

반도체 식각 및 세정 공정용 사불화탄소(CF₄) 시장: 특성, 공급업체, 시장 동향 및 미래 전망 – by songpd (2025.04.28)

1.0 요약

사불화탄소(CF₄), 또는 테트라플루오로메탄으로도 알려진 이 가스는 반도체 제조 산업 내에서 핵심적인 특수 가스로, 플라즈마 식각 및 챔버 세정 공정에서 필수적인 역할을 수행합니다. 일반적인 조건에서의 화학적 안정성과 플라즈마 내에서 반응성 불소종을 효율적으로 생성하는 능력 덕분에 실리콘 기반 물질을 선택적으로 제거하고 공정 장비의 청결도를 유지하는 데 매우 효과적입니다.¹ 높은 불소 대 탄소 비율(4:1)은 그 효능에 기여하는 핵심 속성입니다.¹ 플라즈마 환경에서 CF₄는 다양한 이온(CF_x⁺, F⁺)과 특히 원자 불소(F) 및 플루오로카본 라디칼(CF_x)과 같은 고반응성 중성 라디칼로 분해됩니다.² 이러한 종들은 복잡한 화학 반응과 이온 보조 메커니즘을 통해 실리콘(Si), 이산화규소(SiO₂), 질화규소(Si₃N₄)와 같은 중요 물질의 식각을 주도하여 현대 집적 회로에 필요한 정밀한 패턴 정의를 가능하게 합니다.¹ 이는 고종횡비 구조 생성에 중요한 이방성 식각과 증착 잔류물 제거를 위한 정기적인 챔버 세정 모두에 사용되어 웨이퍼 간 공정 일관성을 보장하고 결함을 최소화합니다.¹

반도체 등급 CF₄의 세계 시장은 전자 산업의 광범위한 동향을 반영합니다. 2023-2024년 약 4억 5천만 달러로 추정되는 이 시장은 2030년대 초까지 4.1%에서 6.1% 범위의 연평균 성장률(CAGR)을 보이며 견고한 성장을 나타낼 것으로 예상됩니다.⁶ 이러한 확장은 인공지능(AI), 5G/6G 통신, 사물인터넷(IoT), 자동차 전자 장치 및 고성능 컴퓨팅(HPC)의 발전에 따른 반도체 수요 급증과 본질적으로 연결되어 있습니다. 또한, 미국 및 EU의 CHIPS 법과 같은 정부 인센티브와 공급망 복원력 강화 이니셔티브에 힘입어 전 세계적인 반도체 제조 공장(팹) 건설 및 확장이라는 전례 없는 물결은 CF₄ 소비에 강력한 순풍을 제공합니다.¹⁰ 기술적으로 3D NAND 플래시 메모리 및 Gate-All-Around(GAA) 트랜지스터와 같은 복잡한 3차원 아키텍처로의 전환은 정교한 식각 및 세정 공정을 필요로 하며, 이는 고순도 CF₄ 수요를 증가시킬 수 있습니다.¹⁵

지리적으로는 세계 최대 파운드리 및 메모리 제조업체가 위치한 아시아 태평양 지역이 시장을 주도하고 있으며, 북미와 유럽이 그 뒤를 잇고 있습니다.⁶

공급 환경에는 Linde plc, Air Liquide S.A., Resonac Corporation, Kanto Denka Kogyo Co., Ltd., Merck KGaA/EMD Electronics, Air Products 와 같은 주요 글로벌 산업 가스 회사 및 전문 화학 제조업체와 중국의 Haohua Chemical Gas Co., Ltd.와 같은 주요 업체들이 포함됩니다.⁶ 이들 공급업체는 일반적으로 4N(99.99%) 및 5N(99.999%) 순도 등급의 CF₄ 를 제공하며, 고급 로직 및 메모리 장치 제조에는 종종 더 높은 순도가 요구됩니다.⁶

공정 유용성에도 불구하고 CF₄ 는 매우 높은 지구 온난화 지수(GWP) – 100 년 기준으로 CO₂ 의 5,700 배에서 7,390 배 사이로 추정 – 와 50,000 년을 초과하는 극도로 긴 대기 수명을 가진 과불화탄소(PFC)로 분류되어 상당한 환경적 감시를 받고 있습니다.⁴ 이러한 환경 프로파일은 공정 최적화, 효율적인 사용 지점(POU) 저감 시스템, 대체 화학 물질의 개발 및 채택을 통해 배출 감소에 대한 산업계의 집중적인 노력을 촉진합니다.²¹ 주요 대안으로는 삼불화질소(NF₃), 분자 불소(F₂), 그리고 C₄F₆ 및 C₄F₈O 와 같은 새로운 저 GWP 플루오로카본이 있지만, 각각 성능, 비용, 안전 및 구현 측면에서 자체적인 과제를 안고 있습니다.²²

전략적으로 CF₄ 는 시장 성장과 팹 확장에 힘입어 예측 가능한 미래 동안 반도체 제조에서 필수적인 공정 가스로 남을 것입니다. 그러나 환경 지속 가능성에 대한 요구는 계속 강화될 것이며, 이는 산업계가 사용량 최소화, 효율적인 저감, 그리고 실행 가능한 대체 화학 물질로의 점진적이고 응용 분야별 전환을 포함하는 다각적인 접근 방식을 채택하도록 압박할 것입니다.

2.0 서론

반도체 제조는 전 세계적으로 가장 복잡하고 기술적으로 진보된 산업 공정 중 하나입니다. 현대 전자 제품의 구성 요소인 집적 회로(IC)의 제조는 실리콘 웨이퍼에서

수행되는 수백 개의 순차적 단계를 포함합니다. 이러한 단계는 종종 웨이퍼 준비, 산화(절연층 성장), 포토리소그래피(패턴 정의), 식각(물질 제거), 박막 증착(물질층 추가), 이온 주입(전기적 특성 변경을 위한 도핑), 화학 기계적 연마(CMP, 표면 평탄화), 장치 조립(패키징), 최종 테스트를 포함하는 주요 공정 모듈로 분류됩니다.³¹ 이 중 식각 및 세정 단계는 제조 순서 전반에 걸쳐 여러 번 반복되며, 복잡한 회로 패턴을 정의하고 최종 장치의 순도와 성능을 보장하는 데 중요합니다.

이러한 공정의 성공적인 실행은 다양한 고순도 특수 가스의 정밀한 제어 및 공급에 크게 의존합니다.³⁴ 이 가스들은 다양한 기능을 수행합니다: 일부는 박막 증착을 위한 전구체 역할을 하고, 다른 일부는 도펀트 원자를 도입하며, 아르곤(Ar)이나 질소(N₂)와 같은 불활성 가스는 제어된 분위기를 제공하거나 운반 가스 역할을 하며, 반응성 가스는 물질을 선택적으로 제거하는 식각제로 사용되거나 제조 장비의 무결성을 유지하기 위한 세정제로 사용됩니다.³⁴ 이러한 가스에 대한 순도 요구 사항은 매우 엄격하여 종종 99.999%(5N)를 초과하며, 미량의 불순물이라도 장치 결함 및 수율 손실로 이어질 수 있습니다.³⁵

이러한 맥락에서 사불화탄소(CF₄), 또는 테트라플루오로메탄으로도 알려진 이 가스는 주요 불소화 특수 가스로 두드러집니다.¹ 과불화탄소(PFC) 계열에 속하는 CF₄는 반도체 산업 전반에 걸쳐 주로 두 가지 중요한 응용 분야, 즉 플라즈마 식각과 플라즈마 기반 챔버 세정에 널리 활용됩니다.¹ 플라즈마 식각에서 CF₄는 실리콘(Si), 이산화규소(SiO₂), 질화규소(Si₃N₄)와 같은 실리콘 함유 물질을 화학적으로 제거하는 반응성 불소 종의 공급원 역할을 하여 마스크에서 웨이퍼 표면으로 회로 패턴을 전사할 수 있게 합니다.¹ 챔버 세정에서 CF₄ 플라즈마는 공정 챔버(특히 화학 기상 증착, CVD 챔버)의 내부 표면에서 원치 않는 증착 잔류물을 제거하는 데 사용되며, 이는 공정 안정성을 유지하고 입자 오염을 방지하며 높은 제조 수율을 보장하는 데 필수적입니다.¹

이 보고서는 반도체 식각 및 세정에서의 역할에 초점을 맞춰 사불화탄소(CF₄)에 대한 심층 분석을 제공합니다. CF₄의 기본 화학적 특성과 플라즈마 환경 내에서의 복잡한

상호 작용을 탐구하며, 식각 및 세정을 담당하는 메커니즘을 상세히 설명합니다. 이 보고서는 반도체 등급 CF₄의 글로벌 공급업체 환경을 파악하여 주요 제조업체와 해당 제품을 식별합니다. 또한 현재 시장 규모, 세분화, 성장 동인, 지역별 동향 및 미래 예측을 검토하는 포괄적인 시장 분석을 제시합니다. 결정적으로, 이 보고서는 CF₄ 사용과 관련된 중요한 환경적 고려 사항도 다루며, 높은 지구 온난화 지수(GWP), 규제 상황, 그리고 대체 화학 물질의 평가 및 채택을 포함한 배출 감소를 향한 지속적인 산업 노력을 논의합니다. 목표는 반도체 가치 사슬 전반의 이해 관계자에게 정보에 입각한 전략적 의사 결정, 기술 평가 및 지속 가능한 운영 계획에 필요한 상세한 기술 및 시장 정보를 제공하는 것입니다.

3.0 CF₄: 화학적 특성 및 플라즈마 상호작용 메커니즘

까다로운 반도체 공정에서 사불화탄소(CF₄)의 유용성은 고유한 화학적 안정성과 플라즈마 조건 하에서 고반응성 종을 생성하는 능력의 독특한 조합에서 비롯됩니다. 이러한 특성과 후속 플라즈마 화학을 이해하는 것은 식각 및 세정에서의 역할을 이해하는 데 기본적입니다.

3.1 핵심 화학적 특성

표준 온도 및 압력 하에서 CF₄는 무색, 무취, 불연성이며 일반적으로 무독성 가스입니다.¹ 가장 결정적인 화학적 특성은 탁월한 안정성과 불활성입니다. 이 안정성은 유기 화학에서 가장 강한 단일 결합으로 인식되는 탄소-불소(C-F) 결합의 강도에서 비롯됩니다.¹ 결과적으로 CF₄는 플라즈마와 같은 상당한 에너지 입력 없이는 대부분의 물질, 특히 실리콘 및 그 화합물과 쉽게 반응하지 않습니다.³

주요 물리적 특성은 잘 문서화되어 있습니다: 분자량은 약 88.00-88.01 g/mol, 끓는점은 약 -127.8°C(145.3 K), 녹는점은 약 -183.6°C(89.5 K)입니다.¹ CAS 등록 번호는 75-73-0입니다.³⁸

공정 관점에서 중요한 특징은 분자 구조로, 4:1의 높은 불소 대 탄소 비율을

산출합니다. 이 높은 비율은 CF₄ 분자 하나가 잠재적으로 실리콘 기반 물질의 주요 식각 종인 불소 원자 4 개를 전달할 수 있음을 의미합니다. 반응성 불소를 전달하는 이러한 고유한 효율성은 플라즈마 공정에서 식각 가스 및 챔버 세정제로서의 효과에 크게 기여합니다.¹

3.2 플라즈마 화학: 해리, 이온 및 라디칼 형성

일반 조건에서는 불활성이지만, CF₄ 는 일반적으로 저압 챔버에서 무선 주파수(RF) 또는 마이크로파 전력으로 유지되는 글로우 방전과 같은 플라즈마의 고에너지 환경에 노출되면 매우 반응성이 높아집니다.¹ 플라즈마 내에서 고에너지 전자는 CF₄ 분자와 충돌하여 해리(분해)시킵니다.² 이 해리 과정은 후속 식각 및 세정 작용을 담당하는 이온 및 중성 라디칼을 포함한 활성 종의 복잡한 혼합물을 생성합니다.

전자 충돌 해리를 통해 형성되는 주요 종은 다음과 같습니다 ²:

- **양이온:** CF₃⁺, CF₂⁺, CF⁺와 같은 플루오로카본 양이온, 원자 불소 이온(F⁺), 탄소 이온(C⁺). 이러한 양이온은 벌크 플라즈마에서 플라즈마 쉬스(표면 근처의 전압 강하 영역)를 가로질러 음으로 바이어스된 웨이퍼 또는 챔버 벽을 향해 가속됩니다. 이들의 운동 에너지는 식각 공정에 물리적 스퍼터링 성분을 기여하여 표면의 화학 결합을 끊고 화학 반응의 속도와 방향성(이방성)을 향상시킵니다.⁴⁹
- **중성 라디칼:** 이들은 매우 반응성이 높은 전기적으로 중성인 종입니다. CF₄ 에서 파생된 주요 라디칼에는 플루오로카본 라디칼(CF₃, CF₂, CF)과 화학적 식각에 가장 중요한 원자 불소(F)가 포함됩니다.² 원자 불소는 극도로 반응성이 높으며 종종 실리콘 및 그 화합물의 주요 화학적 식각제입니다.³ 플루오로카본 라디칼(CF_x)도 표면 반응에 참여하여 식각에 기여하지만, 공정 중 표면에 얇은 플루오로카본 폴리머 필름을 형성하는 역할로 특히 중요합니다.⁵²

플라즈마 내에서 이러한 다양한 종(이온, F 원자, CF_x 라디칼)의 상대 농도는 가스 압력, 전력 입력, 가스 유량과 같은 특정 작동 조건, 그리고 중요하게는 공급 가스 조성(즉, O₂ 또는 H₂ 와 같은 첨가제의 존재)에 크게 의존합니다. 이 균형은 전체 공정 특성을

결정하기 때문에 중요합니다. 예를 들어, F 원자 밀도가 높은 조건은 일반적으로 더 빠른 식각 속도를 초래하지만, 더 등방성(덜 방향성) 식각 및 다른 재료 간의 낮은 선택성(예: SiO₂ 대 Si 식각)을 초래할 수 있습니다. 반대로, CF_x 라디칼의 상대 농도가 높은 조건은 플루오로카본 폴리머 필름 형성을 향상시키는 경향이 있습니다. 이 필름은 표면을 부동태화하여 식각 속도를 늦추지만, 식각 이방성을 크게 향상시키고(측벽을 측면 식각으로부터 보호함으로써) 높은 식각 선택성을 가능하게 합니다(한 재료, 예를 들어 Si에서의 식각을 우선적으로 억제하면서 다른 재료, 예를 들어 SiO₂의 식각을 허용함으로써).⁵² 따라서 플라즈마 화학, 특히 F 원자 대 CF_x 라디칼 비율을 제어하는 것은 CF₄ 기반 플라즈마 공정을 조정하는 기본 측면입니다.

