

GIST, 획기적 친환경 건식 포토레지스트 개발 차세대 반도체 공정 지속가능성·효율성 향상 기대

- 화학과 홍석원 교수팀, 국내 독자 기술 활용하여 단순 열처리만으로 고해상도 극자외선(EUV) 패터닝 구현하는 혁신적인 친환경 열 기반 건식 포토레지스트 개발
- 친환경적·경제적인 차세대 나노 미세 집적회로 제조 공정 제시함으로써 지속 가능성 높이고 EUV 리소그래피 해상도·생산성·수율 개선 기대... 국제학술지 《Small》 게재



▲ (왼쪽부터) 화학과 홍석원 교수, 김도원 박사과정생, 변진환 박사, 안재봉 석사

국내 연구진이 **단순한 열처리만으로 구현 가능한 혁신적인 친환경 건식 포토레지스트***를 개발했다. 이는 기존 공정의 한계를 극복하고, 차세대 나노 미세 집적회로 제조에 **친환경적이면서도 경제적인 공정을 제안함으로써 반도체 제조 공정의 지속 가능성과 효율성 향상에** 기여할 것으로 기대된다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 화학과 홍석원 교수 연구팀이 포항가속기연구소(PAL) 황찬국 박사 연구팀과의 공동연구를 통해 **나노 미세 집적회로 제작을 위한 극자외선(EUV)* 반응 포토레지스트를 개발**하고, PAL 10D 빔라인의 EUV를 이용하여 나노 패턴을 구현함으로써 **친환경 열기반 건식공정법을 개발**했다고 밝혔다.

* **포토레지스트(photoresist)**: 미세한 회로 패턴을 형성하기 위해 사용되는 감광성(빛에 반응하는) 고분자 재료이다. 일반적으로 자외선(UV), 심자외선(DUV), 극자외선(EUV), 전자빔(e-beam) 등 특정 파장의 빛을 조사하면 화학적 변화를 일으켜 선택적으로 용해되거나 경화되는 특성을 가진다.

* **극자외선(extreme ultraviolet)**: 엑스레이(X-ray)와 심자외선(Deep UV) 스펙트럼 영역 사이인 대략 10~100나노미터(nm·1nm는 10억분의 1m) 파장 대역의 빛이다. 고해상도 이미징, 분광법 및 소재 가공 용도 등 정밀한 작업에서 강점을 갖고 있으며, 특히 극자외선 장비는 반도체 노광 공정 단계를 줄여 생산성을 획기적으로 높일 수 있다.

극자외선(EUV) 리소그래피*는 13.5나노미터 파장의 빛으로 실리콘 웨이퍼에 머리카락보다 훨씬 미세한 회로 패턴을 새겨 넣어 **차세대 전자기기의 성능 향상에 핵심적인 역할**을 하는 **최첨단 반도체 제조 기술**이다.

회로 패턴이 점점 미세해짐에 따라 기존의 습식 공정법으로는 극자외선 포토레지스트의 미세 패턴이 액체 화학물질의 표면 장력 때문에 무너질 위험이 있다. 이는 해상도* 저하와 라인 엣지 거칠기(Line Edge Roughness, LER)* 증가와 같은 품질 문제로 이어지며, 소자의 미세화가 진행될수록 더욱 심각해진다.

* 리소그래피(lithography): 전자 소자의 제조 과정에서 미세한 회로 패턴을 형성하는 핵심 공정이다. 포토레지스트(photoresist)와 특정 파장의 빛(자외선, 극자외선, 전자빔 등)을 사용하여 원하는 패턴을 기판(wafer)에 형성하는 기술이다.

* 해상도(Resolution): 포토리소그래피 공정에서 마스크 패턴을 웨이퍼에 노광할 때 전사될 수 있는 최소 크기를 의미합니다. 즉, 구현할 수 있는 최소 선폭의 한계를 나타내며, 해상도가 좋을수록 더 미세한 패턴을 정확하게 형성할 수 있다.

