

촘촘한 패턴은 왜 덜 파인가 — RIE 마이크로로딩 효과

MiniFab 시나리오: 마이크로로딩(로컬 밀도) 쿠폰 플로우 (microloading_coupon_flow)

SemiFab AI | 시나리오 등재: _____ | 난이도: _____ | 공정 8단계 + 계측 3단계 (총 11단계)

초록

개구 폭을 $2\mu\text{m}$ 로 통일하고 개구 사이의 간격(로컬 패턴 밀도)만 다르게 배치한 iso-dense 쿠폰을 Si 기판에 RIE로 식각했다. 폭이 같으면 중형비 의존 식각(ARDE)은 전 개구에서 동일하게 작용하므로, 한 단면에 남는 깊이 차이는 로컬 밀도에서만 온다. 시나리오 정의는 촘촘한 dense 개구가 약 690 nm, 고립된 iso 개구가 약 826 nm로 약 17 % 차이를 내도록 설계되어 있다. 기존 런에서 산출된 최대 트렌치 깊이는 825.6 nm이며, dense 쪽 깊이는 이번 런의 레포트에 출력되지 않았다. 같은 런의 프로파일로미터는 단차를 267.9 nm로 산출했는데, 이는 트렌치가 얕아서가 아니라 스타일러스 팁이 $2\mu\text{m}$ 개구에 들어가지 못하고 어깨에서 멈추기 때문이다. 본 문서의 수치는 실장비 측정값이 아니라 MiniFab 시뮬레이션 계측값이다.

1. 서론

플라즈마 식각의 결과는 개구 하나만 보고 정해지지 않는다. 같은 마스크 위라도 어떤 개구는 주변에 비슷한 개구가 뿔뿔하게 몰려 있고, 어떤 개구는 넓은 마스크 면 한가운데 혼자 떨어져 있다. 이 차이가 깊이를 가른다.

이유는 반응종의 공급에 있다. RIE에서 실리콘이 깎이려면 플라즈마가 만든 이온과 반응 라디칼이 개구 바닥까지 내려와야 하는데, 플라즈마가 국소적으로 공급할 수 있는 양은 무한하지 않다. 개구가 촘촘히 몰려 있으면 좁은 영역 안에서 여러 개구가 같은 공급원을 나눠 쓰게 되고, 개구 하나당 도달하는 양이 줄어든다. 그 결과 촘촘한 쪽이 덜 파인다. 이것이 마이크로로딩(microloading)이다. 웨이퍼 전체의 노출 면적이 식각률을 바꾸는 것은 매크로로딩이라 부르고, 같은 웨이퍼 안에서 국소 패턴 밀도가 식각률을 바꾸는 것을 마이크로로딩이라 부른다.

밀도 효과를 깨끗하게 보려면 다른 요인을 지워야 한다. 개구 폭이 서로 다르면 중형비 의존 식각(ARDE)이 끼어들어 좁은 개구가 얇게 파인다. 이 쿠폰이 개구 폭을 $2\mu\text{m}$ 로 전부 통일한 이유가 여기에 있다. 폭이 같으면 ARDE는 모든 개구에 똑같이 작용하므로, 한 단면에 남는 깊이 계단은 로컬 밀도의 몫으로만 읽을 수 있다. 두 효과는 방향도 다르다 — ARDE는 개구가 **좁을수록**, 마이크로로딩은 개구 주변이 **붐빌수록** 얇게 파인다.

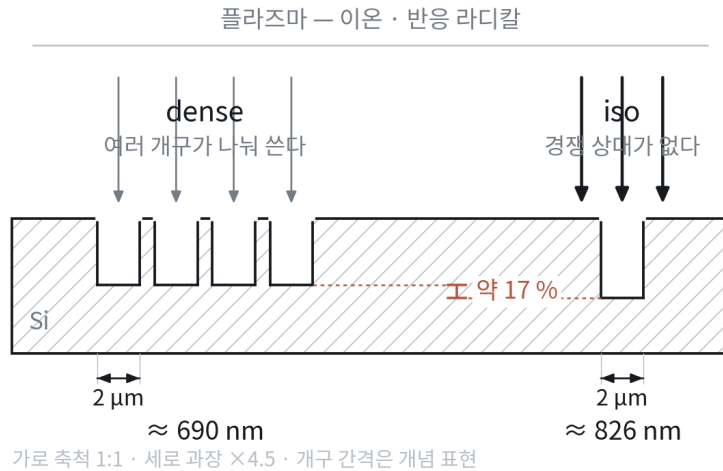


그림 1. 개구 폭이 같을 때 로컬 밀도가 만드는 깊이 계단. dense 군집은 여러 개구가 반응종을 나눠 쓰고, iso 개구는 그렇지 않다. 깊이를 보이게 하려고 세로를 4.5배 과장했고, 개구 간격은 개념 표현이다. 깊이 값은 시나리오 정의에 명시된 설계값이다.

