의 수치 자체보다 중요한 것은, 결과를 좌우하는 조건이 공정 어디에 숨어 있는지를 아는 것이다. 이 플로우에서는 다음 네 지점을 유의해서 보아야 한다.

- ① **RIE 종말점과 오버에치 마진.** 식각은 "Al이 다 없어지는 순간"에 딱 멈추지 않는다. 웨이퍼 위 어떤 지점은 먼저 뚫리고 어떤 지점은 나중에 뚫리므로, 마지막 지점까지 확실히 제거하려면 여분의 식각 시간이 필요하다 — 이것이 오버에치다. 이 여분이 부족하면 Al 잔류가 이웃 라인을 이어 쇼트를 만들고, 과하면 하부 SiO₂가 소모되고 라인 측벽이 침식된다. 여분을 얼마로 잡을지는 식각 균일도와 선택비(Al이 SiO₂보다 얼마나 빨리 깎이는가)를 놓고 정하는 트레이드오프이며, 시나리오에서 RIE 시간을 바꿔 보면 이 양면을 직접 관찰할 수 있다.
- ② **스퍼터 압력은 균일도의 노브다.** 챔버 압력이 바뀌면 스퍼터된 금속 원자가 가스 분자와 충돌하는 횟수가 달라진다. 압력이 높으면 산란이 잦아져 원자의 도달 경로가 흐트러지고, 낮으면 직진성이 강해진다. 이 차이가 웨이퍼 중심과 가장자리의 두께 편차(균일도)로, 나아가 막의 치밀함으로 이어진다. "권장 범위"란 임의의 숫자가 아니라 이 물리의 균형점이라는 뜻이다.
- ③ **절연층은 "있는가"가 아니라 "충분한가"를 물어야 한다.** SiO₂가 섀트를 막는 것은 서론에서 본 대로다. 그러나 층이 너무 얇으면 미세한 구멍(핀홀)이나 누설 전류로 절연이 무너질 수 있다. 산화 온도와 시간이 이 두께를 결정하므로, 마지막 저항 측정의 신뢰성은 사실 첫 구간(열산화 조건)에서 이미 정해지는 셈이다.
- ④ **하드 베이크는 식각을 위한 준비다.** 리소 구간의 마지막 단계인 하드 베이크는 PR을 굳혀 식각을 버틸 내성을 만든다. 경화가 부족하면 식각 중 PR 가장자리가 밀려 패턴 경계가 무너지고, 그 오차는 라인 폭 변화 → 라인 저항 변화로 전기 측정까지 전파된다. 공정 구간들이 독립이 아니라 사슬로 연결되어 있음을 보여주는 지점이다.

⑤ **측정 방식의 선택.** 넓은 막의 면저항은 4-point로 잰다 — 바깥 두 바늘로 전류를 흘리고 안쪽 두 바늘로 전압만 읽으면, 바늘 접촉부에서 생기는 접촉 저항이 측정에서 빠지기 때문이다. 폭 5 μ m 라인은 바늘 네 개를 올릴 자리가 없어 양단 2-point로 재되, 대상 저항이 충분히 크면 접촉 저항의 영향은 상대적으로 작다. 서로 다른 두 측정이 $R_s \times (L/W)$ 계산으로 같은 값에 도달하는 것이 결과를 신뢰하는 근거다.

결론으로, 본 문서의 수치는 기준 런(권장 조건)의 것이다. 위 조건들이 바뀌면 값도 달라진다 — 기준 런 값은 비교의 출발점이지 정답이 아니다.

5. 응용

이 플로우가 만드는 것은 단순한 금속선이지만, 여기서 익힌 "만들고 → 예측하고 → 재고 → 어긋나면 역추적하는" 체계는 금속 배선이 들어가는 거의 모든 곳에 그대로 쓰인다.

① **센서·MEMS의 전극 만들기.** 압력 센서, 가스 센서, 바이오칩 같은 소자는 모두 신호를 뽑아낼 금속 전극이 필요하다. 본격적인 소자를 만들기 전에 이런 단순 라인 구조를 먼저 만들어 "우리 장비·조건으로 금속 배선이 제대로 나오는가"를 확인하는 것이 표준적인 접근이며, 이를 테스트 비히클(test vehicle)이라고 부른다. 이 플로우가 바로 그 최소 단위다.

② **공정 조건 찾기 연습.** 새 공정의 조건은 한 번에 정해지지 않는다. 한 번에 파라미터 하나만 바꾸고(예: RIE 시간만 20% 증가) 결과가 어느 방향으로 움직이는지 확인하는 식으로 조건을 좁혀 간다. 표 2의 민감도를 직접 확인하는 이 훈련이 실험계획법(DOE)의 출발점이며, 이 시나리오는 그 연습장으로 적합하다.

③ **계측 장비를 읽는 훈련.** 프로파일로미터·4-point probe는 펍 어디에나 있는 기본 계측기다. 이 플로우는 그 장비들이 무엇을, 왜 재는지를 하나의 이야기로 연결해 준다. 실장비 실습 전의 예습으로, 또 실장비가 없는 환경의 대체 실습으로 유효하다.

④ **다음 단계의 발판.** 이 구조 위에 층을 더 쌓으면 비아(층간 연결 구멍), 다층 배선으로 확장되고, 같은 패턴닝 문제를 리프트오프로 푸는 방법과 비교할 수도 있다. 상위 난이도 시나리오들은 모두 이 플로우를 출발점으로 삼는다.

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] F. M. Smits, "Measurement of Sheet Resistivities with the Four-Point Probe," Bell System Technical Journal, vol. 37, pp. 711–718, 1958.

[4] SemiFab AI, MiniFab — Metal Pattern Mini Flow 시나리오. semifabai.com