3.3 식각 메커니즘

일반적으로 플라즈마 식각은 표면에 반응성 종의 흡착, 휘발성 생성물을 형성하는 화학 반응, 그리고 진공 시스템에 의해 제거될 가스상으로 이러한 생성물의 탈착 순서로 진행됩니다.³ CF₄ 플라즈마 식각의 구체적인 메커니즘은 식각되는 재료에 따라 다릅니다.

- **실리콘(Si) 식각:** 주요 메커니즘은 원자 불소(F) 라디칼에 의한 화학적 식각으로, 실리콘과 반응하여 휘발성 생성물인 사불화규소(SiF₄)를 형성합니다.² 단순화된 표현은 $\text{Si} + 4\text{F} \rightarrow \text{SiF}_4 \uparrow$ 입니다. CF₄ 플라즈마는 일반적으로 높은 Si 식각 속도를 제공합니다.⁵³ 그러나 순수한 CF₄ 플라즈마는 화학 반응이 수직뿐만 아니라 측면으로도 진행될 수 있기 때문에 종종 등방성 식각을 초래합니다. 이온 충격은 주로 활성 표면 부위를 생성하고 부동태화 종 또는 반응 부산물의 제거를 돕는 부차적인 역할을 합니다.⁵⁰ 식각 중에는 CF_x 라디칼에서 유래한 얇은 플루오로카본 필름이 Si 표면에 형성될 수 있습니다. 이 필름의 두께와 특성은 전체 식각 속도에 영향을 미칩니다. 너무 두껍거나 부동태화되면 식각을 늦추거나 중단시킬 수 있습니다.³
- **이산화규소(SiO₂) 식각:** SiO₂ 식각은 끊어야 할 강한 Si-O 결합 때문에 Si 식각보다 더 복잡합니다. 화학 반응과 물리적 이온 충격의 시너지 효과가 필요합니다.³ F

원자는 Si 원자와 반응하고, 탄소 종(CFx 라디칼 또는 이온에서 유래)은 산소와 반응하여 CO, CO₂ 또는 COF₂ 와 같은 휘발성 생성물을 형성하는 것으로 여겨집니다.² 전체 반응은 때때로 $\text{SiO}_2 + \text{CF}_4 \rightarrow \text{SiF}_4 \uparrow + \text{CO}_2 \uparrow$ 로 단순화되지만,² 실제 표면 화학은 더 복잡합니다. 고에너지 이온 충격은 Si-O 결합을 끊고, 반응 에너지를 제공하며, 반응 생성물과 플루오로카본 필름을 스퍼터링하는 데 중요합니다.⁵⁵ Si 에 비해 SiO₂ 표면은 일반적인 CF₄ 플라즈마 조건에서 플루오로카본 폴리머가 덜 축적되는 경향이 있는데, 이는 부분적으로 SiO₂ 격자의 산소가 증착된 탄소와 반응할 수 있기 때문입니다. 폴리머 형성 경향의 이러한 차이는 Si 에 대한 SiO₂ 의 선택적 식각을 달성하는 핵심입니다.⁵²

- **질화규소(Si₃N₄) 식각:** CF₄ 플라즈마에서 Si₃N₄ 식각은 F 원자와 Si 의 반응(SiF₄ 형성) 및 잠재적으로 질소를 포함하는 반응을 포함합니다. CF₄ 는 Si₃N₄ 의 알려진 식각제입니다.¹ 연구에 따르면 Si₃N₄ 의 식각 거동, 식각 속도 및 플루오로카본 필름 형성 경향을 포함하여 종종 Si 와 SiO₂ 사이의 중간 정도입니다.⁵⁶ 특정 응용 분야, 특히 3D NAND 플래시 메모리 제조에서는 CF₄, O₂, N₂ 를 포함하는 가스 혼합물이 Si₃N₄ 식각에 자주 사용됩니다.⁵⁹
- **플루오로카본 필름의 역할:** 플루오로카본 플라즈마 식각의 중요한 측면은 기판 표면에 얇은(일반적으로 나노미터 규모) 플루오로카본 필름의 동적 형성과 제거입니다.⁵² C-F 결합(C-F, CF₂, CF₃)과 C-C 결합으로 구성된 이 필름은 플라즈마에서 CFx 라디칼과 이온의 흡착 및 반응으로 발생합니다. 그 두께와 조성은 증착(CFx 플럭스)과 제거(이온에 의한 스퍼터링, F 또는 기판 원자, 예: SiO₂ 의 O 와의 화학 반응) 사이의 균형에 의해 결정되는 정상 상태에 도달합니다. 이 필름은 이중 역할을 합니다: 식각제 확산 장벽 역할을 하여 식각을 억제할 수 있지만, 이방성 달성(측벽 보호) 및 선택성 달성(한 재료를 다른 재료보다 우선적으로 부동태화, 예: Si 대 SiO₂)에도 필수적입니다.⁵² 필름의 특성(두께, F/C 비율, 가교)은 공급 가스 화학(H₂ 또는 O₂ 첨가 등) 및 이온 에너지(바이어스 전압으로 제어)와 같은 플라즈마 매개변수에 매우 민감합니다.⁵² 이온 충격은 예를 들어 탈불소화(F 의 우선적 제거)를 통해 필름을 변형시켜 탄소 함량이 더 높고

잠재적으로 식각에 더 저항성이 있도록 만들 수 있습니다.⁵⁷

3.4 챔버 및 웨이퍼 표면 세정 메커니즘

웨이퍼에 패턴을 식각하는 것 외에도 CF₄ 플라즈마는 반도체 제조 내 세정 공정에서 중요한 역할을 합니다.

- **CVD 챔버 세정:** 증착 공정(예: PECVD - 플라즈마 강화 화학 기상 증착) 후, SiO₂ 또는 Si₃N₄ 와 같은 잔류 물질이 벽, 샤워헤드, 전극을 포함한 반응 챔버의 내부 표면에 축적됩니다. 제거되지 않으면 이러한 증착물은 후속 웨이퍼 공정 중에 벗겨져 입자 오염 및 수율 손실을 유발하거나 챔버 조건을 변경하여 공정 드리프트를 초래할 수 있습니다.¹ CF₄ 플라즈마(종종 O₂ 또는 다른 가스와 혼합됨)는 웨이퍼 런 사이에 이러한 챔버의 현장 세정에 널리 사용됩니다. 메커니즘은 식각과 유사합니다: 플라즈마에서 생성된 반응성 불소 종이 증착된 실리콘 화합물과 반응하여 SiF₄ 와 같은 휘발성 생성물을 형성하고, 이는 챔버 밖으로 펌핑됩니다.⁵ 효과적이고 효율적인 챔버 세정은 높은 처리량과 장치 신뢰성을 유지하는 데 중요합니다. 그러나 이 공정은 특히 세정 주기가 챔버가 깨끗해지는 시점(종말점 감지 사용)에 정확히 중단되지 않고 고정된 시간 동안 실행되는 경우 세정 가스의 활용 효율이 낮을 수 있기 때문에 팹의 전체 PFC 배출에 상당한 기여를 합니다.⁵ 이러한 높은 배출 가능성은 세정 공정을 최적화하고 NF₃ 및 F₂ 와 같은 대체 세정 가스를 탐색하는 데 상당한 노력을 기울이게 했습니다.
- **웨이퍼 표면 세정:** CF₄ 플라즈마는 종종 다른 가스와 조합하여 특정 웨이퍼 표면 준비 또는 세정 작업에도 사용될 수 있습니다.³⁵ 예를 들어, CF₄/H₂ 플라즈마는 게이트 산화물 성장과 같은 중요한 공정 단계 전에 실리콘 표면에서 오염 물질이나 자연 산화막을 제거하기 위해 연구되었습니다.⁶² CF₄ 플라즈마는 특정 유형의 잔류물을 제거하거나 표면 특성을 수정하는 데에도 사용될 수 있습니다(예: 소수성을 증가시키기 위한 불소화²⁾). 종종 후속 O₂ 플라즈마 단계는 CF₄ 플라즈마 처리로 남은 플루오로카본 잔류물을 제거하거나 포토레지스트 찌꺼기와 같은 유기

오염 물질을 제거하는 데 사용됩니다.⁴⁷

챔버 세정 공정에 사용되는 CF₄ 및 기타 불소화 가스의 상당한 양과 플라즈마 내에서의 잠재적으로 불완전한 가스 활용은 챔버 세정을 반도체 산업의 배출 감소 전략의 주요 초점으로 만듭니다. 광학 방출 분광법 또는 기타 센서를 사용하여 세정 주기의 종말점을 정확하게 감지하는 것과 같은 최적화 기술은 가스 소비를 최소화할 수 있습니다.²¹ C₂F₆ 또는 CF₄ 와 같은 더 높은 GWP 가스를 NF₃ 또는 F₂ 와 같은 대안으로 대체하는 것은 또 다른 주요 추진력이며, 이는 더 높은 세정 효율 또는 더 낮은 GWP 를 제공할 수 있습니다.²¹ 마지막으로, 배출된 F-GHG 를 파괴하기 위해 효과적인 사용 지점(POU) 저감 시스템을 설치하는 것은 중요한 완화 조치입니다.²¹

3.5 플라즈마 화학 및 공정 결과에 대한 첨가제의 영향

산소(O₂), 수소(H₂) 또는 아르곤(Ar)과 같은 첨가 가스를 CF₄ 플라즈마 공급물에 도입하는 것은 플라즈마 화학을 정밀하게 조정하고 원하는 공정 결과, 특히 식각 속도, 선택성 및 이방성 제어를 달성하기 위한 일반적인 관행입니다.

- **산소(O₂) 첨가:** CF₄ 플라즈마에 O₂ 를 첨가하면 여러 가지 효과가 있습니다:
 - **F 원자 밀도 증가(낮은 O₂ %에서):** 산소 원자와 분자는 플라즈마 내 CF_x 라디칼(주로 CF₃, CF₂)과 쉽게 반응하여 CO, CO₂, COF₂ 와 같은 안정한 분자를 형성합니다.⁴⁸ 이는 CF_x 라디칼을 "소거"하여 재결합 반응(예: F+CF₃→CF₄)을 통해 F 원자가 손실되는 속도를 줄입니다. 순 결과는 상대적으로 낮은 O₂ 농도(일반적으로 최대 ~20-25%)에서 주요 식각 종인 원자 불소(F)의 정상 상태 밀도가 증가하는 것입니다.⁶⁶ 이는 종종 Si, SiO₂, Si₃N₄ 의 식각 속도 증가로 이어집니다.⁴⁸
 - **폴리머 형성 억제:** CF_x 라디칼을 소비함으로써 O₂ 첨가는 표면으로의 폴리머 전구체 플럭스를 크게 줄여 플루오로카본 필름 형성을 억제합니다.⁵³ 산소는 또한 산화를 통해 탄소질 침전물을 제거하는 데 화학적으로 도움을 줄 수 있습니다. 이 효과는 일반적으로 Si 의 보호 폴리머 층이 감소하거나 제거됨에

따라 특히 SiO₂ 와 Si 사이의 식각 선택성을 낮춥니다.⁵⁴ 그러나 감소된 중합은 깨끗한 식각을 달성하거나 챔버 세정 또는 포토레지스트 애싱/디스크럼과 같은 빠르고 비선택적인 재료 제거에 유리할 수 있습니다.⁴⁷

- **희석 및 산화 효과(높은 O₂ %에서):** O₂ 비율이 더 증가함에 따라(예: ~25-50% 이상), CF₄ 자체의 농도가 감소하여(희석 효과) F 원자 및 CF_x 라디칼 공급원이 감소합니다. 이는 결국 F 원자 밀도와 식각 속도를 감소시킵니다.⁶⁶ 또한, 높은 O₂ 농도에서는 산소가 실리콘과 같은 표면에 흡착되어 얇은 산화물 층을 형성할 수 있으며, 이는 표면을 부동태화하고 불소에 의한 식각을 더욱 억제할 수 있습니다.⁶⁵
- **응용 분야:** CF₄/O₂ 혼합물은 Si₃N₄ 식각(때로는 N₂ 첨가) ⁵⁹, 포토레지스트의 플라즈마 애싱/디스크럼 ⁴⁷, 몰딩 컴파운드 세정 ⁴⁸, 그리고 때로는 높은 선택성이 주요 목표가 아닌 SiO₂ 또는 Si 식각에 일반적으로 사용됩니다.⁵⁴ 챔버 세정에도 사용됩니다.⁴⁹
- **수소(H₂) 첨가:** CF₄ 플라즈마에 H₂ 를 첨가하면 O₂ 와 비교하여 현저히 다른 효과가 있습니다:
 - **F 원자 밀도 감소:** 수소 원자와 분자는 플라즈마 내 F 원자와 매우 효율적으로 반응하여 안정한 불화수소(HF) 분자를 형성합니다($H+F \rightarrow HF$, $H_2+F \rightarrow HF+H$).⁶⁷ 이 반응은 원자 불소의 중요한 손실 메커니즘으로 작용하여 H₂ 가 첨가됨에 따라 플라즈마 내 농도가 감소합니다.
 - **폴리머 형성 향상:** F 원자를 선택적으로 제거함으로써 H₂ 첨가는 플라즈마 내 CF_x 라디칼의 상대 농도를 증가시킵니다(즉, 기체상 종의 C/F 비율 증가). 이는 표면으로의 폴리머 전구체(CF_x) 플렉스를 증가시켜 더 두꺼운 플루오로카본 필름의 형성과 성장을 촉진합니다.⁵² 또한, 필름에 통합되거나 표면에서 반응하는 수소 원자는 필름 내 C-F 결합에서 불소 원자를 추출할 수 있습니다($C-F+H \rightarrow C-+HF$). 이 과정은 필름을 더 탄소 풍부하게(덜 불소화됨), 잠재적으로 더 가교결합되게(비정질 수소화 탄소-불소 필름, a-C:F:H 형성) 만들고 덜 휘발성으로 만들어 부동태화 효과를 향상시킵니다.⁶⁰