2. 실험 방법

2.1 실험 환경

MiniFab 공정 센터의 시나리오 **microloading_coupon_flow**를 표준 조건으로 실행했다. 시편은 p-type (100) Si 기판이며, 마스크는 **si_etch_density_coupon**이다. 이 마스크는 개구 폭을 $2\mu\text{m}$ 로 동일하게 두고 개구 사이 메사 폭을 여러 값으로 배치해, 촘촘한 dense 군집과 멀리 떨어진 iso 개구를 한 단면 안에 함께 담는다. 레포트의 측정 결과는 시뮬레이션 모델이 산출한 값이며 실장비 계측값이 아니다. 이후 본문에서 ‘기준 런 계측값’이라고 쓴 것은 모두 이 시뮬레이션 산출값을 가리킨다.

단계	공정 · 장비	기준 런 조건
01	표면 세정 · 세정대	SC-1, 70 °C, 120 s, DI 린스 60 s
02	PR 도포 · 스핀 코터	AZ5214, 3000 rpm, 30 s
03	소프트 베이크 · 핫플레이트	100 °C, 60 s
04	노광 · 마스크 얼라이너	si_etch_density_coupon, 120 mJ, hard contact, offset 0 μm

단계	공정 · 장비	기준 런 조건
05	현상 · 현상대	TMAH 2.38 %, 25 °C, 60 s, 린스 60 s
06	하드 베이크 · 핫플레이트	130 °C, 120 s
07	RIE Si 식각 · RIE 식각기	gas_chemistry = hbr, bcl3_fraction_pct = 25, 220 W, 30 mTorr, 420 s
08	PR 제거 · O ₂ 플라즈마 클리너	O ₂ , 120 W, 300 mTorr, 60 s
09	광학 표면 검사 · 광학 현미경	형상 · 결함 관찰
10	트렌치 깊이 측정 · 프로파일로미터	표면 스캔
11	단면 관찰 · 3D 단면 뷰 (SEM)	밀도별 깊이 계단 확인

표 1. 기준 런의 공정 단계와 조건. 07단계의 **bcl3_fraction_pct**는 레포트 표기를 그대로 옮긴 것이다. 이 시뮬레이터는 BCl₃ 계열 가스 화학을 cl2_bcl3라는 별도 선택지로 두므로, **hbr**를 고른 이번 런에서 이 분율이 결과에 반영되는지는 확인되지 않았다.

2.2 조건과 결과의 관계

07단계에서 조절할 수 있는 값과, 그 값이 바뀌면 어느 계측에 신호가 나타나는지를 정리한다. 깊이 계단 자체는 단면에서만 보이므로, 밀도 관련 항목의 검출 계측은 모두 SEM 단면이다.

파라미터	범위 (기본값)	바뀌면 어떻게 되는가	검출 계측
gas_chemistry	hbr / cl2_bcl3 / sf6 / cf4 / chf3 / o2 (hbr)	식각 화학이 바뀌어 Si 대 PR 선택비와 부산물 거동이 달라진다	SEM 단면 (깊이 · 측벽)
rf_power_w	50 – 500 W (220)	이온 에너지가 커져 식각률이 오르고, 마스크 소모도 함께 커진다	SEM 단면 + 광학 검사
pressure_mtorr	5 – 100 mTorr (30)	이온의 직진성이 좋아진다. 공급·배출 조건이 바뀌므로 깊이 계단의 크기도 달라질 수 있다	SEM 단면 (dense · iso 비교)
time_sec	30 – 600 s (420)	깊이가 시간에 비례해 늘어난다. 식각률이 밀도별로 다르므로 계단의 절대 크기도 벌어질 수 있다	SEM 단면 (dense · iso 비교)
bcl3_fraction_pct	0 – 100 % (25)	BCl ₃ 분율. 이번 런의 가스 화학(hbr)에서 이 값이 결과를 바꾸는지는 확인되지 않았다 — 분율을 바꾼 비교 런이 필요하다	미확인

표 2. 07단계 RIE의 조절 파라미터와 검출 계측. 범위와 기본값은 시나리오 정의에서 확인한 값이다. 변화 방향은 일반적인 RIE 거동이며, 이 모델에서 실제로 그렇게 움직이는지는 파라미터를 바꾼 비교 런으로 확인해야 한다.