* Line Edge Roughness(LER): 패턴의 가장자리가 이상적인 직선에서 벗어나는 정도를 나타낸다. 즉, 패턴 가장자리의 미세한 요철이나 불규칙성을 의미한다. 이러한 불규칙성은 전기적 특성에 영향을 미쳐 소자의 성능과 신뢰성을 저하시킬 수 있다.

건식 공정법은 리소그래피 공정에서 유해 물질인 솔벤트의 사용을 줄여 패턴 붕괴를 막고, 보다 높은 해상도의 패턴을 구현할 수 있어 차세대 기술로 주목받고 있다.

그러나 기존 건식 공정법은 전용 장비가 필요하고 비용이 많이 들 뿐만 아니라 유해 화학 물질인 에천트(Etchant)* 사용으로 인한 환경 및 안전 문제도 안고 있어 새로운 기술 개발이 필요하다.

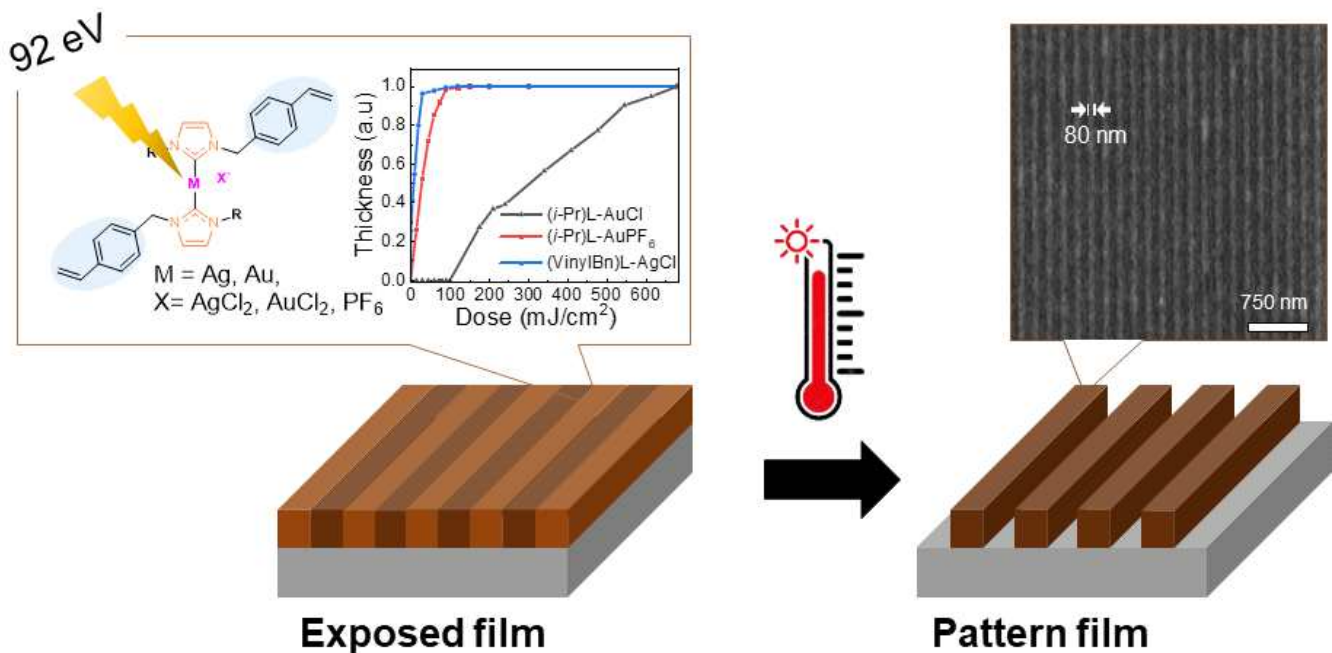
* 솔벤트: 다른 물질을 용해시키기 위해 사용하는 물질로 독성과 휘발성이 강해 피부 접촉 시 화상을 유발한다.

* 에천트(etchant): 반도체 회로 제작 중에 특정 물질을 선택적으로 제거하기 위해 사용되는 화학 물질이다. 반도체 제조 공정에서 웨이퍼(기판)에 형성된 특정 박막층(산화막, 금속막 등)을 선택적으로 제거하는 공정에서 기판(wafer) 위의 박막층을 원하는 패턴으로 정밀하게 깎아내는 역할을 한다.