- **SiO₂/Si 선택성 향상:** 이렇게 향상되고 더 견고한 폴리머 형성은 SiO₂ 와 Si 사이의 높은 식각 선택성을 달성하는 핵심입니다. 플루오로카본 필름은 Si 표면에 쉽게 형성되어 F 원자의 접근을 차단하여 식각을 강력하게 억제합니다. 그러나 SiO₂ 표면에서는 식각 공정이 계속될 수 있으며, 종종 순수 CF₄ 에 비해 감소된 속도로 진행됩니다. 이는 SiO₂ 격자 내 산소 원자가 상부 플루오로카본 필름의 탄소와 반응하여 제거를 돕고, 고에너지 이온 충격이 필름을 스퍼터링하고 산화물 표면의 식각 반응을 구동하는 데 중요한 역할을 하기 때문입니다.⁵² 이러한 차별적인 식각 거동은 종종 30:1 을 초과하는 매우 높은 SiO₂ 대 Si 식각 속도 비율을 가능하게 하며, 이는 실리콘까지 콘택트 홀을 식각하는 것과 같은 응용 분야에 중요합니다.⁵²
- **중합 한계:** 첨가할 수 있는 H₂ 양에는 한계가 있습니다. 특정 임계 농도(종종 CF₄ 에서 약 40-42% H₂, 다른 공정 조건에 따라 다름) 이상에서는 폴리머 증착 속도가 식각 및 스퍼터링에 의한 제거 속도를 초과하여 SiO₂ 를 포함한 모든 표면에서 순 폴리머 성장을 초래합니다. 이는 식각 공정을 완전히 중단시킵니다.⁶⁰ 이 "폴리머 포인트" 근처에서 작동하려면 가스 조성 및 기타 매개변수의 정밀한 제어가 필요합니다.⁶⁸
- **응용 분야:** CF₄/H₂ 혼합물은 주로 Si 에 대한 SiO₂ 식각에서 높은 선택성을 달성하는 데 사용됩니다.⁵² 제어된 불소화 또는 잔류물 제거가 필요한 특정 표면 세정 또는 변형 응용 분야에도 사용됩니다.⁶²
- **아르곤(Ar) 첨가:** 아르곤은 종종 반응성 종의 농도를 제어하거나 플라즈마 방전을 안정화하는 데 도움이 되는 희석 가스로 CF₄ 플라즈마에 첨가됩니다.³⁴ 그러나 무거운 불활성 가스인 Ar 은 식각의 물리적 측면에서도 역할을 합니다. Ar⁺ 이온은 이온 충격에 크게 기여합니다. Ar⁺ 이온은 플루오로카본 이온보다 무겁기 때문에 표면 물질과 플루오로카본 필름의 더 효율적인 스퍼터링으로 이어질 수 있습니다.⁶⁵ 이 향상된 물리적 성분은 식각 속도, 이방성 및 표면 형태에 영향을 미칠 수 있습니다. 아르곤 첨가는 또한 전자 온도 및 밀도와 같은 플라즈마 매개변수에 영향을 미칠 수 있으며, 이는 차례로 CF₄ 의 해리 속도와 전체 플라즈마

화학에 영향을 미칩니다.

O₂ 및 H₂ 와 같은 첨가제의 의도적인 사용은 기체상 화학(F 원자 대 CF_x 라디칼 균형)과 표면 공정(식각 대 중합) 사이의 복잡한 상호 작용에 대한 필수적인 제어를 제공합니다. 이 제어는 고급 반도체 장치 제조에 필요한 특정 식각 속도, 선택성 및 프로파일 제어를 달성하는 데 기본적인입니다. 그러나 이는 또한 이러한 공정이 가스 조성, 유량, 전력 및 압력의 작은 변화에 민감하다는 것을 강조하며, 정교한 공정 제어 전략을 필요로 합니다.

4.0 반도체 등급 CF₄ 공급업체의 글로벌 환경

반도체 등급 사불화탄소(CF₄) 공급망은 글로벌 전자 산업의 중요한 조력자입니다. 이는 산업 및 특수 가스를 전문으로 하는 대규모 다국적 기업과 지역적 강점을 가진 보다 집중된 화학 제조업체의 혼합을 포함합니다. 고순도 CF₄ 의 안정적인 공급을 보장하는 것은 중단 없는 반도체 제조에 필수적입니다.

4.1 공급업체 생태계 개요

반도체 등급 CF₄ 시장은 주로 북미, 유럽, 아시아에 본사를 둔 회사들에 의해 공급되며, 특히 일본, 중국, 한국과 같이 강력한 반도체 산업을 가진 지역에 상당한 제조 역량이 위치해 있습니다.⁶ 공급업체는 벌크 가스, 특수 가스, 화학 물질을 포괄하는 다양한 포트폴리오를 가진 글로벌 거대 기업부터 전자 등급 재료에 특화된 보다 전문화된 기업까지 다양합니다.

이 시장의 결정적인 특징은 순도의 중요성입니다. 반도체 제조 공정, 특히 최첨단 노드(예: 7nm, 5nm, 3nm 이하)에서 작동하는 고급 로직 및 메모리 장치의 경우 오염 물질에 매우 민감합니다. 수분(H₂O), 산소(O₂), 질소(N₂), 탄소 산화물(CO, CO₂), 수소(H₂), 불화수소(HF), 육불화황(SF₆) 또는 기타 플루오로카본(OFC/TFC)과 같은 백만분율(ppm) 또는 십억분율(ppb) 수준의 불순물조차도 장치 성능, 신뢰성 및 제조 수율에 부정적인 영향을 미칠 수 있습니다.¹

결과적으로 반도체 등급 CF4 는 일반적으로 고순도 등급으로 공급됩니다. 일반적인 명칭은 다음과 같습니다:

- **4N:** 99.99% 순도. 덜 중요한 응용 분야나 구형 기술 노드에서 자주 사용됩니다.⁶
- **5N:** 99.999% 순도. 엄격한 오염 제어 요구 사항으로 인해 현재 및 고급 반도체 공정에서 점점 더 표준이 되고 있습니다.⁶
- **고순도 등급 (예: 5N5, 5N8, 6N, VLSI/ULSI):** 99.999%를 초과하는 순도 수준, 예를 들어 99.9995%(5N5), 99.9998%(5N8 ⁴⁰) 또는 99.9999%(6N ¹⁸)는 최첨단 로직(FinFET, GAA) 및 메모리(고급 DRAM, 3D NAND) 제조의 가장 까다로운 응용 분야에 필요합니다.¹ VLSI(초대규모 집적) 또는 ULSI(극초대규모 집적) 등급과 같은 용어도 사용되며, 종종 이러한 고급 응용 분야에 적합한 순도 수준을 의미합니다.¹⁵ 99.997% 품질 CF4 에 대한 SEMI C3.40 과 같은 SEMI 표준은 산업 사양을 제공합니다.⁷³

이러한 초고순도 수준을 달성하고 검증하려면 정교한 제조 공정(종종 직접 불소화 또는 기타 합성 경로에 이어 증류 및 흡착과 같은 광범위한 정제 단계 포함)과 고급 분석 기술이 필요합니다. 이러한 기술 장벽은 최고 순도 등급($\geq 5N$)의 공급이 생산 및 품질 관리 인프라에 상당한 투자를 한 소수의 잘 확립된 공급업체에 집중되는 경향이 있음을 의미합니다. 이러한 집중은 특히 업계의 최첨단 제조 역량에 대한 수요가 계속 증가함에 따라 잠재적으로 공급망 취약성으로 이어지거나 가격 역학에 영향을 미칠 수 있습니다. 초고순도 가스에 대한 요구 사항 증가는 현대 트랜지스터의 복잡성과 축소되는 치수와 직접적으로 관련되어 있으며, 여기서 미세한 오염조차도 섬세한 제조 단계를 방해하거나 장치 무결성을 손상시킬 수 있습니다.⁷⁴

4.2 주요 제조업체 프로필

이용 가능한 연구 및 시장 보고서에 따르면 다음 회사는 반도체 등급 CF4 의 주요 제조업체 및 공급업체로 확인되었습니다:

- **Linde plc:** (글로벌, 본사 아일랜드/영국/미국 추정) Linde AG 와 Praxair 의

합병으로 형성된 세계 최고의 산업 가스 회사. 반도체 제조용 전자 특수 가스를 포함한 광범위한 산업 및 특수 가스 포트폴리오 보유. CF4 시장의 주요 업체로 자주 언급됨.⁶ 제공된 출처⁷⁸에서 특정 CF4 등급은 상세히 설명되지 않았지만, 시장 지위는 고순도(4N, 5N+) 공급 능력을 시사함.

- *연락처:* 웹사이트⁷⁸ (<https://www.linde-gas.com/contact-directory>)

- **Air Liquide S.A.:** (글로벌, 본사 프랑스) 산업 및 의료용 가스, 기술 및 서비스 분야의 또 다른 글로벌 리더. 고순도 가스를 포함하여 전자 산업을 위한 광범위한 제품 제공. 지속 가능성 및 고급 정제 기술에 중점을 둔 가스 생산 및 공급 솔루션 전문성으로 유명.⁹ 주요 업체로 언급됨.

- *연락처:* 웹사이트⁸⁰ (<https://www.airliquide.com/contact>) 또는 (<https://www.airliquide.com/group/worldwide-presence>). 출처에서 특정 CF4 등급 상세 정보 없음.⁸⁰

- **Resonac Corporation (구 Showa Denko K.K.):** (일본) 고순도 가스를 포함한 반도체 재료에 중점을 둔 일본의 주요 화학 회사. 절연막, 특히 산화막 식각용 제품 라인업에 "고순도 FC-14 (CF4)"를 명시적으로 나열.⁴³ 업계 최대 생산량 중 하나와 강력한 공급망을 주장하며 실린더에서 ISO 튜브 트레일러까지 포장 제공.⁴³ 광범위한 기술 데이터 제공.⁴³ 시장 보고서에서 주요 업체로 언급됨.¹⁸

- *연락처:* 웹사이트 문의 양식 통해.⁸² (확인 중 웹사이트 접근 불가⁸³). CF4에 대한 스니펫에서 특정 4N/5N 지정은 찾을 수 없었지만 순도 수준은 높을 것으로 암시됨.

- **Kanto Denka Kogyo Co., Ltd. (KDK):** (일본) 불소 화학 전문 일본 기업으로 특수 가스 및 정밀 화학 물질 제조. 반도체 식각 및 장비 세정용 CF4를 구체적으로 제공.⁸⁴ 여러 시장 보고서에서 주요 업체로 등재됨.⁶ KDK를 다루는 시장 보고서는 4N 및 5N 등급을 시장 부문으로 언급함.⁶

- *연락처:* 웹사이트 (<https://www.kantodenka.co.jp/en/>). (확인 중 웹사이트 접근 불가⁸⁷). 제공된 스니펫에서 KDK의 CF4 등급에 대한 구체적인 제품 사양은 이용 불가.⁴¹

- Merck KGaA / EMD Electronics:** (글로벌, 본사 독일 / 미국 사업부 EMD) 반도체 재료 분야에서 상당한 입지를 가진 선도적인 과학 기술 회사(미국에서는 종종 EMD Electronics 로 불리며 이전 Versum Materials 포함). 챔버 세정, MEMS 식각, 평판 디스플레이 식각을 대상으로 하는 "Carbon Tetrafluoride VLSI (CF₄)" 제공.¹⁵ Sigma-Aldrich(Merck 의 일부)는 이전에 99.9% CF₄ 를 나열했음.⁴⁵ 주요 업체로 언급됨(Versum 인수 통해).⁹
 - 연락처:** 웹사이트 ⁹⁰
<https://www.emdgroup.com/en/expertise/semiconductors.html>. "VLSI" 등급으로 순도 수준 암시되나, 스니펫에서 특정 N-지정 찾을 수 없음.
- Air Products and Chemicals, Inc.:** (글로벌, 본사 미국) 전자를 포함한 다양한 산업에 서비스를 제공하는 주요 산업 가스 공급업체.⁹ 전자 응용 분야용 가스 제공.⁹¹
 - 연락처:** 전화 800-654-4567 또는 웹사이트 ⁹¹
<https://www.airproducts.com/contact-us>. 출처에서 특정 CF₄ 등급 상세 정보 없음.⁹¹
- Haohua Chemical Gas Co., Ltd.:** (중국) Sinochem 그룹의 일부로 전자 특수 가스 및 불소 화학 물질 전문. 상세한 불순물 사양 및 명시된 생산 능력과 함께 5N(≥99.999%) 및 5.8N(≥99.9998%) 등급의 CF₄ 를 명시적으로 제공.⁴⁰ 시장 보고서에서 주요 업체로 등재됨.⁶
 - 연락처:** 전화 +86-0379-66961195, 이메일 liudaqu@sinochem.com ⁴⁰,
 웹사이트 <http://en.haohua-gas.com/>
- Chengdu Kemeite Special Gas Co., Ltd.:** (중국) 반도체 응용 분야용 특수 가스에 중점을 두며, 특히 중국 국내 시장에서 경쟁력 있는 업체로 간주됨.⁶ R&D 강조 언급됨.⁶
- Fujian Deer:** (중국) 시장 보고서에서 주요 업체로 등재됨.⁶ 스니펫에 추가 제품 세부 정보 없음.
- Suzhou Jinhong:** (중국) 시장 보고서에서 주요 업체로 등재됨.⁶ 스니펫에 추가

제품 세부 정보 없음.

