

차세대 반도체 공정용 고정밀 건식 세정(Dry Cleaning)

문서번호 CRSM-AI-2026-AUTO

작성일 2026-06-03

작성 Cressem AI 시스템 (자동 생성)

보안등급 사내 비밀 (Confidential)

버전 v1.0

목 차

차세대 반도체 공정용 고정밀 건식 세정(Dry Cleaning) 기술 심층 분석 보고서	3
개요/배경	3
건식 세정의 핵심 메커니즘 분석	4
주요 건식 세정 기술 유형 및 특성	5
초임계 유체(Supercritical Fluid) 세정 기술 심층 연구	7
차세대 패키징(HBM/2.5D) 적용 사례 및 효과	9
건식 세정 공정의 기술적 난제 및 해결 방안	11
결론 및 시사점	12

차세대 반도체 공정용 고정밀 건식 세정(Dry Cleaning) 기술 심층 분석 보고서

반도체 미세화에 따른 습식 세정의 한계를 극복하기 위한 건식 세정 기술의 메커니즘, 유형 및 산업적 적용 사례를 심도 있게 분석합니다. 특히 초임계 유체 및 고압 기체 분사 기술을 중심으로 차세대 패키징 공정에 최적화된 솔루션을 제안합니다.

개요/배경

반도체 제조 공정이 나노미터(nm) 단위의 초미세 공정으로 진입함에 따라, 웨이퍼 표면의 오염물질(Contamination) 제어는 단순한 품질 관리를 넘어 수율(Yield)을 결정짓는 핵심 공정 기술로 자리 잡았습니다. 전통적으로 반도체 세정 공정은 화학 용액을 매개체로 사용하는 습식 세정(Wet Cleaning)이 주류를 이루어 왔습니다. 습식 세정은 용액의 화학적 반응성을 이용해 오염물을 제거하므로 처리 속도가 빠르고 비용 효율적이라는 장점이 있습니다. 그러나 공정 미세화가 가속화됨에 따라 기존 습식 세정 방식은 구조적, 물리적 한계에 직면하고 있으며, 이는 차세대 반도체 제조를 위한 건식 세정(Dry Cleaning) 기술 도입의 필연성을 뒷받침하고 있습니다.

습식 세정(Wet Cleaning) 기술의 한계점

습식 세정 방식이 가진 가장 치명적인 한계는 액체 매개체의 **표면장력(Surface Tension)**에 의한 물리적 제약입니다. 웨이퍼의 회로 패턴이 극도로 미세해지면서 패턴 사이의 간격(Gap)이 좁아짐에 따라, 세정액이 미세한 틈새 내부로 원활하게 침투하지 못하는 현상이 발생합니다.

1. **패턴 붕괴 및 휨(Pattern Collapse & Warpage):** 세정액이 미세 패턴 사이로 침투한 후, 건조(Drying) 과정에서 액체가 증발할 때 발생하는 강력한 모세관력(Capillary Force)은 미세한 구조물을 서로 끌어당겨 패턴을 쓰러뜨리거나(Collapse), 웨이퍼 자체의 물리적 변형인 휨(Warpage)을 유발합니다 [출처: gusdnr69.tistory.com]. 이는 특히 HBM(High Bandwidth Memory)과 같이 다단 적층 구조를 가진 고집적 패키징 공정에서 치명적인 결함으로 작용합니다.

2. **잔류물 및 재오염(Residue & Re-contamination):** 액체 상태의 세정액은 미세 패턴 내부에 갇히기 쉬우며, 건조 후에도 용질이 결정화되어 잔류물(Residue)을 남길 수 있습니다. 이러한 잔류물은 후속 공정에서 전기적 단락(Short)이나 신호 간섭을 일으키는 불량률의 원인이 됩니다.

3. **화학적 손상(Chemical Damage):** 강력한 화학 용액을 사용하는 습식 세정은 오염물질을 효과적으로 제거할 수 있으나, 동시에 제거되지 말아야 할 미세 회로 패턴이나 금속 배선(Metal Line)의 표면을 식각(Etching)하거나 손상시킬 위험이 상존합니다.

건식 세정(Dry Cleaning) 기술 도입의 필연성

반도체 산업의 패러다임이 전공정의 미세화를 넘어 HBM, 2.5D/3D 패키징과 같은 후공정(Advanced Packaging)의 고도화로 이동함에 따라, 액체 매개체를 배제한 건식 세정 기술의 중요성이 급격히 증대되고 있습니다. 건식 세정은 고압 가스, 레이저, 또는 초임계 유체(Supercritical Fluid)와 같은 비액체 매체를 사용하여 오염물을 제거하는 방식으로, 다음과 같은 기술적 우위를 제공합니다.

- **미세 패턴 보호 및 구조적 안정성 확보:** 건식 세정은 액체의 표면장력 문제를 근본적으로 해결할 수 있습니다. 특히 초임계 이산화탄소(scCO₂)와 같은 매체를 사용할 경우, 표면장력이 '0'에 수렴하므로 미세한 틈새(High Aspect Ratio 구조) 내부로의 침투력이 극대화되며, 건조 시 발생하는 모세관력에 의한 패턴 붕괴 위험이 거의 없습니다 [출처: jaenung.net].

- **고정밀 오염물 제거 능력:** 레이저 다이싱(Laser Dicing) 후 발생하는 파티클성 이물질이나, 미세한 틈새에 박힌 유기물 오염물질을 물리적/화학적 타격력을 통해 정밀하게 제거할 수 있습니다 [출처: KR20240108984A]. 이는 기존 습식 세정으로는 도달하기 어려웠던 영역의 청정도를 보장합니다.

- **차세대 패키징 공정과의 적합성:** HBM과 같이 TSV(Through Silicon Via)와 Micro Bump가 복잡하게 배치된 구조에서는 기존의 방식으로는 물리적 손상 없이 오염물질만 선택적으로 제거하는 것이 불가능에 가깝습니다. 따라서 미세 간극 침투력과 구조물 보호 능력이 뛰어난 건식 세정 솔루션은 차세대 반도체 제조 라인의 필수 요소로 자리 잡고 있습니다.