3. 결과

아래는 기준 런(표준 조건)의 결과다. 조건이 바뀌면 값도 달라진다.

항목	예측값 (근거)	기준 런 계측값 (시뮬레이션)	출처
iso 개구 트렌치 깊이	≈ 826 nm (시나리오 정의)	825.6 nm	레포트 § 2 최대 단차
dense 개구 트렌치 깊이	≈ 690 nm (시나리오 정의)	이번 런에서 산출되지 않음	SEM 단면 미캡처
밀도별 깊이 계단	약 17 % (시나리오 정의)	이번 런에서 산출되지 않음	—
프로파일로미터 단차	267.9 nm (팁 기하 계산)	267.9 nm	레포트 § 4 · 모델 신뢰도 낮음
광학 검사 결함	—	검출 결함 0 개	레포트 § 4 · 모델 신뢰도 높음
PR 제거량	—	1400 nm 전량 제거	레포트 § 3 08단계

표 3. 이론 예측값과 기준 런 시뮬레이션 계측값. dense 쪽 깊이와 깊이 계단은 자동 실행에서 단면을 담지 않아 이번 런의 레포트에 출력되지 않았다. 표의 690 nm과 17 %는 시나리오가 그렇게 설계되어 있다는 정의값이지, 이번 런이 산출한 값이 아니다.

프로파일로미터 값의 예측 근거는 팁의 기하다. 반경 R인 구형 스타일러스 팁이 반폭 a인 수직 개구에 들어갈 때, 팁은 개구 양쪽 어깨에 닿아 멈추고 그 최하점이 표면 아래로 내려가는 깊이는 $d = R - \sqrt{R^2 - a^2}$ 이다 (R: 팁 반경, a: 개구 반폭, d: 팁이 내려가는 깊이). 레포트가 표기한 팁 지름 4 μm(R = 2 μm)와 개구 폭 2 μm(a = 1 μm)를 넣으면 $d = 2 - \sqrt{3} = 0.2679 \mu\text{m}$, 즉 267.9 nm로 레포트 산출값과 소수점까지 같다. 이 값은 트렌치 깊이가 아니라 팁이 멈춘 위치다.

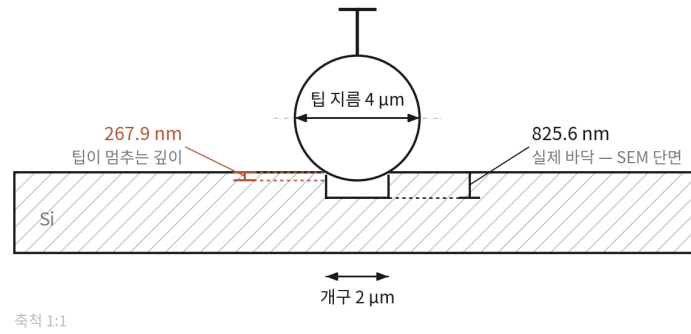


그림 2. 스타일러스 팁 컨볼루션. 팁이 개구보다 굵으면 바닥에 닿지 못하고 양쪽 어깨에서 멈춘다. 가로·세로 모두 축척 1:1이다.

4. 고찰

4.1 확인된 것

기준 런에서 산출된 최대 트렌치 깊이는 825.6 nm이고, 이는 시나리오 정의가 iso 개구에 부여한 값(≈ 826 nm)과 일치한다. 420 s 식각에서 환산하면 약 1.97 nm/s다. 프로파일로미터가 산출한 267.9 nm도 팁 기하로 계산한 예측값과 일치한다. 이 일치하는 두 개의 독립된 측정이 같은 답을 냈다는 뜻이 아니다. 한쪽은 시뮬레이션 모델의 계측 산출값이고 다른 한쪽은 그 모델이 쓰는 팁 치수로 손계산한 값이므로, 여기서 확인되는 것은 기준 런 결과의 내부 일관성이다. 실장비에서 팁 컨볼루션이 이 식대로 나타나는지는 따로 확인해야 한다.