- **Huate Gas:** (중국) 특히 아시아에서 주목받는 신흥 플레이어로 언급됨.¹⁸
- **EFC Gases & Advanced Materials:** (미국) 3.5 등급(99.95%)부터 5 등급(99.999%)까지의 CF₄ 를 제공하며 사양 및 SDS 제공.³⁹
 - *연락처:* 웹사이트 견적 양식 통해
(<https://www.efcgases.com/product/tetrafluoromethane/>)
- **기타 잠재적 공급업체 (온라인 마켓플레이스/리스팅 통해):**
 - Taiyu Gas (Made-in-China): 5N (99.999%) CF₄ 사양 제공.³⁸
 - Chengdu Hongjin Chemical Co., Ltd. (Made-in-China): 전자 등급 5N (99.999%) CF₄ 제공.⁹³
 - Wuhan Air Gas Electronic Materials Enterprise Co., Ltd. (Alibaba): 전자 등급 5N (99.999%) CF₄ COA 사양 제공.⁶⁹
 - Qingdao Rui Ming Gas Co., Ltd (Made-in-China): 99.99%, 99.995%, 99.999% CF₄ 제공.⁷⁰
- **참고:** 광범위한 반도체 생태계(장비, 재료, 칩 제조)에 관련된 여러 다른 회사가 CF₄ 공급업체와 상호 작용하거나 내부 요구 사항이 있을 수 있지만, 가스 자체의 주요 제조업체는 아님(예: Applied Materials, Lam Research, Intel, Samsung, TSMC, STMicroelectronics).⁷⁷

4.3 주요 표: 반도체 등급 CF₄의 주요 글로벌 공급업체

아래 표는 연구에서 확인된 주요 글로벌 공급업체의 핵심 정보를 요약합니다. 이는 공급업체 환경, 지역적 초점, 제품 등급 역량(가능한 경우) 및 연락처를 이해하기 위한 빠른 참조 역할을 합니다. 이 데이터의 통합은 공급망의 글로벌 특성과 이러한 회사가 반도체 제조를 가능하게 하는 데 중요한 역할을 강조합니다.

표 4.1: 반도체 등급 CF₄의 주요 글로벌 공급업체

회사명	본사 지역	주요 사업	알려진 반도체 CF4 등급	웹사이트 / 연락처 정보 (출처 기준)
Linde plc	글로벌	산업 및 특수 가스	고순도 암시 (4N, 5N+); 세부 정보 N/A ⁷⁸	https://www.linde- gas.com/contact -directory ⁷⁸
Air Liquide S.A.	글로벌 (프랑스)	산업 및 특수 가스	고순도 암시; 세부 정보 N/A ⁸⁰	https://www.airli guide.com/cont act ⁸⁰
Resonac Corporation (구 Showa Denko)	일본	화학 및 특수 가스	고순도 FC-14 (CF4) ⁴³ ; N-등급 N/A	웹사이트 문의 통해 ⁸² (사이트 문제 언급 ⁸³)
Kanto Denka Kogyo Co., Ltd. (KDK)	일본	불소 화학 및 특수 가스	CF4 제공 ⁸⁴ ; 시장 맥락 4N/5N ⁶	https://www.kan todenka.co.jp/en / (사이트 문제 언급 ⁸⁷)
Merck KGaA / EMD Electronics	글로벌 (독일/미국)	화학 및 반도체 재료	CF4 VLSI 등급 ¹⁵ ; 99.9% (단종) ⁴⁵	웹사이트 통해 ⁹⁰ (https://www.em dgroup.com/en/ expertise/semic onductors.html)

Air Products and Chemicals, Inc.	글로벌 (미국)	산업 및 특수 가스	전자 가스 제공; CF4 세부 정보 N/A ⁹¹	800-654-4567; https://www.airproducts.com/contact-us ⁹¹
Haohua Chemical Gas Co., Ltd.	중국	전자 특수 가스	5N ($\geq 99.999\%$), 5.8N ($\geq 99.9998\%$) ⁴⁰	+86-0379-66961195; liudaqu@sinochem.com; http://en.haohua-gas.com/ ⁹²
Chengdu Kemeite Special Gas Co., Ltd.	중국	특수 가스	반도체 등급 암시 ⁶	출처에서 N/A
Fujian Deer	중국	특수 가스	반도체 등급 암시 ⁶	출처에서 N/A
Suzhou Jinhong	중국	특수 가스	반도체 등급 암시 ⁶	출처에서 N/A
Huate Gas	중국	특수 가스	반도체 등급 암시 ¹⁸	출처에서 N/A
EFC Gases & Advanced Materials	미국	특수 가스	3.5 등급 (99.95%) ~ 5 등급	https://www.efcgases.com/product/tetrafluorom

			(99.999%) ³⁹	ethane/ ³⁹
Taiyu Gas	중국 (리스팅)	특수 가스	5N (99.999%) ³⁸	Made-in-China 플랫폼 통해 ³⁸
Chengdu Hongjin Chemical Co., Ltd.	중국 (리스팅)	특수 가스	5N (99.999%) ⁹³	Made-in-China 플랫폼 통해 ⁹³

참고: "N/A"는 제공된 연구 스니펫 또는 기본 검색에서 정보를 사용할 수 없음을 나타냅니다. "암시됨"은 회사의 시장 지위 또는 일반적인 제품 제공이 이러한 등급을 가리키지만, CF4에 대한 명시적 확인은 출처에서 찾을 수 없었음을 시사합니다.

5.0 시장 분석: 반도체 식각 및 세정에서의 CF4

반도체 등급 사불화탄소(CF4) 시장은 글로벌 반도체 산업의 건전성과 기술 궤적에 본질적으로 연결되어 있습니다. 수요는 전체 칩 생산량, CF4를 필요로 하는 특정 제조 기술의 채택률, 지역별 제조 역량에 의해 형성됩니다.

5.1 글로벌 시장 규모, 세분화 및 성장 추세

시장 조사 보고서는 글로벌 반도체 등급 CF4 시장에 대해 다양한 추정치를 제공하며, 이는 서로 다른 방법론, 범위 정의 및 기간을 반영합니다. 여러 출처에서 2023-2024년 기간 동안 시장 가치를 약 4억 5천만 달러로 추정합니다.⁷ 미래 성장 예측 또한 다양하며, 2030년대 초(예: 2030, 2032, 2033, 2034)까지 연장되는 예측 기간 동안 연평균 성장률(CAGR)은 일반적으로 4.1%에서 6.1% 범위로 추정됩니다.⁶ 예측된 시장 가치는 이러한 성장을 반영하며, 목표는 2033년까지 약 3억 9,100만 달러⁹에서 2032년까지 6억 5천만 달러⁷, 잠재적으로 2034년까지 8억 달러에 이릅니다.⁸ 시장 잠재력을 평가할 때 이러한 불일치를 주목하는 것이 중요합니다. 참고로, 전체 글로벌

반도체 시장은 2024 년에 6,276 억 달러에 달했으며, 이는 CF4 가 서비스하는 최종 시장의 상당한 규모를 나타냅니다.⁹⁴

시장은 여러 기준에 따라 세분화될 수 있습니다:

- **순도 등급별:** 표준 순도(일반적으로 4N 또는 99.99%)와 고/초고순도(5N 또는 99.999% 이상) 간의 구분이 중요합니다.⁶ 고순도 등급은 프리미엄 가격을 형성하며, 공정 제어 및 오염 방지가 가장 중요한 작은 피처 크기와 복잡한 아키텍처를 가진 고급 반도체 장치 제조에 필수적입니다.⁶ 결과적으로, 4N 등급은 다양한 공정에서 사용될 수 있지만, 고순도 부문($\geq 5N$)이 시장 가치의 지배적인 점유율을 차지할 가능성이 높으며, 잠재적으로 70%를 초과할 수 있습니다.⁸ 표준 등급(약 4N)은 덜 중요한 단계나 구형 팹에서 사용되어 약 30%의 시장 점유율을 차지할 수 있습니다.⁸ 반도체 장치의 복잡성 증가는 더 높은 순도 요구 사항으로의 지속적인 추세를 시사합니다.
- **응용 분야별:** 반도체 등급 CF4 의 주요 응용 분야는 플라즈마 식각 및 챔버 세정입니다.⁶ 웨이퍼의 패턴 정의에 중심적인 식각은 일반적으로 시장 점유율의 약 50% 이상을 차지하는 가장 큰 응용 분야입니다.⁸ 챔버 세정 또한 장비 가동 시간과 공정 일관성을 유지하는 데 필수적인 CF4 의 중요한 소비자입니다. 냉매(R-14) 또는 연구용과 같은 기타 틈새 응용 분야도 존재하지만, 반도체 맥락 내에서는 수요의 미미한 부분을 구성합니다.⁷ 한 보고서는 특정 도핑 또는 재료 변형 공정과 관련될 수 있는 박막 증착을 응용 분야로 언급하며 약 10%의 점유율을 차지한다고 합니다.⁸
- **지역별:** CF4 시장의 지리적 분포는 반도체 제조 역량의 글로벌 분포를 반영합니다. 아시아 태평양(APAC) 지역은 글로벌 시장 점유율의 약 45% 이상을 차지하는 확실한 선두 주자입니다.⁶ 이러한 우위는 대만, 한국, 중국, 일본에 주요 반도체 파운드리(TSMC, 삼성, SMIC 등), 메모리 제조업체(삼성, SK 하이닉스, 마이크론 - 상당한 아시아 입지 보유), IDM(통합 장치 제조업체)이 고도로 집중되어 있기 때문입니다.⁶ 북미는 약 30%의 점유율을 차지하는 두 번째로 큰 시장으로, 주요

IDM(인텔 등), 고급 R&D 활동, 미국 CHIPS 법에 따른 상당한 신규 투자의 지원을 받습니다.⁶ 유럽은 15%에서 25% 사이로 추정되는 상당한 점유율을 차지하며, 자동차, 산업 및 통신 부문에 중점을 둔 기존 반도체 회사와 유럽 CHIPS 법에 의해 강화됩니다.⁶

5.2 수요 동인

반도체 등급 CF4 시장의 성장 궤적은 반도체 산업 자체의 확장 및 기술 진화에 뿌리를 둔 요인들의 합류에 의해 추진됩니다.

- **전체 반도체 산업 성장:** 가장 근본적인 동인은 전 세계 반도체 시장의 끊임없는 확장입니다. 모든 부문에 걸친 디지털 전환과 AI, 클라우드 컴퓨팅, HPC 와 같은 데이터 집약적 응용 프로그램의 확산, 그리고 소비자 전자 제품(스마트폰, PC), 자동차 시스템(ADAS, 전기화), 산업 자동화, 5G/6G 인프라의 성장에 힘입어 칩 수요는 계속 급증하고 있습니다.⁶ 전체 칩 생산량이 증가함에 따라 CF4 와 같은 필수 공정 재료의 소비도 자연스럽게 증가합니다. 2024 년 기록적인 글로벌 반도체 판매량과 2025 년 긍정적인 예측은 이러한 강력한 기본 수요를 강조합니다.⁹⁴
- **기술 발전 및 소형화:** 더 작은 트랜지스터와 더 복잡한 집적 회로를 향한 지속적인 추진(무어의 법칙 및 그 이상)은 점점 더 정교한 제조 공정을 필요로 합니다.⁷ 피처 크기가 한 자릿수 나노미터 범위로 축소됨에 따라 식각 및 세정 단계는 더욱 중요하고 어려워집니다. 필요한 정밀도, 균일성 및 선택성을 달성하는 것은 종종 CF4 와 같은 고순도 가스를 사용하는 신중하게 제어된 플라즈마 공정에 의존하며, 장치 아키텍처가 진화하더라도 수요를 유지합니다.⁶
- **3D 아키텍처 채택 (3D NAND, GAA):** 반도체 산업의 3 차원 장치 구조로의 전환은 공정 가스 수요에 영향을 미치는 주요 기술 변곡점입니다.
 - **3D NAND:** 3D NAND 플래시 메모리에서 메모리 셀을 수직으로 쌓는 것은 교대 재료층(종종 SiO₂ 및 Si₃N₄ 또는 폴리실리콘)을 통해 매우 깊고 좁은 트렌치와 홀을 매우 높은 종횡비(HAR)로 식각해야 합니다.¹⁶ 이러한 까다로운 HAR 식각 공정은 종종 플루오로카본 플라즈마를 활용하며, 여기서 CF₄(종종

O₂, N₂, CHF₃, C₄F₈ 등과 같은 가스와의 복잡한 혼합물)는 필요한 식각 종을 생성하고 측벽 부동태화를 관리하는 역할을 합니다.⁵⁹ 연속적인 3D NAND 세대에서 층 수가 증가함에 따라 이러한 식각 과제가 심화되고 CF₄ 를 포함한 관련 가스에 대한 수요를 촉진하는 강력한 챔버 세정 프로토콜이 필요합니다.¹⁵

- **Gate-All-Around (GAA):** 고급 로직 노드(일반적으로 3nm 이하)를 위한 FinFET 기술의 후속 기술로서 GAA 트랜지스터 아키텍처는 나노시트 구조의 형성 및 선택적 제거와 같은 새로운 제조 단계를 포함합니다.¹⁷ 이러한 공정은 식각 및 증착에서 원자 수준의 정밀도를 요구합니다. GAA 는 FinFET 에서 일부 공정을 차용하지만, 새로운 단계는 고도로 제어된 플라즈마 식각을 요구하며, 필요한 선택성 및 프로파일 제어를 달성하기 위해 CF₄ 및 기타 플루오로카본에 대한 지속적이거나 진화된 역할을 창출할 수 있습니다.¹⁷ GAA 로의 전환은 고급 공정 재료에 대한 수요를 주도하는 중요한 기술적 변화를 나타냅니다.
- **반도체 팹 확장:** 강력한 단기 및 중기 동인은 새로운 반도체 팹 건설 및 기존 팹 확장에 대한 대규모 글로벌 투자입니다.¹⁰ 공급망 보안에 대한 지정학적 욕구, 정부 인센티브(미국 및 EU CHIPS 법 등), 예상되는 장기 수요 충족 필요성에 의해 주도되어 전 세계적으로 수십 개의 새로운 대규모 제조 시설이 계획되거나 건설 중입니다.¹² 각각의 새로운 팹은 CF₄ 를 포함한 대량의 공정 가스에 대한 상당한 신규 수요원을 나타냅니다. 2032 년까지 미국 제조 역량의 3 배 증가 예상 ⁹⁶과 2024-2025 년 글로벌 역량의 연간 6-7% 성장 예상 ¹²은 CF₄ 와 같은 필수 재료에 대한 물량 요구 사항 증가로 직접 이어집니다.