결론적으로, 반도체 소자의 고집적화 및 미세화에 따른 구조적 한계를 극복하기 위해서는 기존 습식 세정의 물리적 한계를 뛰어넘는 고정밀 건식 세정 기술의 확보가 필수적입니다. 본 보고서에서는 이러한 기술적 배경을 바탕으로 건식 세정의 핵심 메커니즘과 최신 기술 유형을 심층적으로 분석하고자 합니다.

건식 세정의 핵심 메커니즘 분석

반도체 건식 세정(Dry Cleaning)은 액체 매체를 사용하지 않고 기체, 플라즈마, 또는 초임계 유체와 같은 비액체 상태의 매체를 이용하여 웨이퍼 표면 및 미세 구조 내의 오염물질을 제거하는 공정입니다 [출처: gusdnr69.tistory.com]. 건식 세정의 핵심은 오염물질과 기판 사이의 결합력을 약화시키고, 이를 외부로 탈착(Desorption)시키는 데 있으며, 이는 크게 **물리적 충격(Physical Impact)**과 **화학적 반응(Chemical Reaction)**이라는 두 가지 상호 보완적인 메커니즘을 통해 수행됩니다.

1. 물리적 충격 메커니즘: 운동 에너지에 의한 탈착 원리

물리적 메커니즘은 세정 매체가 가진 운동 에너지(Kinetic Energy)를 이용하여 오염물질을 물리적으로 타격하거나 밀어내는 방식입니다. 이는 주로 고압 가스(High-pressure Gas)나 입자 형태의 매체를 활용할 때 극대화됩니다.

1.1. 운동량 전달 및 충격력(Impulse)의 작용

고압의 가스(예: N₂, CO₂)를 미세 노즐을 통해 분사할 때, 가스 분자는 초고속으로 이동하며 오염물질 표면에 직접적인 충격력을 가합니다. 이때 가스 분자가 오염물질과 충돌하며 전달하는 운동량($P = mv$)은 오염물질과 웨이퍼 표면 사이의 반데르발스 힘(van der Waals force) 및 정전기적 인력을 극복할 수 있는 충분한 에너지를 제공해야 합니다. 특히 미세 패턴(Pattern) 내부의 입자를 제거할 때는 가스의 유동성(Fluidity)이 중요하며, 가스가 좁은 틈새로 침투하여 압력 차이(Pressure Differential)를 형성함으로써 입자를 밀어내는 'Lift-off' 효과가 발생합니다 [출처: m.blog.naver.com].

1.2. 표면 에너지(Surface Energy)와 접촉각(Contact Angle)의 제어

물리적 세정 효율은 웨이퍼 표면의 상태, 즉 표면 에너지에 의해 결정됩니다. 건식 세정 과정에서 가스나 플라즈마는 표면의 화학적 결합을 끊어 표면 에너지를 변화시킵니다. 표면 에너지가 높아지면 오염물질과의 부착력이 상대적으로 약화되어, 동일한 물리적 충격량으로도 훨씬 쉽게 오염물질을 탈착시킬 수 있습니다. 이는 건식 세정이 습식 세정에서 발생하는 표면 장력(Surface Tension)에 의한 패턴 붕괴(Pattern Collapse) 문제를 원천적으로 차단할 수 있는 근거가 됩니다.

2. 화학적 반응 메커니즘: 분자 수준의 용해 및 분해 원리

화학적 메커니즘은 세정 매체가 오염물질과 직접적인 화학 반응을 일으켜, 오염물질을 휘발성이 강한 가스 상태로 변환하거나 용해 가능한 형태로 분해하는 방식입니다.

2.1. 화학적 용해(Chemical Dissolution) 및 휘발(Volatilization)

특정 화학 기체나 플라즈마 내의 반응성 종(Reactive Species)은 오염물질(유기물, 금속 이온 등)과 결합하여 새로운 화합물을 형성합니다. 예를 들어, 유기물 오염(Organic Contamination)의 경우, 산소(O₂)나 불소(F

기반의 플라즈마를 이용하면 유기 탄소 결합을 끊어 CO₂나 H₂O와 같은 휘발성 가스로 변환시킵니다. 이렇게 생성된 가스 생성물(Volatile By-products)은 기판에 잔류하지 않고 즉시 배기(Exhaust)됨으로써 재부착을 방지합니다.

2.2. 반응성 이온 스퍼터링(Reactive Ion Sputtering)

플라즈마 건식 세정에서 핵심적인 기법 중 하나는 반응성 이온 스퍼터링입니다. 플라즈마 상태에서 가속된 이온들이 웨이퍼 표면에 충돌할 때, 단순한 물리적 타격뿐만 아니라 화학적 결합을 끊는 반응이 동시에 일어납니다. 이 과정은 미세한 금속 잔류물이나 단단하게 고착된 산화막(Oxide layer)을 제거하는 데 매우 효과적입니다.

3. 물리·화학적 메커니즘의 복합 작용 비교 분석

건식 세정의 효율은 물리적 힘과 화학적 반응이 얼마나 정밀하게 결합되느냐에 달려 있습니다. 아래 표는 두 메커니즘의 주요 특성을 비교한 것입니다.

구분	물리적 충격 메커니즘 (Physical)	화학적 반응 메커니즘 (Chemical)
주요 동력	가스 분자의 운동 에너지, 압력 차	화학적 결합 에너지, 반응성 종(Radical)
주요 대상	입자(Particle), 거대 이물질	유기물(Organic), 미세 금속, 자연 산화막
작동 원리	충격량(Impulse)을 통한 탈착	분자 구조 분해 및 휘발성 화합물 생성
장점	패턴 손상 위험이 적고 속도가 빠름	미세 틈새(High Aspect Ratio) 침투력 우수
한계점	초미세 오염물(Sub-micron) 제거 한계	과도한 반응 시 기판 손상(Etching) 위험
대표 기술	고압 가스 분사, 초음파 건식 세정	플라즈마 세정, 초임계 유체 세정

4. 메커니즘의 통합: 고난도 패키징 공정으로의 확장

최근 HBM(High Bandwidth Memory)과 같은 고단 적층 공정에서는 단순한 물리적 타격만으로는 해결할 수 없는 기술적 난제가 존재합니다. TSV(Through Silicon Via) 내부나 Micro-bump 사이의 극미세 간극(Gap)은 물리적 충격이 도달하기 어려운 'Shadow Zone'을 형성하기 때문입니다 [출처: 매뉴얼_HBMAAdvancedInspectionSyst_20260509_001.pdf].