연구팀은 자체 개발한 포토레지스트를 활용해 100 mJ/cm² 이하의 노광량*에서도 충분히 반응하여 더 이상 추가적인 변화가 없는 상태에 도달하는, 뛰어난 극자외선 감도를 지닌 물질을 합성하였고, 여기에 최적화된 열기반 건식 공정법을 통해 80 nm 수준의 나노 패턴을 구현하는 데 성공하였다.

기존의 에천트를 사용하지 않는 건식 공정법은 유기물 기반 단분자 구조에서 낮은 EUV 흡광도로 인해 패터닝 효율이 제한적이었으며, 고분자 구조에서는 건식 현상 과정의 어려움으로 인해 구현 가능한 패턴의 크기와 감도에 한계가 있었다.

* 노광량: 리소그래피(lithography) 공정에서 감광성 물질이 희망 패턴을 형성하기 위해 필요로 하는 빛의 총 에너지



▲ 열기반 건식 현상 포토레지스트 개발. 자체 개발한 극자외선(EUV) 포토레지스트의 EUV 흡광도를 확인했으며 극자외선(EUV)으로 인한 고분자 형성을 이용한 열기반 건식 공정법을 개발해 80 nm 수준의 패턴 구현에 성공함.

연구팀이 개발한 **N-헤테로고리 화합물 구조***는 우수한 안정성을 갖추면서도 금속-리간드 결합을 형성할 수 있다. 금속-리간드 구조를 최적화하여 뛰어난 광반응성과 승화성을 확보했으며, 새로운 열기반 건식 공정법을 적용함으로써 높은 감도를 유지하면서도 나노 패턴을 구현할 수 있음을 확인했다.

그 결과, **90 mJ/cm²**의 감도를 지닌 물질을 건식 공정에 적용하여 **80 nm** 수준의 패턴을 구현했으며, 이 독창적인 기술을 바탕으로 국제 특허(PCT) 2건을 출원했다.

* **N-헤테로고리 화합물 구조:** N-헤테로고리 카빈(NHC, N-Heterocyclic Carbene)은 질소(N)를 포함하는 헤테로고리 구조를 가진 카빈(Carbene, :C-) 리간드이다. NHC는 강력한 루이스 염기성(Lewis Basicity)와 안정성을 가지며, 유기 촉매, 금속 촉매, 유기전자소재 등에 널리 사용된다.

홍석원 교수는 "이번 연구 성과는 국내 독자 기술을 활용하여 간단한 열처리 공정만으로 고해상도 EUV 패턴링을 구현했으며, 이를 통해 혁신적인 친환경 열기반 건식 포토레지스트를 개발했다는 점에서 큰 의의가 있다"면서 "이러한 건식 포토레지스트 공정은 기존 공정에 비해 원자재 사용량을 줄이고 친환경 공정법을 적용함으로써 지속 가능성을 높이며, EUV 리소그래피의 해상도, 생산성, 수율 개선에 기여할 것으로 기대된다"고 말했다.

GIST 홍석원 교수가 지도하고 포항가속기연구소 황찬국 박사가 공동 교신저자로 참여한 가운데 GIST 김도원 박사과정생, 변진환 박사, 안재봉 석사가 공동 제1저자로 수행한 이번 연구는 과학기술정보통신부와 한국연구재단의 나노·소재기술개발사업으로 연구비를 지원받아 미래 건식공정의 핵심기술을 개발하는 것을 목표로 수행되었으며, 연구 결과는 국제학술지 《Small》에 2025년 1월 23일 온라인 게재되었다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : small (IF: 13.0, 2024년 기준)
- 논문명 : Etchant-free Dry-developable Extreme Ultraviolet Photoresist Materials Utilizing N-Heterocyclic Carbene–Metal Complexes
- 저자 정보 : 김도원(제1저자, GIST), 변진환(공동 제1저자, GIST), 안재봉 (공동 제1저자, GIST), 황찬국(교신저자, 포항가속기연구소), 홍석원(교신저자, GIST)