이러한 동인들 간의 상호 작용은 복잡합니다. 전반적인 반도체 성장과 대규모 팹 확장이 향후 몇 년 동안 전 세계적으로 필요한 CF₄ 물량의 상당한 증가를 보장하는 반면, 3D NAND 및 GAA 와 같은 고급 노드로의 기술적 전환은 미묘한 그림을 제시합니다. 이러한 고급 공정은 더 높은 순도의 가스와 더 정교한 식각/세정 레시피를 요구합니다. 이는 복잡성 증가(예: 더 많은 세정 주기, 까다로운 HAR 식각)로 인해 일부 단계에서 웨이퍼당 CF₄ 사용 강도를 증가시킬 수 있습니다. 그러나 동일한 기술적

압력은 환경 문제와 결합하여 공정 최적화 및 잠재적으로 더 낮은 GWP 를 가진 대체 화학 물질에 대한 집중적인 연구를 주도합니다. GAA 또는 미래 3D NAND 생산의 특정 중요 단계에 대해 대체 식각제가 더 효과적이거나 지속 가능성이 입증되면, 산업 확장으로 인해 전체 물량 수요가 증가하더라도 웨이퍼당 CF4 수요 증가를 완화할 수 있습니다.

5.3 지역별 시장 동향

CF4 소비의 지리적 분포는 상당한 반도체 제조 인프라를 갖춘 지역으로 크게 치우쳐 있습니다.

- **아시아 태평양 (APAC):** 이 지역은 글로벌 시장 점유율의 약 45% 이상을 차지하며 반도체 등급 CF4 의 지배적인 소비자로 자리매김하고 있습니다.⁶ 이러한 리더십은 대만(TSMC 주도), 한국(삼성, SK 하이닉스), 중국(SMIC, 화홍 그룹, 넥스칩, CXMT 및 급속 확장 중인 수많은 기타 업체), 일본(키옥시아, 르네사스, 소니 등)에 반도체 제조 시설이 대규모로 집중된 직접적인 결과입니다.⁶ 이들 국가는 세계 최고의 파운드리, 메모리 생산 업체 및 상당수의 IDM 을 보유하고 있어 공정 가스에 대한 상당한 수요를 주도합니다. 특히 중국은 공격적인 생산 능력 확장을 진행 중이며 2025 년까지 전 세계 반도체 제조 능력의 거의 3 분의 1 을 차지할 것으로 예상되어 APAC 의 지배력을 더욱 공고히 할 것입니다.¹²
- **북미:** 두 번째로 큰 시장인 북미는 글로벌 CF4 점유율의 약 30%를 차지합니다.⁶ 이 지역은 인텔과 같은 주요 IDM, 선도적인 R&D 센터, 강력한 장비 및 재료 공급망, 그리고 미국 CHIPS 및 과학법을 통한 상당한 정부 지원의 혜택을 받습니다.⁹ 이 법은 특히 고급 로직 및 최첨단 기술을 위한 새로운 국내 제조 능력에 상당한 투자를 촉진하고 있으며, 이는 향후 10 년 동안 고순도 공정 가스 수요의 견고한 성장을 주도할 것으로 예상됩니다.¹⁴ 이 지역은 또한 기술 선택 및 배출 제어 관행에 영향을 미치는 잘 확립된 환경 규제를 가지고 있습니다.⁹
- **유럽:** 유럽은 글로벌 점유율의 15%에서 25% 사이로 추정되는 중요한 시장을 대표합니다.⁶ STMicroelectronics, Infineon, NXP, Bosch 와 같은 주요 반도체

업체들은 이 지역에 강력한 제조 기반을 두고 있으며, 종종 자동차, 산업 및 통신 응용 분야에 중점을 둡니다.¹⁴ 미국과 유사하게 유럽 CHIPS 법은 국내 생산 능력과 기술 주권을 강화하는 것을 목표로 하며, 이는 시장 성장을 지원할 것으로 예상됩니다.¹⁴ 잠재적인 PFAS 제한을 포함한 엄격한 환경 규제는 유럽 산업계의 주요 고려 사항이며, 잠재적으로 대체 화학 물질 조사를 가속화할 수 있습니다.⁷

5.4 주요 표: 반도체 등급 CF4 시장 추정 및 예측

다음 표는 데이터가 허용하는 경우 지역 및 응용/순도별로 세분화된 반도체 등급 CF4에 대한 사용 가능한 시장 규모 및 성장 추정치를 요약합니다. 이는 다양한 시장 보고서에 존재하는 변동성을 인정하면서 전략적 평가에 도움이 되는 정량적 개요를 제공합니다.

표 5.1: 반도체 등급 CF4 시장 추정 및 예측

지역	지표	2023/2024 추정치 (백만 달러)	예측 가치 (백만 달러) 및 연도	CAGR (%)	주요 동인 / 참고 사항	출처
글로벌	시장 규모	~450	391 (2033 년까 지)	4.1 - 6.1	전체 반도체 성장, 기술 발전 (AI, 5G, IoT, 3D NAND, GAA), 팹 확장. 추정치 및	6

					예측의 변동 참고.	
			650 (2032 년까 지)			
			800 (2034 년까 지)			
	세분화					
	순도: $\geq 5N$ 점유율 (%)	>70% (추정)	N/A	N/A	고급 노드에 의해 주도됨.	8
	순도: <5N 점유율 (%)	~30% (추정)	N/A	N/A	덜 중요한 응용 분야 / 구형 노드.	8
	응용: 식각 (%)	~50%+ (추정)	N/A	N/A	패턴 전사를 위한 주요 응용 분야.	8
	응용: 세정	상당함	N/A	N/A	장비 유지 보수에	6

	(%)				필수적.	
APAC	시장 점유율 (%)	~45%	지배적	선도적 성장	팹 고집중 (대만, 한국, 중국, 일본), 특히 중국의 강력한 확장.	6
북미	시장 점유율 (%)	~30%	강력한 성장 (~6% CAGR 추정)	강력한 성장	주요 IDM, R&D, CHIPS 법 투자, 고급 로직 집중.	6
유럽	시장 점유율 (%)	~15-25%	꾸준한 성장	꾸준한 성장	기존 업체 (자동차/산업 집중), EU CHIPS 법, 엄격한 환경 규제.	6
기타 지역	시장 점유율 (%)	나머지	N/A	N/A	중동, 라틴 아메리카 등 포함.	6

참고: 시장 규모 및 CAGR 수치는 인용된 출처에서 발견된 범위를 나타냅니다. 예측 연도는 보고서마다 다릅니다(2030-2034). 세분화 비율은 제한된 데이터 포인트를 기반으로 한 지표적 추정치입니다. "N/A"는 데이터를 사용할 수 없거나 출처 전반에 걸쳐 일관되게 보고되지 않았음을 나타냅니다.

6.0 미래 전망, 동향 및 환경 고려 사항

반도체 산업에서 사불화탄소(CF₄) 시장의 미래 궤적은 지속적인 기술 진화, 견고한 시장 성장 예측, 그리고 지속 가능한 제조 관행을 요구하는 강화되는 환경 압력 간의 상호 작용에 의해 형성될 것입니다.

6.1 시장 예측 및 장기 성장 전망

시장 예측은 향후 10 년 동안 반도체 등급 CF₄ 의 지속적인 성장을 일관되게 가리킵니다. 예측에 따르면 시장은 2030 년대 초까지 6 억 5 천만 달러에서 8 억 달러 사이의 가치에 도달할 수 있으며, 이는 4%에서 6% 범위로 추정되는 CAGR 에 의해 주도됩니다.⁶ 이러한 전망은 2030 년까지 연간 매출 1 조 달러에 이를 가능성이 있는 전체 반도체 시장의 예상되는 장기 확장에 근본적으로 뒷받침됩니다.¹³ 인공지능, 5G/6G 배포, 자동차 전기화 및 자율성, 산업 IoT, 고성능 컴퓨팅과 같은 메가트렌드에 의해 주도되는 지속적인 수요는 글로벌 칩 생산의 상당한 증가를 필요로 할 것입니다.⁶

그러나 반도체 산업의 고유한 주기성을 인정하는 것이 중요합니다.⁹⁵ 장기 추세는 긍정적이지만, 시장은 재고 조정, 자본 지출 조정, 거시 경제 상황이나 지정학적 사건의 영향을 받는 수요 변동 기간을 경험할 수 있습니다.¹¹ 이러한 주기는 전체 궤적이 상승세를 유지하더라도 CF₄ 수요의 단기 변동으로 이어질 수 있습니다. 현재의 팹 건설 물결은 단기 수요를 증진시키는 동시에 잠재적인 미래 과잉 생산 능력에 대한 의문을 제기하지만, 특히 AI 관련 칩에 대한 수요가 강세를 유지함에 따라 우려는 다소 완화되는 것으로 보입니다.¹¹

6.2 진화하는 반도체 기술의 영향

반도체 제조 내 기술 전환은 CF₄ 의 특정 요구 사항 및 소비 패턴에 상당한 영향을 미칠 것입니다.

- **고급 로직 (GAA 트랜지스터):** 3nm 노드 이상에서 FinFET 에서 Gate-All-Around(GAA) 아키텍처로의 산업 전환은 새로운 재료와 특히 수평 나노시트 채널

형성 및 방출을 위한 매우 복잡한 다단계 공정을 도입합니다.¹⁷ 이러한 구조를 식각하는 것은 탁월한 정밀도, 균일성 및 선택성을 요구합니다. 이는 초고순도 CF₄ ($\geq 5N$) 수요를 주도하고, 식각과 부동태화 간의 균형을 미세 조정하기 위해 잠재적으로 CF₄ 를 다른 가스와의 정교한 혼합물에 포함시키는 고도로 최적화된 플라즈마 식각 레시피 개발을 필요로 할 수 있습니다.¹⁷ GAA 제조에서 중요한 식각 및 세정 단계 수가 증가하면 개별 단계에서 사용량을 줄이려는 노력에도 불구하고 웨이퍼당 관련 가스의 전체 소비량이 잠재적으로 증가할 수 있습니다.

- **3D NAND 플래시 메모리:** 3D NAND 에서 더 높은 저장 밀도를 향한 끊임없는 추구는 수백 개의 메모리 셀 층을 쌓는 것을 포함합니다.⁷⁷ 이러한 구조를 제조하려면 이 두꺼운 스택(종종 SiO₂ 와 Si₃N₄ 또는 폴리실리콘의 교대 층으로 구성됨)을 통해 매우 높은 중형비(HAR)의 홀과 트렌치를 식각해야 합니다.¹⁶ CF₄ 를 포함한 플루오로카본 기반 플라즈마 식각(종종 O₂, N₂, Ar 또는 기타 플루오로카본(CHF₃, C₄F₈)과 같은 첨가제와 혼합됨)은 이러한 HAR 식각에 필수적입니다.⁵⁹ 층 수가 증가함에 따라 식각 공정은 더욱 어려워져 더 높은 선택성, 더 나은 프로파일 제어 및 더 긴 식각 시간을 요구하며, 이는 차례로 CF₄ 또는 그 대안과 같은 가스를 사용하는 효과적인 식각제 및 강력한 챔버 세정 프로토콜에 대한 수요를 주도합니다.¹⁵
- **신소재 도입:** 반도체 로드맵은 장치 성능을 향상시키기 위해 새로운 고유전율(high-k) 유전체, 저유전율(low-k) 층간 유전체(예: SiCOH), 실리콘을 넘어서는 새로운 채널 재료, 상호 연결을 위한 다른 금속과 같은 신소재를 지속적으로 통합합니다.⁶ 이러한 신소재를 식각하는 것은 종종 완전히 새로운 플라즈마 화학 및 공정 개발을 요구합니다. 이는 CF₄ 에 대한 새로운 응용 분야(아마도 특정 혼합물에서)를 창출하거나 신소재에 더 적합한 대체 식각제를 선호하여 특정 단계에서 CF₄ 를 잠재적으로 대체할 수 있습니다. 이러한 신소재와의 CF₄ 플라즈마 호환성은 장기적인 역할에 영향을 미치는 핵심 요소가 될 것입니다.

6.3 환경 프로파일 및 규제 환경

CF4의 장기 사용에 직면한 가장 중요한 과제는 환경 영향입니다.

- **높은 GWP 및 대기 수명:** CF4는 극도의 안정성과 강력한 온실 효과로 알려진 합성 화합물 계열인 과불화탄소(PFC)입니다. 100년 시간 지평에 대한 지구 온난화 지수(GWP)는 매우 높아 일반적으로 5,700에서 7,390 범위로 인용되며, 이는 1kg의 CF4가 해당 기간 동안 1kg의 CO2보다 수천 배 더 많은 열을 가둔다는 것을 의미합니다.⁴ 이를 복합적으로 만드는 것은 50,000년으로 추정되는 비범한 대기 수명으로, 배출물이 수천 년 동안 지속되어 기후 변화에 기여한다는 것을 의미합니다.⁵
- **산업 이니셔티브 및 규제:** PFC 및 HFC, SF6, NF3와 같은 기타 불소화 온실가스(F-GHG)의 환경 영향을 인식하여 반도체 산업은 수십 년 동안 자발적인 배출 감소 노력에 참여해 왔으며, 종종 세계 반도체 협의회(WSC) 및 미국 반도체 산업 협회(SIA), 유럽 반도체 산업 협회(ESIA)와 같은 지역 협회를 통해 조정됩니다.⁴ 이러한 이니셔티브는 오염 방지 계층 구조에 중점을 둡니다: 첫째, 공정 최적화를 통해 가스 소비 **감소**; 둘째, 가능한 경우 높은 GWP 가스를 낮은 GWP 대안으로 **대체**; 셋째, **재사용/재활용** 옵션 조사(혼합 가스 스트림의 경우 어려움); 넷째, 배출 전에 배기 스트림에서 배출물 **저감**(파괴).²¹ 미국 환경 보호국(EPA)과 같은 규제 기관도 F-GHG 배출 보고를 의무화하고 향후 더 엄격한 통제를 부과할 수 있습니다.⁴ 일부 플루오로카본 공정 부산물 또는 관련 화학 물질을 잠재적으로 포함할 수 있는 광범위한 범주인 과불화 및 폴리플루오로알킬 물질(PFAS)에 대한 우려도 전 세계적으로 규제 조사를 증가시키고 있으며, 이는 불소화 가스 사용 및 저감 요구 사항에 간접적으로 영향을 미칠 수 있습니다.²⁶
- **저감 기술:** 사용 지점(POU) 저감 시스템은 F-GHG가 대기로 방출되기 전에 파괴하기 위해 플라즈마 식각 및 CVD 도구의 배기 라인에 일반적으로 설치됩니다.²¹ 일반적인 기술에는 열 저감(연소, 종종 천연가스 사용) 및 플라즈마 저감이 포함됩니다. 이러한 시스템은 종종 99%를 초과하는 높은 파괴 및 제거

효율(DRE)을 달성할 수 있지만¹¹⁴, 완벽하지는 않습니다. 시스템 설계, 작동 조건, 가스 유량 및 처리되는 특정 가스 혼합물과 같은 요인이 DRE에 영향을 미칠 수 있습니다.²⁵ 또한 저감 시스템 자체는 에너지를 소비하고 잠재적으로 바람직하지 않은 부산물을 생성할 수 있습니다. 예를 들어, 일부 열 저감 시스템에서 사용되는 메탄과 같은 탄화수소 연료로 불소 함유 가스를 연소하면 의도치 않게 CF₄가 생성될 수 있습니다.²⁴ 플라즈마 저감은 연소와 관련된 NO_x 형성을 피하지만 전기 에너지가 필요합니다.¹¹³

6.4 대체 화학 물질 및 전략 평가

주로 환경 문제에 의해 주도되어 반도체 산업은 CF₄와 같은 높은 GWP 가스에 대한 대안을 적극적으로 탐색하고 구현하고 있습니다.