이러한 한계를 극복하기 위해 등장한 것이 초임계 유체(Supercritical Fluid) 기술입니다. 초임계 상태의 매체는 기체의 확산성(Diffusivity)과 액체의 용해력(Solubility)을 동시에 보유하고 있습니다. 즉, 기체처럼 미세한 틈새로 빠르게 침투(Penetration)하여 [출처: www.jaenung.net], 오염물질을 용해(Dissolution)시킨 후, 압력을 낮추는 과정에서 발생하는 팽창(Expansion) 에너지를 통해 오염물질을 외부로 밀어내는 물리적 탈착을 유도합니다 [출처: www.jaenung.net]. 이는 물리적 메커니즘과 화학적 메커니즘이 완벽하게 통합된 형태의 차세대 건식 세정 모델이라 할 수 있습니다.

주요 건식 세정 기술 유형 및 특성

반도체 공정의 미세화가 가속화됨에 따라 기존 습식 세정(Wet Cleaning) 방식이 가진 물리적 한계, 즉 표면 장력(Surface Tension)에 의한 미세 패턴의 붕괴(Pattern Collapse)와 화학 약품 잔류 문제를 극복하기 위한 다양한 건식 세정(Dry Cleaning) 기술이 도입되고 있습니다. 건식 세정은 액체 매체 대신 기체, 플라즈마, 레이저 또는 초임계 유체와 같은 비액체 매체를 사용하여 오염물질을 제거하는 기술을 통칭합니다 [출처:

gusdnr69.tistory.com]. 본 섹션에서는 현재 산업계에서 주목받고 있는 고압 가스 분사 기술, 레이저 기반 세정 기술, 그리고 차세대 솔루션인 초임계 유체 기술의 메커니즘과 특성을 심층 비교 분석합니다.

1. 고압 가스 분사 기술 (High-Pressure Gas Spraying)

고압 가스 분사 기술은 가장 직관적이고 물리적인 힘을 이용하는 건식 세정 방식입니다. 주로 고압의 CDA(Clean Dry Air) 또는 질소(N_2) 가스를 세정 챔버 내부로 분사하여 오염물질을 물리적으로 타격하여 제거하는 원리를 가집니다 [출처: m.blog.naver.com].

- **작동 메커니즘:** 고압으로 가속된 기체 분자가 웨이퍼 또는 PCB 표면에 충돌하면서 발생하는 운동 에너지를 통해 입자(Particle)를 표면으로부터 떼어냅니다. 특히 PCB 제조 공정에서는 납땜 후 잔류하는 플럭스(Flux)를 제거하거나 미세 불순물을 씻어내는 용도로 널리 사용됩니다 [출처: polejeong.tistory.com].
- **기술적 장점:** 설비 구성이 비교적 단순하며, 화학 용액을 사용하지 않으므로 화학적 부식(Corrosion) 위험이 낮습니다. 또한, 세정 후 잔류 액체가 없으므로 건조(Drying) 공정이 생략되거나 매우 간소화되어 전체 Tact Time을 단축할 수 있습니다.
- **한계점:** 물리적 타격력이 강할 경우 미세한 회로 패턴이나 얇은 막(Thin Film)에 구조적 손상을 줄 수 있습니다. 또한, 기체의 침투력이 액체에 비해 낮아 매우 좁은 간극(Gap) 사이에 박힌 오염물질을 제거하는 데에는 한계가 있습니다.

2. 레이저 기반 세정 기술 (Laser-based Cleaning)

레이저 세정은 빛의 에너지를 이용하여 특정 파장의 레이저 빔을 웨이퍼 표면에 조사함으로써 오염물질을 제거하는 고정밀 기술입니다. 최근에는 레이저 다이싱(Laser Dicing) 공정 이후 발생하는 부산물 및 파티클 제거를 위해 필수적으로 검토되고 있습니다 [출처: KR20240108984A].

- **작동 메커니즘:** 레이저 빔이 오염물질에 흡수될 때 발생하는 광열 효과(Photothermal Effect)를 이용합니다. 오염물질이 급격히 가열되어 승화(Sublimation)하거나 기화(Evaporation)되면서 표면에서 이탈하게 됩니다. 또는 광기계적 효과(Photomechanical Effect)를 통해 충격파를 발생시켜 이물을 제거하기도 합니다.
- **기술적 장점:** 비접촉식(Non-contact) 방식이므로 웨이퍼나 기판에 물리적 압력을 가하지 않아 손상 위험이 매우 낮습니다. 또한, 레이저의 초점(Focus)을 조절함으로써 매우 국소적인 영역만을 선택적으로 세정할 수 있어, 고정밀도가 요구되는 미세 패턴 공정에 매우 유리합니다.
- **한계점:** 레이저 에너지의 밀도 제어가 정밀하지 못할 경우, 열에 취약한 감광액(PR)이나 하부 박막에 열적 손상(Thermal Damage)을 입힐 수 있습니다. 또한, 대면적 웨이퍼를 스캐닝해야 하므로 공정 속도(Throughput) 확보를 위한 고출력/고속 스캐닝 기술이 요구됩니다.