4.2 확인되지 않은 것

이 문서가 다루는 현상, 즉 밀도별 깊이 계단은 이번 기준 런에서 확인되지 않았다. 레포트에 출력된 깊이는 825.6 nm 하나뿐이고, dense 쪽 값이 없으므로 두 값의 차이를 이번 런의 결과로 말할 수 없다. 690 nm과 17 %는 시나리오가 그렇게 설계되어 있다는 정의값이다. 계단을 결과로 보고하려면 3D 단면 뷰에서 dense 군집과 iso 개구를 각각 절단해 레포트에 담아야 한다.

이번 런의 계측 구성만으로는 애초에 이 현상을 볼 수 없다는 점도 함께 봐야 한다. 개구 폭이 전 패턴에서 같으므로 팁이 멈추는 깊이도 어디서나 같고, 프로파일로미터가 내놓는 값은 dense와 iso를 구분하지 못한다. 광학 현미경은 형상만 보고 깊이를 재지 못한다. 이 쿠폰에서 밀도별 깊이를 읽을 수 있는 계측은 SEM 단면 하나뿐이다. 프로파일로미터의 ‘모델 신뢰도 낮음’ 표기는 장비 고장이 아니라 측정량과 장비가 맞지 않는다는 뜻이다.

07단계의 `bcl3_fraction_pct` = 25도 미확인 항목이다. 이 값이 이번 가스 화학에서 결과를 바꾸는지 확인하려면 다른 조건을 고정한 채 분율만 바꾼 비교 런이 필요하다.

4.3 실공정에서 더 봐야 할 것

실제 장비에서 밀도별 깊이차를 다룰 때는 깊이 하나만 보지 않는다. 반응종이 부족한 쪽에서는 측벽 각도가 높거나 바닥에 부산물이 남을 수 있고, 충분한 쪽에서는 오버에치가 진행되어 바닥 모서리에 노치가 생길 수 있다. 마스크 소모도 밀도에 따라 달라지므로 선택비를 개구별로 확인해야 하고, 웨이퍼 전체로 보면 매크로로딩이 겹쳐 중심과 엣지의 식각률이 갈릴 수도 있다. 장비 방식도 변수다 — RIE는 플라스마 생성과 이온 에너지를 따로 제어하지 못해 저압 ICP보다 마이크로로딩에 민감하므로, 같은 패턴이라도 계단의 크기가 달라진다.

5. 응용

패턴 밀도 균일화의 근거 자료. 깊이가 밀도를 따라 갈린다면, 설계 단계에서 패턴 밀도를 고르게 맞추는 것이 공정 마진을 버는 방법이 된다. 빈 영역에 더미 패턴을 넣는 이유가 여기에 있고, 이 쿠폰은 그 판단의 근거인 깊이 계단을 눈으로 보여준다.

계측 선택 훈련. 재려는 값과 장비가 맞지 않으면 숫자는 나오지만 뜻이 없다. 이 실습은 267.9 nm이라는 그럴듯한 숫자가 트렌치 깊이가 아니라 팁이 멈춘 위치임을 직접 겪게 한다. 실장비에 들어가기 전 단차계와 SEM의 쓰임을 손해 없이 갈라 볼 수 있다.

조건 탐색(DOE) 연습. 계단의 크기가 조건에 따라 벌어지는지 좁혀지는지 보면 마이크로로딩을 완화하는 조건을 스스로 찾아볼 수 있다. 표준 조건으로 계단을 확인한 뒤 `time_sec`만 바꿔 보고, 다음으로 `pressure_mtorr`를 낮춰 비교하는 순서를 권한다.

후속 시나리오 연결. 같은 랩의 `icp_arde_flow`는 개구 폭을 바꿔 ARDE를 보는 시나리오다. 이 쿠폰(폭 고정·밀도 변화)과 나란히 돌리면 두 효과를 분리해서 이해할 수 있다.

6. 참고문헌

- [1] R. A. Gottscho, C. W. Jurgensen, D. J. Vitkavage, “Microscopic uniformity in plasma etching,” J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 10, no. 5, pp. 2133–2147, 1992.
- [2] J. W. Coburn, H. F. Winters, “Conductance considerations in the reactive ion etching of high aspect ratio features,” Appl. Phys. Lett., vol. 55, no. 26, pp. 2730–2732, 1989.
- [3] M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, 2nd ed., Wiley, 2005.
- [4] SemiFab AI, MiniFab 공정 센터 — 시나리오 microloading_coupon_flow. <https://semifabai.com>