● 삼불화질소 (NF₃):

- **현황:** 특히 CVD 챔버 세정에서 성숙하고 널리 채택된 대안으로, 종종 C₂F₆를 대체하고 때로는 CF₄를 대체합니다.⁵ 일부 식각 공정에서도 사용됩니다.⁵
- **장점:** CF₄ 또는 C₂F₆에 비해 플라즈마에서 더 높은 해리 효율을 가지므로 더 빠른 세정 속도와 잠재적으로 미반응 모가스의 배출량이 적습니다.²³ CF₄보다 낮은 GWP(17,200)와 짧은 수명(500-740년)을 가지지만 여전히 매우 높습니다.²¹ 수년간의 사용으로 강력한 안전 기록을 보유하고 있습니다.¹¹⁴ 종종 세정을 위해 효율적인 원격 플라즈마 소스(RPS)와 함께 사용됩니다.²⁷
- **단점:** 여전히 매우 높은 GWP를 가지고 있습니다.²⁸ 저감 중 또는 탄소를 포함하는 공정에서 CF₄ 부산물을 형성할 수 있습니다.²⁴ NF₃의 대기 농도가 증가하고 있습니다.²²

● 분자 불소 (F₂):

- **현황:** 주로 챔버 세정을 위한 신흥 대안으로, 종종 현장에서 생성됩니다.²⁷ 불활성 가스와의 희석 혼합물(예: F₂/N₂/Ar, 종종 FAN 가스라고 함)로 사용됩니다.²²
- **장점:** 사실상 제로 GWP와 매우 짧은 대기 수명을 제공하여 상당한 환경적

이점을 제공합니다.²² 약한 F-F 결합(낮은 해리 에너지²²)으로 인해 반응성이 높아 NF₃ 또는 CF₄ 보다 잠재적으로 훨씬 빠른 세정/식각 속도를 가능하게 합니다.²⁷ 현장 생성은 실린더 취급과 관련된 운송 위험 및 배출을 제거합니다.²⁷ 대규모에서 NF₃ 에 비해 잠재적으로 F 원자당 비용이 저렴합니다.²⁷

- **단점:** 극도로 반응성이 높고 독성이 있어 가스 공급 시스템(부동태화 필요)에 특수 내식성 재료와 엄격한 안전 프로토콜이 필요합니다.²² 현장 생성에는 자본 투자가 필요합니다. 탄화수소 연료를 사용한 저감은 CF₄ 부산물을 생성할 수 있습니다.²⁴ 채택에는 상당한 인프라 변경 및 공정 재인증이 필요합니다.

- **저 GWP 플루오로카본:**

- **현황:** 특정 식각 응용 분야에 대해 조사 중이며 채택 초기 단계에 있습니다. 예로는 헥사플루오로-1,3-부타디엔(C₄F₆, GWP ~0, 수명 ~일)²², 옥타플루오로사이클로펜텐(c-C₅F₈, GWP ~90, 수명 ~1 년)²², 그리고 잠재적으로 헥사플루오로벤젠(C₆F₆, GWP ~7, 수명 ~0.23 년)³⁰ 또는 옥타플루오로테트라하이드로퓨란(C₄F₈O)과 같은 다른 것들이 있습니다.²¹ C₄H₂F₆(GWP ~2.8)³⁰ 과 같은 낮은 GWP 를 가진 하이드로플루오로올레핀(HFO) 또는 하이드로플루오로카본도 탐색 중입니다.
- **장점:** 기존 PFC/HFC 에 비해 GWP 및 대기 수명을 대폭 줄여 장기적인 지속 가능성 목표와 일치합니다.²⁹ 특정 식각 요구 사항에 대해 독특한 플라즈마 화학을 제공할 수 있습니다.
- **단점:** 채택에 상당한 어려움이 있습니다. 플라즈마 화학, 식각 성능(속도, 선택성, 이방성), 부산물 형성 및 재료 호환성을 이해하기 위해 광범위한 R&D 가 필요합니다. 공정 신뢰성과 장치 무결성을 보장하고 새로운 결함이나 고장 메커니즘을 도입하지 않도록 긴 인증 주기(세정의 경우 5-10 년, 식각의 경우 >15-20 년으로 추정²⁶)가 필요합니다.²⁶ 강력하고 고순도의 공급망을 구축하고 잠재적으로 새로운 저감 전략을 개발하는 것도 필요합니다.²⁹ 기존 화학 물질과 비교한 비용 효율성을 입증해야 합니다.

- **공정 최적화 및 기타 전략:** 공정당 사용되는 가스 양을 줄이는 것이 주요 전략으로 남아 있습니다. 여기에는 과도한 세정을 피하기 위해 챔버 세정에 대한 고급 종말점 감지 시스템 구현²¹, 가스 활용 효율을 개선하기 위한 플라즈마 레시피(압력, 전력, 가스 비율) 최적화²¹, 그리고 대체 화학 물질을 사용하거나 더 효율적으로 작동할 수 있는 극저온 식각과 같은 새로운 공정 기술 탐색이 포함됩니다.²³

앞으로 나아갈 길은 복잡한 절충안을 탐색하는 것을 포함합니다. NF3는 세정에서 C2F6 및 CF4와 같은 구형 PFC에서 비교적 성숙한 단계를 제공하지만, 자체적으로 높은 GWP는 장기적인 매력을 제한합니다. F2는 우수한 환경 프로필을 제공하지만 상당한 구현 장애물이 있습니다. 새로운 세대의 저 GWP 플루오로카본은 특히 식각에 대한 가능성을 가지고 있지만, 광범위한 채택에 상당한 기술 및 물류 장벽에 직면해 있습니다. 결과적으로, 기존 공정 최적화, 성능 및 안전성이 허용하는 경우 전략적으로 가스 대체(예: 세정을 위한 NF3 또는 F2), 새로운 저 GWP 식각제의 장기 개발 투자, 그리고 모든 불가피한 배출물의 고효율 저감 보장을 포함한 접근 방식의 조합이 향후 몇 년 동안 F-GHG 배출 관리를 위한 산업 전략을 특징지을 가능성이 높습니다.

6.5 주요 표: CF4 및 주요 대체 화학 물질 비교

이 표는 반도체 플라즈마 공정에 사용되는 CF4 및 주요 대안에 대한 비교 개요를 제공하며, 성능, 환경 영향 및 채택 고려 사항과 관련된 주요 특성을 요약합니다.

표 6.1: 반도체 플라즈마 공정을 위한 CF4 및 주요 대체 화학 물질 비교

화학 물질	GWP (100 년)	대기 수명 (년)	주요 사용 사례	성능 측면 (상대 지표)	주요 채택 요인 (장점 / 단점)

CF4 (사불화탄소)	5,700 - 7,390 ⁵	~50,000 ⁵	식각 (Si, SiO ₂ , Si ₃ N ₄), 챔버 세정	기준 성능; 높은 선택성 가능 (w/ H ₂); 중간 식각 속도.	장점: 성숙한 기술, 잘 이해된 공정, 확립된 공급망. 단점: 극도로 높은 GWP 및 수명, 환경 압력 대상.
NF3 (삼불화질소)	~17,200 ²²	~500 - 740 ²¹	챔버 세정 (주요), 식각	CF ₄ /C ₂ F ₆ 보다 빠른 세정 가능; 높은 해리 효율.	장점: 성숙한 대안, 더 빠른 세정 가능, CF ₄ 보다 낮은 GWP/수명 (그러나 여전히 높음), 좋은 안전 기록. 단점: 매우 높은 GWP, 대기 농도 증가, 저감 시 잠재적 CF ₄ 부산물.
F2 (분자 불소) (현장 / 혼합물)	~0 ²²	~일/주 (고반응성)	챔버 세정, 식각	잠재적으로 가장 빠른 세정/식각 속도; 높은	장점: 제로 GWP, 운송 문제 제거 (현장),

				반응성.	대규모에서 잠재적으로 원자당 비용 저렴. 단점: 고독성/부식 성, 특수 인프라/안전 필요, 현장 생성 비용, 저감 시 잠재적 CF4 부산물 (w/ CH4).
저 GWP FC (예: C4F6, C6 F6, c-C5F8, C4F8O)	<1 - ~100 ²²	~일 - ~1 년 ²²	식각 (주요 대상)	가변적; 맞춤형 선택성/성능 가능성.	장점: 현저히 낮은 GWP/수명, 공정 이점 가능성. 단점: 미성숙 기술, 긴 R&D/인증 시간 (5- 20+년 ²⁶), 공급망 개발 필요, 성능/비용 타당성 광범위하게 미입증, 저감 필요성 평가.

참고: 성능 측면은 일반화된 지표입니다. 실제 속도 및 선택성은 특정 공정 조건 및

재료에 크게 의존합니다. GWP 및 수명 값은 참조된 평가 보고서에 따라 약간 다를 수 있습니다.

7.0 전략적 결론 및 권장 사항

7.1 종합

사불화탄소(CF₄)는 반도체 제조 도구 상자 내에서 중요하고 잘 확립된 위치를 차지합니다. 화학적 식각을 위한 원자 불소(F)와 제어된 중합 및 부동태화를 위한 플루오로카본(CF_x) 라디칼 생성을 특징으로 하는 독특한 플라즈마 화학은 정밀 패턴 식각(특히 이산화규소 및 질화규소)과 필수적인 CVD 챔버 세정 모두에서 효과적인 사용을 가능하게 합니다.¹ H₂ 또는 O₂ 와 같은 가스 첨가를 통해 식각 선택성 및 이방성을 조정하는 능력은 그 다재다능함을 더욱 강조합니다.⁵² 반도체 등급 CF₄ 시장은 상당하며, 글로벌 반도체 산업의 끊임없는 확장, 3D NAND 및 GAA 와 같은 고급 장치 아키텍처의 기술적 요구, 새로운 팹 용량에 대한 상당한 글로벌 투자에 힘입어 지속적인 성장을 준비하고 있습니다.⁶

그러나 이러한 유용성은 상당한 환경 문제에 의해 가려집니다. CF₄ 가 매우 높은 지구 온난화 지수와 수만 년 단위로 측정되는 대기 수명을 가진 과불화탄소라는 지위는 지속 가능성에 전념하는 규제 기관 및 산업 이해 관계자로부터 집중적인 감시를 받게 합니다.⁴ 반도체 산업의 전체 글로벌 GHG 배출 기여도는 상대적으로 작지만, F-GHG 의 높은 영향은 사전 예방적 관리 및 감축 노력을 필요로 합니다.²⁸

7.2 주요 과제

반도체 산업은 CF₄ 사용 및 보다 지속 가능한 관행으로의 전환과 관련하여 몇 가지 주요 과제에 직면해 있습니다:

- **성능 대 환경 절충:** 확립된 CF₄ 기반 공정의 잘 최적화된 성능 특성(식각 속도, 선택성, 이방성, 재료 호환성, 결함률)과 일치하면서 환경 발자국을 현저히 낮추는 대체 화학 물질을 찾는 것은 주요 기술적 장애물로 남아 있습니다.²⁶

- **인증 기간 및 비용:** 고용량 반도체 제조에 새로운 재료나 화학 물질을 도입하려면 신뢰성과 수율이 손상되지 않도록 광범위하고 엄격한 인증 프로세스가 필요합니다. 여기에는 R&D, 테스트 및 공정 통합에 상당한 투자가 포함되어 응용 프로그램의 복잡성(예: 세정 대 중요 식각)에 따라 5 년에서 20 년 이상에 걸쳐 긴 채택 기간이 소요됩니다.²⁶
- **인프라 및 안전:** 분자 불소(F₂)와 같은 대안은 매력적인 환경적 이점을 제공하지만, 높은 반응성 및 독성으로 인해 인프라(현장 생성, 특수 가스 공급 시스템)에 상당한 변경과 강화된 안전 프로토콜이 필요합니다.²²
- **저감 효과 및 부산물:** POU 저감 시스템은 배출 완화에 중요하지만, 다양한 공정 조건 및 가스 혼합물에 걸쳐 높은 DRE 를 보장하는 것은 어렵습니다. 또한, 의도하지 않은 부산물 형성 가능성(예: 다른 불소 공급원의 저감으로 인한 CF₄)은 신중한 관리가 필요합니다.²⁴
- **공급망 성숙도:** 글로벌 반도체 산업에서 요구하는 규모로 초고순도 대체 가스의 안정적이고 신뢰할 수 있으며 비용 효율적인 공급을 보장하는 것은 광범위한 채택에 필수적입니다.