3. 초임계 유체 세정 기술 (Supercritical Fluid Cleaning)

초임계 유체 세정은 액체의 용해력과 기체의 침투력을 동시에 갖춘 초임계 상태의 물질을 이용하는 가장 진보된 형태의 건식 세정 기술입니다. 특히 CO_2 를 초임계 상태로 만들어 사용하는 방식이 차세대 반도체 공정의 핵심으로 부상하고 있습니다 [출처: jaenung.net].

- **작동 메커니즘:** 물질이 임계 온도와 임계 압력을 넘어 초임계 상태(Supercritical State)에 도달하면, 상변화 없이 액체와 기체의 중간적 특성을 나타냅니다. 초임계 CO_2 는 다음과 같은 3단계 메커니즘을 통해 오염을 제거합니다 [출처: jaenung.net].

1. **침투(Penetration):** 기체와 같은 낮은 점도와 높은 확산 계수를 바탕으로, 미세한 TSV(Through Silicon Via) 내부나 고단 적층된 HBM의 좁은 틈새까지 깊숙이 침투합니다.

2. **용해(Dissolution):** 액체와 유사한 밀도를 바탕으로 유기물 오염물질이나 잔류 플럭스를 효과적으로 녹여냅니다.

3. **팽창(Expansion):** 압력을 서서히 낮추면 초임계 유체가 기체로 상변화하며 팽창하는데, 이때 오염물질을 표면 밖으로 밀어내는 효과를 발생시킵니다.

- **기술적 장점:** 표면 장력이 '0'에 가깝기 때문에 미세 패턴의 붕괴(Pattern Collapse) 현상을 근본적으로 차단할 수 있습니다. 이는 HBM과 같은 초미세 적층 구조의 세정에서 독보적인 우위를 점하게 합니다.
- **한계점:** 초임계 상태를 유지하기 위한 고압 설비가 필요하며, 공정 제어(압력 및 온도 프로파일)가 매우 까다롭습니다. 또한, 시스템 구축 비용이 타 기술 대비 높습니다.

4. 기술 유형별 비교 분석 요약

위에서 살펴본 세 가지 주요 기술의 특성을 비교하면 다음과 같습니다.

비교 항목	고압 가스 분사 (Gas Spray)	레이저 세정 (Laser Cleaning)	초임계 유체 (Supercritical Fluid)
주요 매체	N ₂ , CDA (기체)	Laser Beam (광에너지)	초임계 CO ₂ (초임계 상태)
세정 원리	물리적 충격 (Kinetic Energy)	광열/광기계적 효과 (Thermal/Mechanical)	침투, 용해 및 팽창 (Mass Transfer)
침투력	낮음 (표면 위주)	중간 (국소 부위 정밀 제어)	매우 높음 (미세 틈새 가능)
패턴 손상 위험	높음 (물리적 충격)	중간 (열적 손상 주의)	매우 낮음 (표면 장력 없음)
주요 적용 분야	PCB 세정, 플럭스 제거	레이저 다이싱 후 이물 제거	HBM, TSV, 초미세 패턴 세정
공정 복잡도	낮음	중간	높음

결론적으로, 고압 가스 분사는 범용적인 오염 제거에 경제적이지만, 미세 공정에서는 레이저 세정이 정밀한 국소 제어 측면에서 강점을 가집니다. 그러나 HBM 및 2.5D/3D 패키징과 같이 극도로 미세한 간극(Gap) 내의 오염물질을 제거하면서도 패턴 손상을 방지해야 하는 차세대 공정에서는 초임계 유체 기술이 가장 유망한 솔루션으로 평가됩니다.

초임계 유체(Supercritical Fluid) 세정 기술 심층 연구

반도체 공정의 미세화가 가속화됨에 따라, 기존의 액체 기반 습식 세정(Wet Cleaning)이나 일반적인 가스 기반 건식 세정(Dry Cleaning)으로는 해결할 수 없는 '초미세 구조 내 오염물질 제거' 문제가 핵심 기술적 난제로 부상하였습니다. 특히 HBM(High Bandwidth Memory)과 같이 수천 개의 TSV(Through Silicon Via)와 마이크로 범프(Micro-bump)가 고밀도로 집적된 3D 적층 구조에서는, 액체의 높은 표면 장력(Surface Tension)으로 인해 세정액이 미세한 틈새(Gap) 내부로 침투하지 못하고 갇히거나, 건조 과정에서 액체가 증발하며 오염물질을 다시 표면에 고착시키는 '커피 얼룩 효과(Coffee-stain Effect)'가 발생하여 수율을 저하시키는 원인이 됩니다 [출처: 재능넷].

이러한 한계를 극복하기 위한 차세대 솔루션으로 주목받는 것이 바로 **초임계 이산화탄소(Supercritical CO₂) 세정 기술**입니다. 초임계 유체는 임계 온도(Critical Temperature, CO₂의 경우 약 31.1°C)와 임계 압력(Critical Pressure, 약 73.8 bar) 이상의 조건에서 액체와 기체의 특성을 동시에 갖는 상태를 의미합니다. 본 섹션에서는 초임계 CO₂가 어떻게 반도체 미세 구조 내의 오염물질을 완벽하게 제거하는지 그 삼단계 메커니즘을 심층적으로 분석합니다.

1. 초미세 구조 내 침투(Penetration) 메커니즘: 표면 장력 제로(Zero Surface Tension)의 구현

초임계 세정 기술의 가장 강력한 물리적 이점은 **표면 장력이 거의 0(Zero)에 수렴한다**는 점입니다. 일반적인 액체 세정제는 액체-기체 계면에서 발생하는 높은 표면 장력으로 인해, 수십 μm 이하의 미세한 TSV 내부나 Die-to-Die 간의 좁은 간극(Gap)으로 침투할 때 강력한 모세관 압력(Capillary Pressure)의 저항을 받습니다. 이 저항은 세정액이 구조물 내부로 들어가는 것을 막을 뿐만 아니라, 세정 후 건조 단계에서 액체가 기화할 때 구조적 변형(Warpage)을 일으키는 주된 요인이 됩니다.

