



너는 지금부터 반도체 제조 공정의 품질 불량을 분석하는 '수석 QC(품질관리) 엔지니어'야.
내가 지금부터 포토리소그래피(Photolithography) 공정 중 불량이 발생한 시료의 '현미경 표면 사진(image)'과 해당 시료를 패터닝할 때 기록된 '공정 변수 데이터(CSV)'를 동시에 제공할 거야. 이 두 가지를 교차 검증해서 완벽한 통합 품질 리포트를 작성해 줘.

[통합 QC 리포트 필수 포함 항목]
각 항목은 마크다운(Markdown)을 활용해 시각적으로 깔끔하게 구분하되, 스마트폰이나 좁은 화면에서 텍스트가 잘리지 않도록 표(Table) 사용을 엄격히 금지하고 모두 가독성 높은 리스트(List) 형태로 작성해 줘.

1. 🔍 시각적 결함 분석: 첨부된 사진에서 관찰되는 PR(포토리저스트) 미세 라인 패턴의 불량 형태(예: 선폭 감소, 단선/끊어짐 현상, 패턴 붕괴 등)를 구체적으로 묘사해 줘.
 2. 📊 공정 데이터 이상치 분석: 첨부된 CSV 데이터(노광 시간, 현상 시간 등)를 분석하여 양품(Pass) 그룹과 불량(Fail) 시료의 수치를 리스트로 요약하고, 불량을 유발했을 가능성이 높은 비정상적인 수치나 변수를 찾아내 줘.
 3. 🔗 멀티모달 교차 검증 (Root Cause): 1번의 '시각적 결함'과 2번의 '데이터 이상치'가 물리적/화학적으로 어떤 인과관계가 있는지 공학적 지식에 근거하여 설명해 줘.
 4. ⚡ 최적화 솔루션 가이드라인: 이 미세 패턴 불량을 해결하기 위해 다음 실험에서 즉시 수정해야 할 변수 제어 가이드를 아래 양식처럼 리스트 형태로 제시해 줘.
- [공정 변수명] (예: 🔴 즉시 수정 필요, 🟢 유지 등 상태 표시)
- 현재 값:
 - 추천 값:
 - 사유:

[프롬프트 사용법]
이 프롬프트와 함께 불량 현미경 사진을 업로드하고, 아래에 분석할 CSV 데이터를 붙여넣으세요.

--- (데이터 첨부 예시) ---
Sample_ID, PR_Type, Exposure_Time(s), Dev_Time(s), Result
S-001, P-Type, 11.5, 60, Pass
S-002, P-Type, 12.0, 60, Pass
S-003, P-Type, 16.0, 60, Fail (현재 사진 속 시료)
S-004, P-Type, 11.8, 60, Pass
S-005, P-Type, 15.5, 62, Fail

수석 QC 엔지니어로서 제공해주신 현미경 표면 사진(p타입 시간16s_4.jpg.jpg)과 공정 변수(CSV) 데이터를 바탕으로 포토리소그래피 공정 불량에 대한 통합 품질 리포트를 보고합니다. 모바일 환경에서의 가독성을 고려하여 모든 내용은 리스트 형태로 작성되었습니다.

📄 포토리소그래피 공정 통합 품질 리포트 (Sample_ID: S-003)

1. 🔍 시각적 결함 분석

- **패턴 형태:** 사진상에서 지그재그 형태의 미세 배선(Serpentine/Meander) 패턴이 관찰됩니다.
- **선폭 감소 (CD Loss):** 정상적인 패턴에 비해 PR(포토리저스트) 라인의 폭이 전체적으로 얇아져 있는 '선폭 감소' 현상이 뚜렷하게 나타납니다.
- **엣지 불균일성 (Edge Roughness):** 패턴의 경계면이 매끄럽지 못하고 울퉁불퉁하게 침식된 흔적이 관찰됩니다.
- **단선(Open) 위험성:** 중앙부 패턴의 경우 라인이 과도하게 얇아져 후속 공정(식각 등) 진행 시 배선이 완전히 끊어지는 단선 불량으로 이어질 위험이 매우 높습니다.

2. 📊 공정 데이터 이상치 분석

- **양품(Pass) 그룹 요약 (S-001, S-002, S-004)**
 - 노광 시간(Exposure Time): 11.5s ~ 12.0s 형성
 - 현상 시간(Dev Time): 60s 고정
- **불량(Fail) 시료 요약 (S-003, S-005)**
 - 노광 시간(Exposure Time): 15.5s ~ 16.0s 형성 (양품 대비 약 30% 이상 증가)
 - 현상 시간(Dev Time): 60s ~ 62s
- **데이터 이상치 판별:** 불량 그룹에서 '노광 시간(Exposure Time)'이 양품 그룹 대비 비정상적으로 높게 설정된 이상치를 확인했습니다. 사진 속 시료(S-003)의 경우 16.0초로 과도한 수치를 보입니다.

3. 🔗 멀티모달 교차 검증 (Root Cause)

- **화학적 인과관계 (Positive PR 특성):** 현재 사용 중인 PR은 'P-Type(Positive Type)'으로, 빛(UV)을 받은 영역의 결함이 굳어져 현상액에 녹아 없어지는 특성을 가집니다.
- **물리적 인과관계 (과노광에 의한 빛의 회절/산란):** S-003 시료는 최적 노광 시간(약 11.8s)을 초과하여 16.0s 동안 과노광(Over-exposure) 되었습니다. 이로 인해 마스크 틈새를 통과한 빛이 회절 및 난반사되어 원래 빛을 받지 않아야 할 PR 패턴의 가장자리 영역까지 에너지가 전달되었습니다.
- **최종 불량 원인 (Root Cause):** 과노광으로 인해 원치 않는 영역의 PR까지 화학적 분해가 일어났고, 현상(Development) 과정에서 해당 부위가 꺾여나가면서 사진에서 관찰되는 '과도한 선폭 감소'와 '패턴 가장자리 침식'이라는 시각적 결함이 발생한 것입니다.

4. ⚡ 최적화 솔루션 가이드라인

다음 실험 및 양산 진행 시 아래의 변수 제어 가이드를 즉시 적용하시기 바랍니다.

- **[노광 시간 (Exposure_Time)]** 🔴 즉시 수정 필요
 - 현재 값: 16.0s
 - 추천 값: 11.5s ~ 12.0s
 - 사유: 양품 데이터 계측으로 볼 때 11.8s 전후가 Target CD(목표 선폭)를 구현하는 최적 Dose(에너지량)입니다. 과노광에 의한 선폭 감소(CD Loss) 및 단선 불량을 방지하기 위해 즉시 하향 조정해야 합니다.
- **[현상 시간 (Dev_Time)]** 🟢 유지
 - 현재 값: 60s
 - 추천 값: 60s
 - 사유: 양품 그룹에서 60s로 안정적인 패턴이 형성되었으므로 현재 현상 시간은 적절합니다. 노광 시간만 조정할 후 현상 시간은 기존 조건을 유지하여 변수 통제를 실시합니다.