7.3 이해 관계자를 위한 권장 사항

CF₄ 의 미래를 탐색하려면 반도체 가치 사슬 전반에 걸쳐 협력적이고 전략적인 접근 방식이 필요합니다.

- **칩 제조업체(최종 사용자) 대상:**
 - **기존 공정 최적화:** 특히 챔버 세정 주기에 대해 엄격한 레시피 최적화 및 신뢰할 수 있는 종말점 감지 시스템 구현을 통해 현재 공정에서 CF₄ 소비를 최소화하는 것을 우선시합니다.²¹
 - **대안 평가 및 파일럿:** 특정 응용 분야에 대해 대체 화학 물질(NF₃, F₂, 저 GWP FC)을 체계적으로 평가하며, 성능 요구 사항이 더 쉽게 충족될 수 있는 챔버 세정 또는 덜 중요한 식각 단계부터 시작합니다. 성능, 신뢰성 및 비용 효율성을 검증하기 위해 철저한 파일럿 프로그램을 수행합니다.²¹

- **저감 투자:** 모든 관련 F-GHG 배출(잠재적 부산물 포함)에 대해 POU 저감 시스템이 설치되고, 적절하게 유지 관리되며, 최대 DRE 를 위해 최적화되었는지 확인합니다.²¹
- **협력:** 새로운 화학 물질 및 공정 평가 및 인증 중에 가스 공급업체 및 장비 제조업체와 긴밀하게 협력합니다.
- **가스 공급업체 대상:**
 - **순도 및 대안 투자:** $\geq 5N$ 순도 CF₄ 에 대한 증가하는 수요를 충족하기 위해 고급 정제 기술에 지속적으로 투자합니다. 동시에, 순도, 일관성 및 비용 절감에 중점을 두고 실행 가능한 저 GWP 대체 가스(C₄F₆, C₆F₆ 등)에 대한 R&D 를 가속화하고 제조 역량을 확장합니다.⁹
 - **안전한 공급 솔루션 개발:** 특히 현장 생성 F₂ 또는 새로운 저 GWP 분자와 같은 까다로운 가스에 대해 안전하고 효율적인 저장 및 공급 시스템을 혁신합니다.²⁷
 - **기술 지원 제공:** 공정 통합 및 최적화 지침을 포함하여 대체 화학 물질로 전환하는 고객에게 포괄적인 기술

참고 자료

1. Tetrafluoromethan-CF₄ - Specialty Gases - Messer Group, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.messergroup.com/web/specialty-gases/tetrafluoromethan>
2. Carbon tetrafluoride plasma treatment-CF₄ Plasma, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.cnplasma.com/knowledge-base/cf4.html>
3. Plasma etching-A discussion of mechanisms - JW Coburn and Harold F. Winters - AIP Publishing, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://pubs.aip.org/avs/jvst/article-pdf/16/2/391/11825372/391_1_online.pdf
4. Semiconductor Industry | US EPA, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.epa.gov/eps-partnership/semiconductor-industry>
5. www.ipcc-nggip.iges.or.jp, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/3_6_PFC_HFC_NF3_SF6_Semiconductor_Manufacturing.pdf

6. Market-Research-Report-List-1/semiconductor-grade-carbon-tetrafluoride-market.md at main - GitHub, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://github.com/sentoljinqiu/Market-Research-Report-List-1/blob/main/semiconductor-grade-carbon-tetrafluoride-market.md>
7. Carbon Tetrafluoride Market Research Report 2032 - Dataintelo, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://dataintelo.com/report/global-carbon-tetrafluoride-market>
8. Global Semiconductor Grade Carbon Tetrafluoride Market Research Report By Product Type (High Purity, Ultra High Purity), By Application (Etching, Cleaning, Thin Film Deposition), By End User (Integrated Circuit Manufacturers, MEMS Manufacturers), By Technology (Chemical Vapor Deposition, Physical Vapor Deposition), By Distribution Channel (Direct Sales, - Exactitude Consultancy, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://exactitudeconsultancy.com/ja/reports/55023/global-semiconductor-grade-carbon-tetrafluoride-market>
9. Electronic Grade CF4 Market Size, Growth and Analysis Report - 2033, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://datahorizonresearch.com/electronic-grade-cf4-market-14549>
10. Gas Scrubber for Semiconductor Market Size, Share and Forecast 2032 - Credence Research, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.credenceresearch.com/report/gas-scrubber-for-semiconductor-market>
11. Semiconductor Equipment Market Expected to Grow Despite Decline in Fab Spending, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://techcet.com/semiconductor-equipment-market-expected-to-grow-despite-decline-in-fab-spending/>
12. Global Semiconductor Fab Capacity Projected to Expand 6% in 2024 and 7% in 2025, SEMI Reports, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.semi.org/en/news-media-press-releases/semi-press-releases/global-semiconductor-fab-capacity-projected-to-expand-6%25-in-2024-and-7%25-in-2025-semi-reports>
13. Semiconductor fabs: Construction challenges in the United States - McKinsey & Company, 4 월 28, 2025 에 액세스,

<https://www.mckinsey.com/industries/industrials-and-electronics/our-insights/semiconductor-fabs-construction-challenges-in-the-united-states>

14. 9 Key Statistics on New Semiconductor Fabs Being Built Around the World - Z2Data, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.z2data.com/insights/9-statistics-on-new-semiconductor-fabs-being-built>
15. CF4 Carbon Tetrafluoride VLSI - Merck KGaA, Darmstadt, Germany, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.emdgroup.com/en/expertise/semiconductors/offering/carbon-tetrafluoride-vlsi.html>
16. Etching Gas Market Size & Future Growth 2032 - WiseGuy Reports, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.wiseguyreports.com/reports/etching-gas-market>
17. Gate-All-Around (GAA) - Applied Materials, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.appliedmaterials.com/il/en/semiconductor/markets-and-inflections/advanced-logic/gaa.html>
18. Market-Research-Report-List-1/high-purity-carbon-tetrafluoride-market.md at main - GitHub, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://github.com/ishikodehira/Market-Research-Report-List-1/blob/main/high-purity-carbon-tetrafluoride-market.md>
19. Semiconductor Grade Carbon Tetrafluoride - Market, Report Size, Worth, Revenue, Growth, Industry Value, Share 2024, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://reports.valuates.com/market-reports/QYRE-Auto-4K9988/global-semiconductor-grade-carbon-tetrafluoride>
20. Less Is More: Efficient Use of Resources in the Semiconductor Industry, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.das-ee.com/en/sustainable-innovations/weniger-ist-mehr-effiziente-ressourcennutzung-in-der-halbleiterbranche/>
21. Intermediate Status Report of the Progress towards the Reduction of Perfluorocompound (PFC) Emissions from European Semiconductor Manufacturing - eusemiconductors.eu, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://www.eusemiconductors.eu/sites/default/files/uploads/20070222_EECA-PFC-Brochure.pdf
22. Green ICT – Plasma process alternatives to substitute PFCs, SF and NF -

SEMI.org, 4 월 28, 2025 에 액세스,

<https://www.semi.org/sites/semi.org/files/2022-11/11%20Robert%20Wieland%20Fraunhofer%20NEW.pdf>

23. Chamber Cleaning Optimizations Can Reduce Carbon Emissions by 32%, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://newsroom.lamresearch.com/chamber-clean-cuts-co-32-percent?blog=true>
24. Mechanisms for the unintentional formation of CF₄ during Semiconductor Manufacturing, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://sesha.org/abstract/mechanisms-for-the-unintentional-formation-of-cf4-during-semiconductor-manufacturing/>
25. Protocol for Measuring Destruction or Removal Efficiency (DRE) of Fluorinated Greenhouse Gas Abatement Equipment in Electronics - Environmental Protection Agency (EPA), 4 월 28, 2025 에 액세스, https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-02/documents/dre_protocol.pdf
26. Chip Production's Ecological Footprint: Mapping Climate and Environmental Impact, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.interface-eu.org/publications/chip-productions-ecological-footprint>
27. Electronics gases - Linde, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://assets.linde.com/-/media/global/global-gases/global-industrial-gases/documents/industries/electronics/electronics-gases-going-green-in-gasworld-june-2014_tcm17-419006.pdf
28. Environmental-Friendly Fluorine Mixture for Cvd Cleaning Processes to Replace C₂F₆ and N₂F₄ under Industrial Conditions - Scientific Research and Community, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.onlinescientificresearch.com/articles/environmentalfriendly-fluorine-mixture-for-cvd-cleaning-processes-to-replace-c2f6-and-nf3-under-industrial-conditions.pdf>
29. Solving Semiconductor Greenhouse Gas Chemistry Challenges - 3D InCites, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.3dincites.com/2023/09/solving-semiconductor-greenhouse-gas-chemistry-challenges/>
30. Characterization of SiO₂ Plasma Etching with Perfluorocarbon (C₄F₈ and C₆F₆) and Hydrofluorocarbon (CHF₃ and C₄H₂F₆) Precursors for the Greenhouse Gas

Emissions Reduction, 4 월 28, 2025 에 액세스,

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10456486/>

31. How is semiconductor manufactured? - RayPCB, 4 월 28, 2025 에 액세스,

<https://www.raypcb.com/manufacturing-semiconductor/>

32. Semiconductor Manufacturing - Processes | Haz-Map, 4 월 28, 2025 에 액세스,

<https://haz-map.com/Processes/97>

33. [Semiconductor Encyclopedia] The Eight Essential Semiconductor Processes at a Glance, 4 월 28, 2025 에 액세스,

<https://semiconductor.samsung.com/us/support/tools-resources/fabrication-process/semiconductor-encyclopedia-the-eight-essential-semiconductor-fabrication-processes-at-a-glance/>

34. What Gases Are Used in Semiconductor Fabrication? - Environics, Inc., 4 월 28,

2025 에 액세스, <https://www.environics.com/2025/03/25/gases-used-semiconductor-fabrication/>

35. Carbon Dioxide in Semiconductor Manufacturing - Linde, 4 월 28, 2025 에

액세스, https://assets.linde.com/-/media/global/global-gases/global-industrial-gases/documents/industries/electronics/carbon-dioxide-in-semiconductor-manufacturing-specialty-gas-report-may-2016_tcm17-419010.pdf

36. Semiconductor Industry | Fluorinated Gas Partnership Programs - US EPA, 4 월

28, 2025 에 액세스, https://19january2021snapshot.epa.gov/f-gas-partnership-programs/semiconductor-industry_.html

37. CF₄ for Silicon Etching in Semiconductor Technology - Yujichem | Specializing in Ecofriendly Fluorine Chemicals, 4 월 28, 2025 에 액세스,

<https://www.yujichemtech.com/cf4-for-silicon-etching-in-semiconductor-technology/>

38. High Purity Carbon Tetrafluoride CF₄ Gas for Semiconductor Industry Etching,

4 월 28, 2025 에 액세스, <https://taiyugas.en.made-in-china.com/product/uEFRUhflqQWk/China-High-Purity-Carbon-Tetrafluoride-CF4-Gas-for-Semiconductor-Industry-Etching.html>

39. Tetrafluoromethane Gas (CF₄) - EFC Gases & Advanced Materials, 4 월 28,

2025 에 액세스, <https://www.efcgases.com/product/tetrafluoromethane/>

40. CF₄-Haohua Gas Co., Ltd. Electronic Special Gas/Fluorinated Fine Chemicals/Industry Gas and Calibration gas, 4 월 28, 2025 에 액세스, http://en.haohua-gas.com/business_details/978599959087964160.html
41. Carbon Tetrafluoride CF₄ R14 Gas, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.nrdgas.com/carbon-tetrafluoride-cf4-r14-gas-product/>
42. CF₄ Carbon Tetrafluoride CAS No.75-73-0 - Elements China, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.elementschina.com/carbon-tetrafluoride-cf4.html>
43. High-Purity FC-14 (CF₄) - Resonac, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.resonac.com/products/semi-frontend-process/61/2015.html>
44. Electronic Grade High Purity 5n 99.999% Tetrafluoromethane CF₄ for Semiconductor Industry, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://taiyugas.en.made-in-china.com/product/AduTKEnMOzay/China-Electronic-Grade-High-Purity-5n-99-999-Tetrafluoromethane-CF4-for-Semiconductor-Industry.html>
45. Carbon tetrafluoride 99.9 75-73-0 - MilliporeSigma, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.sigmaaldrich.com/US/en/product/aldrich/295736>
46. What is Plasma Etching and why it is Important for Product Development ? - Thierry Corporation, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.thierry-corp.com/plasma-treatment-articles/what-is-plasma-etching-and-why-it-is-important-for-product-development>
47. Plasma cleaner machine and plasma cleaning process - PIE Scientific LLC, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://piescientific.com/resource_pages/resource_plasma_cleaning/
48. (PDF) Fast Etching of Molding Compound by an Ar/O₂/CF₄ Plasma and Process Improvements for Semiconductor Package Decapsulation - ResearchGate, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://www.researchgate.net/publication/273648346_Fast_Etching_of_Molding_Compound_by_an_ArO2CF4_Plasma_and_Process_Improvements_for_Semiconductor_Package_Decapsulation
49. Surface Analysis of Chamber Coating Materials Exposed to CF₄ /O₂ Plasma - MDPI, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.mdpi.com/2079-6412/11/1/105>
50. A survey on the reactive ion etching of silicon in microtechnology -

<https://ris.utwente.nl>, 4 월 28, 2025 에 액세스,

https://ris.utwente.nl/ws/files/6646043/JMMME_6_14.pdf

51. A survey on the reactive ion etching of silicon in microtechnology -

<https://ris.utwente.nl>, 4 월 28, 2025 에 액세스,

<https://ris.utwente.nl/ws/files/5466474/Jansen95survey.pdf>

52. Reactive Ion Etching of Silicon and Silicon Dioxide in CF₄ Plasmas Containing H₂ or C₂F₄ Additives - CiteSeerX, 4 월 28, 2025 에 액세스,

<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=9d639fb42dded018933d4c81e0581fa504ec345f>

53. On Relationships between Plasma Chemistry and Surface Reaction Kinetics Providing the Etching of Silicon in CF₄, CHF₃, and C₄F₈ Gases Mixed with Oxygen - PMC, 4 월 28, 2025 에 액세스,