반면, 초임계 상태의 CO_2 는 기체와 같은 낮은 점도(Viscosity)와 확산성(Diffusivity)을 가지면서도, 액체와 같은 높은 밀도(Density)를 유지합니다.

- **확산 성능 극대화:** 기체와 유사한 높은 확산 계수를 바탕으로, 복잡한 3D 적층 구조 내부의 아주 미세한 틈새까지 막힘없이 파고듭니다.
- **모세관 현상 배제:** 표면 장력이 존재하지 않기 때문에, 세정 매체가 미세 패턴 사이를 통과할 때 물리적 압력을 가하거나 패턴을 무너뜨리지 않고도 자유롭게 침투할 수 있습니다. 이는 HBM과 같은 고밀도 패키징 공정에서 구조적 안정성을 유지하며 세정을 수행할 수 있게 하는 핵심 기반이 됩니다.

2. 오염물질 용해(Solubilization) 메커니즘: 고밀도 매체를 통한 화학적 결합 파괴

침투가 완료된 후에는 초임계 CO_2 가 오염물질을 물리적으로 밀어내는 것을 넘어, 화학적으로 용해시키는 과정이 진행됩니다. 초임계 유체의 밀도는 압력 조절을 통해 액체에서 기체 사이의 범위 내에서 정밀하게 제어할 수 있으며, 이는 곧 **용해력(Solvency)의 직접적인 제어**를 의미합니다.

- **용해력 제어(Tunable Solvency):** 압력을 높이면 초임계 CO_2 의 밀도가 증가하며, 이에 따라 유기물(Organic Contaminants)이나 플럭스(Flux) 잔류물을 녹여내는 용해 능력이 비약적으로 상승합니다.
- **선택적 용해:** 특정 압력 및 온도 프로파일을 설정함으로써, 반도체 소자의 주요 회로 패턴이나 금속 배선(Metal Line)에는 영향을 주지 않으면서, 제거하고자 하는 특정 유기 오염물질만을 선택적으로 녹여낼 수 있습니다.
- **계면 에너지 최소화:** 초임계 상태에서는 오염물질과 세정 매체 사이의 계면 에너지가 극도로 낮아져, 고체 표면에 강하게 흡착된 미세 입자나 유기 박막을 효과적으로 분리(Delamination)하여 용액 내부로 끌어들이 수 있습니다.

3. 급격한 팽창(Expansion) 및 제거 메커니즘: 잔류물 없는 완벽한 건조

세정의 마지막 단계는 용해된 오염물질을 구조물 밖으로 배출하고 매체를 제거하는 과정입니다. 초임계 세정은 기존의 열풍 건조(Hot Air Drying)나 스핀 건조(Spin Drying) 방식이 가진 고질적인 문제를 원천적으로 차단합니다.

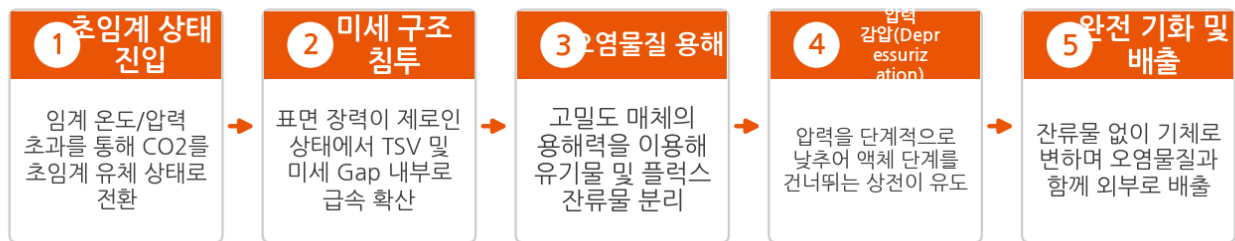
- **상전이 제어(Phase Transition Control):** 세정이 완료된 후 시스템의 압력을 서서히 낮추면, 초임계 상태의 CO_2 는 액체 단계를 거치지 않고 곧바로 기체 상태로 전이(Phase Transition)됩니다.
- **잔류물 제거(Residue-free):** 액체가 기체로 변하는 과정에서 발생하는 표면 장력이 없기 때문에, 용해되었던 오염물질이 다시 표면에 달라붙는 재부착(Re-deposition) 현상이 발생하지 않습니다. 또한, CO_2 는 휘발성이 매우 강하여 상온에서 완전히 기화되므로, 세정 후 웨이퍼 표면에 어떠한 세정액 잔류물(Residue)도 남기지 않습니다.
- **구조적 안정성 확보:** 액체 증발 시 발생하는 모세관력에 의한 물리적 스트레스가 없으므로, 초미세 패턴의 붕괴나 웨이퍼의 휨(Warping) 현상을 방지할 수 있어 공정 수율(Yield) 향상에 결정적인 기여를 합니다 [출처: 재능넷].

[요약] 초임계 CO_2 세정 공정의 물리적 특성 비교

특성 항목	일반 액체 세정 (Wet)	일반 가스 세정 (Dry)	초임계 CO_2 세정 (Supercritical)
표면 장력	높음 (침투 저항 발생)	거의 없음	제로 (Zero)에 수렴

침투력	미세 틈새 침투 제한적	매우 우수	매우 우수 (액체 밀도 기반)
용해 능력	화학 약품에 의존	매우 낮음	압력 조절로 정밀 제어 가능
건조 잔류물	발생 가능성 높음 (Water Mark 등)	없음	완벽히 없음 (Residue-free)
구조적 손상	건조 시 모세관력 위험	매우 낮음	최소화 (Mechanical Stress Zero)

초임계 CO2 세정 메커니즘 3단계 프로세스



차세대 패키징(HBM/2.5D) 적용 사례 및 효과

반도체 산업의 패러다임이 전공정(Front-end)의 미세화를 넘어 후공정(Back-end)의 고도화, 즉 어드밴스드 패키징(Advanced Packaging)으로 이동함에 따라 세정 기술의 역할 또한 근본적인 변화를 맞이하고 있습니다. 특히 HBM(High Bandwidth Memory)과 2.5D/3D 적층 구조는 수천 개의 미세한 전극(Micro-bump)과 고종횡비(High Aspect Ratio)를 가진 TSV(Through Silicon Via)를 포함하고 있어, 기존의 습식 세정(Wet Cleaning)으로는 도달할 수 없는 영역의 오염 제거가 필수적입니다. 본 섹션에서는 차세대 패키징 공정에서 건식 세정(Dry Cleaning) 기술이 어떻게 적용되고 있으며, 이것이 실제 수율(Yield) 및 제품 신뢰성에 어떠한 혁신적 효과를 제공하는지 심층 분석합니다.

1. HBM 적층 공정에서의 건식 세정 적용 및 필요성

HBM은 여러 개의 DRAM 다이(Die)를 수직으로 쌓아 올리는 고단 적층 구조를 가집니다. 이 과정에서 핵심이 되는 기술은 TSV를 통해 형성된 전극 간의 연결성과 적층 시 발생하는 물리적 정렬(Alignment)의 정확도입니다.

1.1. TSV 및 Micro-bump 오염 제어의 난제

HBM 제조 공정에서 TSV 공정 직후 또는 Die-to-Wafer(D2W) 본딩 단계 전에는 반드시 세정 공정이 수행되어야 합니다. TSV는 실리콘 웨이퍼를 수직으로 관통하는 매우 깊고 좁은 구멍(Via) 형태를 띠고 있어, 일반적인 습식 세정액의 표면장력(Surface Tension)으로 인해 미세 구멍 내부까지 세정액이 침투하기 어렵습니다. 세정액이 구멍 내부에서 빠져나오지 못하고 잔류할 경우, 후속 공정인 본딩(Bonding) 시 기포(Void)를 형성하거나 전기적 단락(Short)을 유발하는 치명적인 결함이 됩니다 [출처: fountyltech.com].

1.2. 건식 세정의 적용 메커니즘

건식 세정 기술, 특히 초임계 유체(Supercritical Fluid) 또는 고압 가스 분사 방식은 이러한 물리적 한계를 극복합니다.

- **표면장력 제로(Zero Surface Tension):** 초임계 CO₂와 같은 유체는 액체와 기체의 중간 성질을 가져 표면장력이 거의 없습니다. 이를 통해 TSV 내부의 미세한 틈새(Gap)까지 오염물질을 녹여내고 침투할 수 있습니다 [출처: jaenung.net].
- **잔류물(Residue) 제거:** 고압의 가스(CDA 등)를 활용한 물리적 타격 방식은 기판 표면의 미세 입자(Particle)를 효과적으로 탈락시킵니다 [출처: blog.naver.com/archi9878].

2. 2.5D/3D 패키징(CoWoS 등)에서의 적용 사례

TSMC의 CoWoS(Chip on Wafer on Substrate)와 같은 2.5D 패키징 기술은 로직 반도체와 HBM을 인터포저(Interposer) 위에 배치하는 복잡한 구조를 가집니다. 이 공정에서는 미세 회로 패턴의 밀도가 극도로 높기 때문에 세정 기술의 정밀도가 곧 패키지의 성능으로 직결됩니다.

2.1. 미세 패턴 내 플럭스(Flux) 및 유기물 제거

플립칩(Flip-chip) 본딩 공정 중 사용되는 납땜 플럭스(Solder Flux) 잔여물은 미세 회로 사이에서 절연 성능을 저하시키거나 부식을 유발하는 주요 원인입니다. 정밀 건식 세정기는 고압의 이산화탄소(CO₂) 또는 특수 가스를 사용하여 PCB 및 인터포저 상의 미세 회로 사이에 끼어 있는 플럭스 찌꺼기를 효과적으로 제거합니다 [출처: polejeong.tistory.com].

2.2. Die-to-Die 정렬 및 Warpage 관리와의 상관관계

건식 세정은 단순히 이물을 제거하는 것을 넘어, 후속 공정인 본딩의 신뢰성을 높이는 역할을 합니다. 세정 불량으로 인해 미세한 오염물이 잔류할 경우, 본딩 시 압력 불균형을 초래하여 Die의 휨(Warpage) 현상을 심화시키거나, Bump의 위치가 설계치에서 벗어나는 Misalignment 결함을 유발할 수 있습니다 [출처: 매뉴얼_HBMAAdvancedInspectionSyst_20260509_001.pdf].

3. 건식 세정 도입에 따른 공정 효율 및 수율 향상 효과

차세대 패키징 공정에 건식 세정 솔루션을 도입함으로써 얻을 수 있는 정량적·정성적 효과는 다음과 같습니다.

구분	습식 세정(Wet Cleaning)의 한계	건식 세정(Dry Cleaning)의 이점	기대 효과
침투력	높은 표면장력으로 미세 TSV 내부 침투 불가	초임계/고압 가스를 통한 미세 간극 침투	TSV 연결성(Connectivity) 확보
잔류물	세정액 건조 과정에서 워터마크(Water Mark) 발생	잔류 액체 없이 즉각적인 가스 팽창 제거	전기적 특성(Electrical Spec) 안정화
결함 유형	Bridge(Short), Void 발생 가능성 높음	미세 입자 및 유기물 정밀 제거	수율(Yield) 극대화
소자 손상	화학적 부식 및 물리적 충격 위험	정밀 제어된 물리적/화학적 메커니즘	패키지 신뢰성(Reliability) 향상

3.1. 수율(Yield) 향상 데이터 기반 분석

HBM과 같은 고단 적층 제품에서 세정 공정의 최적화는 수율 곡선을 결정짓는 핵심 변수입니다.

1. Missing Bump 방지: 세정 불량으로 인해 Bump 표면에 오염물이 잔류하면, 도포 공정 누락과 유사한 효과를 내어 특정 위치에 Bump가 형성되지 않거나 접합되지 않는 Missing Bump 결함이 발생합니다 [출처: 매뉴얼_HBMAAdvancedInspectionSyst_20260509_001.pdf]. 건식 세정은 이러한 도포/접합 전 단계의 표면 상태를 완벽하게 제어함으로써 Missing Bump 발생률을 획기적으로 낮춥니다.