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10383355/>

54. Selective Etching of Thick Si₃N₄, SiO₂ and Si by Using CF₄/O₂ and C₂F₆ Gases - Journal of the Korean Physical Society, 4 월 28, 2025 에 액세스,

https://www.jkps.or.kr/journal/download_pdf.php?doi=10.3938/jkps.54.1816

55. Plasma Parameters and Etching Characteristics of SiO_xN_y Films in CF₄ + O₂ + X (X = C₄F₈ or CF₂Br₂) Gas Mixtures, 4 월 28, 2025 에 액세스,

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7730825/>

56. Study of the SiO₂-to-Si₃N₄ etch selectivity mechanism in inductively coupled fluorocarbon plasmas and a - Pure, 4 월 28, 2025 에 액세스,

<https://pure.tue.nl/ws/files/1403534/1010745160651127.pdf>

57. (PDF) Role of Fluorocarbon Film Formation in the Etching of Silicon, Silicon Dioxide, Silicon Nitride, and Amorphous Hydrogenated Silicon Carbide - ResearchGate, 4 월 28, 2025 에 액세스,

https://www.researchgate.net/publication/228580751_Role_of_Fluorocarbon_Film_Formation_in_the_Etching_of_Silicon_Silicon_Dioxide_Silicon_Nitride_and_Amorphous_Hydrogenated_Silicon_Carbide

58. Highly Chemical Reactive Ion Etching of Silicon in CF₄ Containing Plasmas - ResearchGate, 4 월 28, 2025 에 액세스,

https://www.researchgate.net/publication/238513186_Highly_Chemical_Reactive_

[Ion Etching of Silicon in CF4-Containing Plasmas](#)

59. Spectroscopic Analysis of CF₄/O₂ Plasma Mixed with N₂ for Si₃N₄ Dry Etching - MDPI, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.mdpi.com/2079-6412/12/8/1064>
60. (PDF) Effect of H₂ addition on surface reactions during CF₄/H₂ plasma etching of silicon and silicon dioxide films - ResearchGate, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://www.researchgate.net/publication/241316636_Effect_of_H2_addition_on_surface_reactions_during_CF4H2_plasma_etching_of_silicon_and_silicon_dioxide_films
61. PFAS-Containing Fluorochemicals Used in Semiconductor Manufacturing Plasma-Enabled Etch and Deposition, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2023/06/FINAL-Plasma-Etch-and-Deposition-White-Paper.pdf>
62. Silicon wafer cleaning with CF₄/H₂ plasma and its effect on the properties of dry thermally grown oxide - SciSpace, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://scispace.com/papers/silicon-wafer-cleaning-with-cf4-h2-plasma-and-its-effect-on-5e79g0uk78>
63. CF₄/H₂ Plasma Cleaning of Graphene Regenerates Electronic Properties of the Pristine Material - ACS Publications, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsanm.8b02249>
64. Residue when etching SiO₂ using CF₄ plasma? - ResearchGate, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://www.researchgate.net/post/Residue_when_etching_SiO2_using_CF4_plasma
65. Influence of the additives argon, O₂, C₄F₈, H₂, N₂ and CO on plasma conditions and process results during the etch of SiCOH in CF₄ plasma | Request PDF - ResearchGate, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://www.researchgate.net/publication/229383382_Influence_of_the_additives_argon_O2_C4F8_H2_N2_and_CO_on_plasma_conditions_and_process_results_during_the_etch_of_SiCOH_in_CF4_plasma
66. Optimization of silicon etch rate in a CF₄/Ar/O₂ inductively coupled plasma - ResearchGate, 4 월 28, 2025 에 액세스,

https://www.researchgate.net/publication/360019173_Optimization_of_silicon_etch_rate_in_a_CF4ArO2_inductively_coupled_plasma

67. Selective Etching of Silicon Dioxide Using Reactive Ion Etching with CF₄-H₂ - CiteSeerX, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=f3d5d31dab6b8469c64dd7f8f3386fa7aad5597>
68. selective reactive ion etching of silicon oxide in cf₄/h₂ mixtures at, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.ispc-conference.org/ispcdocs/ispc9/content/9/09-1051.pdf>
69. Electronic Grade Purity 99.999% Carbon Tetrafluoride CF₄ Gas - Alibaba.com, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://www.alibaba.com/product-detail/Electronic-Grade-Purity-99-999-Carbon_1601198178338.html
70. Industrial Electronic Grade 99.999% Tetrafluoromethane / Carbon Tetrafluoride CF₄ Gas, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://ruiming02.en.made-in-china.com/product/PQXRFlgxXyhe/China-Industrial-Electronic-Grade-99-999-Tetrafluoromethane-Carbon-Tetrafluoride-CF4-Gas.html>
71. NF₃ < Cleaning Gases < Business < SK materials, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.sk-materials.com/new/eng/html/products/nf3.asp>
72. Carbon Tetrafluoride Cf₄(101+) - Alibaba.com, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.alibaba.com/showroom/carbon-tetrafluoride-cf4.html>
73. C00340 - SEMI C3.40 - Specification for Carbon Tetrafluoride (CF₄), 99.997% Quality, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://store-us.semi.org/products/c00340-semi-c3-40-specification-for-carbon-tetrafluoride-cf4-99-997-quality>
74. Worldwide Ultra High Purity Carbon Tetrafluoride (CF₄) Market, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://pmarketresearch.com/product/worldwide-high-purity-fluoroform-market-research-2024-by-type-application-participants-and-countries-forecast-to-2030/worldwide-ultra-high-purity-carbon-tetrafluoride-cf4-market-research-2024-by-type-application-participants-and-countries-forecast-to-2030>
75. Global High Purity Tetrafluoromethane Market Research Report By, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://exactitudeconsultancy.com/pt/reports/52756/global->

[high-purity-tetrafluoromethane-market](#)

76. Ultra High Purity Carbon Tetrafluoride (CF₄) Market Size, Share, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.openpr.com/news/3671599/ultra-high-purity-carbon-tetrafluoride-cf4-market-size-share>
77. Background on Semiconductor Manufacturing and PFAS, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2023/05/FINAL-PFAS-Consortium-Background-Paper.pdf>
78. Leading global industrial gases and engineering company | Linde, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.linde-gas.com/>
79. Market Characterization of the U.S. Semiconductor Industry - Environmental Protection Agency, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-03/documents/epa-hq-oar-2021-0044-0002_attachment_3-semiconductors.pdf
80. Air Liquide: A world leader in gases, technologies and services for ..., 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.airliquide.com/>
81. High-Purity Gas | Products - Resonac, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.resonac.com/products/semi-frontend-process/61>
82. Semi Frontend Process | Products - Resonac, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.resonac.com/products/semi-frontend-process>
83. 1 월 1, 1970 에 액세스, <https://www.resonac.com/en/>
84. Fluoro-chemicals | Products | Kanto Denka Kogyo Co., Ltd. - 関東電化工業, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.kantodenka.co.jp/english/product/gas/>
85. Integrated Report, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://www.kantodenka.co.jp/english/sustainability/pdf/integrated_report_2023_en.pdf
86. Sulfur Hexafluoride Market Growth, And Opportunities (2023-2030), 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.contrivedatuminsights.com/product-report/sulfur-hexafluoride-market-248399/>
87. 1 월 1, 1970 에 액세스, <https://www.kantodenka.co.jp/en/>
88. US20060194985A1 - Process for producing carbonyl fluoride - Google Patents, 4 월 28, 2025 에 액세스,

<https://patents.google.com/patent/US20060194985A1/en>

89. CF4 Carbon Tetrafluoride VLSI - Merck KGaA, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.merckgroup.com/de/expertise/semiconductors/offering/carbon-tetrafluoride-vlsi.html>
90. Semiconductor Solutions - Merck KGaA, Darmstadt, Germany, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.emdgroup.com/en/expertise/semiconductors.html>
91. Air Products: Home | Industrial Gas Supplier, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.airproducts.com/>
92. Haohua Gas Co., Ltd. Electronic Special Gas/Fluorinated Fine ..., 4 월 28, 2025 에 액세스, <http://en.haohua-gas.com/>
93. Carbon Tetrafluoride CF4 - Chengdu Hongjin Chemical Co., Ltd. - page 1., 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://hongjingas.en.made-in-china.com/product-group/kMIGiSrohDTV/Carbon-Tetrafluoride-CF4-1.html>
94. Global Semiconductor Sales Increase 19.1% in 2024; Double-Digit Growth Projected in 2025, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.semiconductors.org/global-semiconductor-sales-increase-19-1-in-2024-double-digit-growth-projected-in-2025/>
95. 2025 global semiconductor industry outlook - Deloitte, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/technology/technology-media-telecom-outlooks/semiconductor-industry-outlook.html>
96. America Projected to Triple Semiconductor Manufacturing Capacity by 2032, the Largest Rate of Growth in the World, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.semiconductors.org/america-projected-to-triple-semiconductor-manufacturing-capacity-by-2032-the-largest-rate-of-growth-in-the-world/>
97. Semiconductor Gases Market Report 2025, Growth And Industry Analysis, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/semiconductor-gases-global-market-report>
98. GAA FET Technology Market 2020 - 2025 - IndustryARC, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.industryarc.com/Report/19199/GAA-FET-technology-market.html>

99. FinFET 3D Transistors Market Size, Growth Analysis 2025-2034, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.gminsights.com/industry-analysis/finfet-3d-transistors-market>
100. Global Semiconductor Industry Outlook for 2025 - KPMG International, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://kpmg.com/us/en/articles/2024/global-semiconductor-industry-outlook-2025.html>
101. Process Optimization of Amorphous Carbon Hard Mask in Advanced 3D-NAND Flash Memory Applications - MDPI, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/12/1374>
102. Reduced amount of contamination particle generated by CF₄/Ar/O₂ plasma corrosion of Y₂O₃ materials: Influence of defluorination process | Request PDF - ResearchGate, 4 월 28, 2025 에 액세스, https://www.researchgate.net/publication/375168496_Reduced_amount_of_contamination_particle_generated_by_CF4ArO2_plasma_corrosion_of_Y2O3_materials_Influence_of_defluorination_process
103. Process Technology - Logic Node | Foundry | Samsung Semiconductor Global, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://semiconductor.samsung.com/foundry/process-technology/logic-node/>
104. A view on the logic technology roadmap | imec, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.imec-int.com/en/articles/view-logic-technology-roadmap>
105. Gate-All-Around FET Technology Market Size, Share 2021-2030, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.strategicmarketresearch.com/market-report/-gaafet-technology-market>
106. CMOS Scaling for the 5 nm Node and Beyond: Device, Process and Technology - MDPI, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.mdpi.com/2079-4991/14/10/837>
107. Final Programmatic Environmental Assessment for Modernization and Expansion of Existing Semiconductor Fabrication Facilities under the CHIPS Incentives Program, 4 월 28, 2025 에 액세스, <https://www.nist.gov/system/files/documents/2024/06/28/Final%20PEA%20for%20Modernization%20and%20Expansion%20of%20Semiconductor%20Fabs%206->

[28-2024%20-%20OGC-508C.pdf](#)

108. Future of plasma etching for microelectronics: Challenges and opportunities - Mark Kushner Group, 4 월 28, 2025 에 액세스,
https://cpseg.eecs.umich.edu/pub/articles/JVSTB_42_041501_2024.pdf
109. ThE EuRoPEAn SEmIConduCToR InduSTRy'S VolunTARy AgREEmEnT To REduCE 'PERFluoRoComPound' EmISsIonS - eusemiconductors.eu, 4 월 28, 2025 에 액세스,
https://www.eusemiconductors.eu/sites/default/files/uploads/20111214_ESIA_PerfluoroBrochure.pdf
110. ISD/OGGMB-149 Semiconductor Operations Reporting Form, Title 17, California Code of Regulation, Section 95325, 4 월 28, 2025 에 액세스,
https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-05/ISD_OGGMB_149_semiconductor_operations_reporting_form%20%282%29.pdf
111. Electronics Manufacturing Technical Support Document - US EPA, 4 월 28, 2025 에 액세스,
https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2015-02/documents/subpart-i_techsupportdoc.pdf
112. Concise Explanatory Statement - Chapter 173-441 WAC Reporting of Emissions of Greenhouse Gases - Washington State Department of Ecology, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://apps.ecology.wa.gov/publications/documents/1002038a.pdf>
113. Plasma abatement of perfluorocompounds in inductively coupled plasma reactors | Request PDF - ResearchGate, 4 월 28, 2025 에 액세스,
https://www.researchgate.net/publication/224445153_Plasma_abatement_of_perfluorocompounds_in_inductively_coupled_plasma_reactors
114. Safety and Environmental Considerations of NF3 and F2 Chamber Cleans for Thin Film Silicon Solar Cells - ResearchGate, 4 월 28, 2025 에 액세스,
<https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=55a3afdf60614b26868b45a1&assetKey=AS%3A273811474190343%401442293150783>
115. An Approach to Reduce Greenhouse Gases in the Semiconductor Industry

Using F2 Dissociated in Plasma for CVD Chamber Cleaning - Fraunhofer-Publica, 4 월 28, 2025 에 액세스,

<https://publica.fraunhofer.de/bitstreams/231e6747-1dfb-4adb-ab10-bf4078d1d5a9/download>

116. The life-cycle environmental impacts of etching silicon wafers and (PE)CVD chamber cleaning - TNO (Publications), 4 월 28, 2025 에 액세스,

<https://publications.tno.nl/publication/34631048/R298TI/m08079.pdf>

117. Cleaning process in high density plasma chemical vapor deposition - Drexel Research Discovery, 4 월 28, 2025 에 액세스,

https://researchdiscovery.drexel.edu/view/pdfCoverPage?instCode=01DRXU_INST&filePid=13321546590004721&download=true

118. Carbon footprint of PECVD chamber cleaning - TNO (Publications), 4 월 28, 2025 에 액세스,

<https://publications.tno.nl/publication/34633336/VIM506/w08063.pdf>

119. CHAPTER 6 ELECTRONICS INDUSTRY EMISSIONS - Task Force on National Greenhouse Gas Inventories, 4 월 28, 2025 에 액세스, [https://www.ipcc-](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/3_Volume3/V3_6_Ch6_Electronics_Industry.pdf)

https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/3_Volume3/V3_6_Ch6_Electronics_Industry.pdf