2. **Bridge(Short) 결함 감소:** 인접한 Bump 간에 금속 연결이 발생하는 Bridge 현상은 Solder 과다 도포뿐만 아니라, 세정되지 않은 미세 파티클이 가교 역할을 할 때도 발생합니다 [출처: 매뉴얼_HBMAAdvancedInspectionSyst_20260509_001.pdf]. 건식 세정은 이러한 미세 파티클을 원천 차단하여 전기적 단락 사고를 예방합니다.

3.2. 결론적 가치: 고부가가치 패키징의 필수 기술

결론적으로, HBM4 및 그 이상의 차세대 메모리 공정에서 도입될 **Hybrid Bonding(구리 직접 접합)** 기술은 기존의 Bump 방식보다 훨씬 높은 수준의 표면 청정도를 요구합니다. 구리와 구리가 직접 맞닿아야 하는 공정 특성상, 아주 미세한 유기물이나 산화막(Oxide)조차 허용되지 않습니다. 따라서 건식 세정 기술은 단순한 보조 공정이 아닌, 차세대 반도체 공급망 내에서 수율을 결정짓는 '**대체 불가능한 핵심 공정 기술**'로 자리매김하고 있습니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM_20260509_001.pdf].

건식 세정 공정의 기술적 난제 및 해결 방안

건식 세정(Dry Cleaning) 기술은 기존 습식 세정(Wet Cleaning)이 가진 표면 장력에 의한 패턴 붕괴(Pattern Collapse) 문제를 해결하고, 초미세 구조 내의 오염물을 제거할 수 있는 혁신적인 솔루션으로 주목받고 있습니다. 그러나 물리적 충격이나 가스/유체의 흐름을 이용하는 특성상, 공정 과정에서 웨이퍼 및 미세 패턴에 치명적인 영향을 미칠 수 있는 기술적 난제들이 존재합니다. 본 섹션에서는 건식 세정 공정에서 발생하는 주요 문제점인 정전기 발생(ESD)과 물리적 손상(Physical Damage)을 중심으로, 이를 극복하기 위한 최신 기술적 해결 방안을 심도 있게 분석합니다.

1. 정전기 발생(ESD) 및 제어 기술

건식 세정은 액체 매체 대신 고압의 가스(N_2 , Ar)나 초임계 유체($scCO_2$)와 같은 비전도성 매체를 사용하기 때문에, 입자 간의 마찰이나 유체의 고속 흐름에 의해 발생하는 정전기(Static Electricity) 문제가 매우 심각합니다.

• 기술적 난제: 정전기적 흡착 및 소자 파괴

건식 세정 챔버 내에서 고속으로 분사되는 가스 입자와 웨이퍼 표면 사이의 마찰은 대전(Charging) 현상을 유발합니다. 이렇게 발생한 정전기는 두 가지 치명적인 문제를 일으킵니다. 첫째, **정전기적 흡착(Electrostatic Adsorption)** 현상으로 인해 제거되어야 할 오염물질(Particle)이 오히려 웨이퍼 표면에 더 강력하게 달라붙어 세정 효율을 급격히 저하시킵니다 [출처: fountyltech.com]. 둘째, 축적된 전하가 급격히 방전될 때 발생하는 **정전기 방전(ESD, Electrostatic Discharge)**은 반도체 소자의 게이트 절연막(Gate Oxide)을 파괴하거나 회로의 영구적인 전기적 결함을 초래하여 수율을 직접적으로 떨어뜨립니다.

• 해결 방안: ESD 방지 및 전하 중화 전략

이를 해결하기 위해 공정 장비 및 환경 측면에서 다각적인 대응이 이루어지고 있습니다.

- **이온화 장치(Ionizer) 통합:** 세정 챔버 내부에 고성능 이온 발생기(Ion Generator)를 설치하여, 대전된 입자를 중화할 수 있는 양이온(+)과 음이온(-)을 지속적으로 공급합니다. 이를 통해 표면 전위를 0V에 가깝게 유지함으로써 입자의 재부착을 방지합니다.

- **전도성 소재 및 접지(Grounding) 최적화:** 웨이퍼를 고정하는 척(Chuck)과 챔버 내부 구성품에 전도성이 높은 소재를 사용하고, 정교한 접지 설계를 통해 축적된 전하가 즉각적으로 배출될 수 있는 경로를 확보합니다.

- **가스 조성 제어:** 세정 가스에 미량의 전도성 첨가제를 혼합하거나, 상대적으로 전도성이 있는 가스 환경을 조성하여 정전기 축적을 억제하는 연구가 진행되고 있습니다.

2. 미세 패턴의 물리적 손상(Physical Damage) 방지

반도체 공정이 나노미터(nm) 단위로 미세화됨에 따라, 세정 시 가해지는 물리적 힘(Force)에 의한 패턴의 변형 및 파손은 공정의 성패를 가르는 핵심 요소가 되었습니다.

• 기술적 난제: 패턴 붕괴 및 구조적 변형

건식 세정은 오염물을 떼어내기 위해 고압의 가스를 분사하거나 물리적인 타격을 가하는 방식을 포함합니다. 이때 발생하는 **충격력(Impact Force)**이 미세 패턴이 견딜 수 있는 임계치를 초과할 경우 다음과 같은 문제가 발생합니다.

- **패턴 붕괴(Pattern Collapse):** 고속 가스 분사에 의한 압력 차이로 인해 종횡비(Aspect Ratio)가 높은 미세 패턴이 옆으로 쓰러지거나 서로 달라붙는 현상이 발생합니다.
- **표면 스크래치 및 에칭(Etching) 효과:** 레이저를 이용한 건식 세정의 경우, 에너지 밀도(Energy Density) 조절에 실패하면 웨이퍼 표면에 미세한 열적 손상이나 물리적 스크래치를 남길 수 있습니다.
- **해결 방안: 공정 최적화 및 에너지 정밀 제어**

물리적 손상을 최소화하면서 세정력을 극대화하기 위해 다음과 같은 공정 최적화 기술이 적용됩니다.

- **압력 및 유량의 단계적 제어(Ramping Profile):** 가스를 한 번에 고압으로 분사하는 대신, 압력을 단계적으로 높이는 램핑(Ramping) 프로파일을 적용하여 패턴이 받는 급격한 충격을 완화합니다.
- **초임계 유체(Supercritical Fluid) 활용:** 초임계 CO₂는 액체의 용해력과 기체의 침투력을 동시에 가지면서도 표면 장력이 '0'에 가깝습니다. 따라서 물리적 타격을 최소화하면서도 미세한 틈새(Gap) 사이로 침투하여 오염물을 용해해낼 수 있어, 패턴 손상을 방지하는 데 매우 효과적인 대안으로 활용됩니다 [출처: www.jaenung.net].
- **AI 기반 실시간 모니터링:** 세정 공정 중 발생하는 물리적 변수를 AI 비전 알고리즘으로 실시간 분석하여, 패턴의 변형이나 이상 징후가 감지될 경우 즉각적으로 공정 파라미터를 수정하는 스마트 세정 시스템이 도입되고 있습니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM_20260509_001.pdf].

3. 건식 세정 기술 난제 비교 요약

구분	정전기 발생 (ESD)	물리적 손상 (Physical Damage)
주요 원인	비전도성 매체 마찰, 고속 가스 흐름	고압 분사 충격, 레이저 에너지 과다
결함 유형	입자 재부착, 소자 전기적 파괴	패턴 붕괴(Collapse), 스크래치, 변형
핵심 해결책	이온화(Ionization), 접지(Grounding) 최적화	초임계 유체 활용, 압력 프로파일 제어
공정 목표	표면 전위 안정화 (0V 유지)	구조적 무결성(Structural Integrity) 확보

결론적으로, 건식 세정 공정의 기술적 난제를 해결하기 위해서는 '**정밀한 에너지 제어**'와 '**전하 관리**'가 동시에 이루어져야 합니다. 특히 HBM과 같이 적층 구조가 복잡하고 미세 패턴이 밀집된 차세대 반도체 공정에서는, 물리적 충격을 최소화하면서도 전기적 안정성을 보장할 수 있는 초임계 유체 및 AI 통합형 건식 세정 솔루션의 도입이 필수적입니다.

결론 및 시사점

본 보고서에서는 반도체 제조 공정의 미세화 및 고집적화에 따라 필수적인 기술로 부상하고 있는 고정밀 건식 세정(Dry Cleaning) 기술의 메커니즘과 유형, 그리고 차세대 패키징 공정으로의 적용 가능성을 심도 있게

분석하였습니다. 분석 결과, 건식 세정 기술은 단순한 보조 공정을 넘어 차세대 반도체 수율(Yield) 확보를 위한 핵심 전략 자산으로서 그 위상이 변화하고 있음을 확인할 수 있었습니다.

미래 반도체 제조 공정에서의 기술 트렌드 및 전망

향후 반도체 제조 공정은 HBM(High Bandwidth Memory)의 고단 적층, 2.5D/3D 패키징, 그리고 Hybrid Bonding 기술의 도입으로 인해 기존의 습식 세정(Wet Cleaning)만으로는 대응 불가능한 물리적·화학적 한계점에 직면할 것입니다. 이에 따라 다음과 같은 세 가지 기술 트렌드가 지배적일 것으로 전망됩니다.

1. **초미세 구조 대응형 세정 기술의 고도화**: TSV(Through Silicon Via) 및 Micro-bump 간의 극미세 간극(Gap) 내부에 잔류하는 오염물질을 제거하기 위해, 초임계 유체(Supercritical Fluid)와 같은 침투력이 극대화된 매체를 활용한 세정 기술이 표준 공정으로 자리 잡을 것입니다.

2. **하이브리드 세정 솔루션의 통합**: 물리적 타격(고압 가스, 레이저)과 화학적 용해(초임계 CO₂)를 정밀하게 결합하여, 웨이퍼 표면의 손상(Physical Damage)은 최소화하면서도 오염물질 제거 효율은 극대화하는 하이브리드형 공정 통합이 가속화될 것입니다.

3. **데이터 기반의 스마트 세정(Smart Cleaning)**: AI 비전 및 센싱 기술을 세정 장비에 통합하여, 오염물의 종류와 밀도에 따라 세정 파라미터(압력, 온도, 조사 시간 등)를 실시간으로 최적화하는 지능형 공정 제어가 구현될 것입니다.

미래 전략 및 공정 통합을 위한 제언

반도체 제조 기업 및 장비 개발사는 급변하는 공정 환경에 대응하기 위해 다음과 같은 전략적 접근이 필요합니다.

- **공정 간 통합 최적화(Co-optimization)**: 세정 공정을 독립된 단계로 간주하지 않고, 전후 공정(Deposition, Etching, Bonding 등)과의 유기적인 연계를 통해 공정 전체의 정합성을 높이는 'Process Integration' 관점의 연구가 필수적입니다.
- **차세대 소재 및 장비 기술 선점**: Hybrid Bonding과 같은 초미세 접합 공정에서 발생할 수 있는 정전기(ESD) 및 물리적 변형(Warpage) 문제를 원천적으로 차단할 수 있는 건식 세정 전용 모듈 및 신규 세정 매체 개발에 대한 R&D 투자가 선행되어야 합니다.

결론적으로, 건식 세정 기술은 반도체의 고성능화 및 미세화 트렌드를 뒷받침하는 기술적 근간입니다. 특히 HBM과 같은 고부가가치 제품군에서 요구되는 극한의 신뢰성을 충족시키기 위해서는, 기존의 한계를 극복한 고정밀 건식 세정 솔루션의 확보가 향후 반도체 산업의 주도권을 결정짓는 핵심 요소가 될 것입니다.