10나노급 초미세 나노 전사 프린팅 기술

나노전사 인쇄 기술은 트랜지스터, 메타물질, 피부 센서 및 여러 차세대 소자의 생산에 있어서 뛰어난 공정 단순성과 양산성을 제공할 수 있는 매우 유용한 기술이다. 하지만 50나노 이하 급의 미세 프린팅 기술은 패턴의 복제와 전사가 모두 물리적으로 어려워 그동안 개발되지 못하고 있었다. 본 연구진은 10나노급 미세 패턴의 복제 능력이 탁월한 이중층 고분자를 활용하고, 표면 접착력을 선택적으로 약화시켜 인쇄하는 원리를 최초로 고안하여, 거의 모든 표면에 적용 가능한 초미세 인쇄 기술을 구현하는 데 성공하였다. 이번에 개발된 기술을 활용하여 연구팀은 폭발성 가스의 빠른 감지 기능이 있는 고성능 가스 센서를 인쇄 방식으로 제조하여 동작시켰으며, 또한 과일표면에 존재하는 극미량의 잔류 농약을 비파괴적으로 빠르게 검출하는 데에도 성공하였다.

신소재공학과
정 연 식

● 인쇄전자(Printed Electronics)는 프린팅 공정기법으로 만들어지는 전자소자를 의미하며 저가의 기판 위에서 자동화된 공정으로 프린팅 되는 소자로서 저가격, 친환경, 유연성, 대면적 대량생산, 저온/단순공정 등의 장점을 가지고 있으며, 다양한 제품군으로 널리 활용될 것으로 기대되고 있다. 특히, 나노기술을 기반으로 한 인쇄전자 기반공정 기술은 RFID, 메모리, 디스플레이, 전지, 조명, 센서, 유기트랜지스터 등의 새로운 제품군에서 널리 활용될 것으로 전망되며, 관련 업계에 따르면 2019년 시장 전망치가 대략 570억 달러로 예상되고 있다. 하지만 기존의 나노 프린팅 기술은 몰딩을 통해 표면에 나노 패턴이 형성된 탄성 몰드를 제작하고, 표면에 기능성 물질을 증착함으로써 나노 구조체를 형성한다. 이러한 기존 방식은 복제 분해능과 프린팅 과정에서 탄성 몰드의 변형 현상 때문에, 일반적으로 분해능이 약 수백nm 정도가 한계이다. 또한, 기존 기술의 경우, 나노 구조체와 탄성 몰드 간 높은 접착력으로 나노 구조체의 전사 프린팅이 원활하게 이루어지지 못하는 문제점이 있어왔다. 하지만 향후 인쇄전자 소자의 성능과 고집적화를 위해서 50nm 이하 수준의 높은 분해능을 가지며, 다양한 기판 상에 전처리 없이도 프린팅이 가능한 새로운 나노 전사 프린팅의 개발이 필요성이 꾸준히 제기되어 왔다.

● 본 연구팀은, 기존 탄성 몰드와 달리 특정 고분자의 경우 매우 초미세 패턴까지도 복제가 가능함을 발견하여, 미세 표면 패턴을 정밀하게 복제함으로써 10nm 이하 수준의 초미세 나노 소재를 제작할 수 있는 일련의 제반 기술을 개발하는데 성공하였다. 또한 본 연구에서는 증기 상태의 유기 용매를 기반으로 하는 이른바 초윤활(Super-lubrication) 효과에 의한 계면 에너지 제어 원리를 새로 발견하고, 이를 이용하여 표면 전처리 없이도 거의 모든 기판 상에 정렬된 나노구조체를 인쇄할 수 있는 새로운 나노전사 프린팅(nanotransfer printing) 기술을 개발하였다.[1]
이번에 개발된 새로운 나노전사 프린팅 기술은 두 단계의 연속된 공정으로 이루어진다. 첫 번째 단계에서는 고분자 필름을 표면 요철 패턴이 있는 템플릿 기판에 코팅한 후, 접착 필름을 이용해 떼어냄으로써 복제 박막 몰드를 형성하고, 박막 몰드 표면에 기능성 물질을 증착하여 나노 구조체를 형성한다. 이때 10 나노 이하급 미세 마스터 몰드는 자기조립 기술을 활용할 수 있는데 최근 본 연구팀에서는 공정 편이성을 극대화한 실시간 유도자기조립(in situ directed self-assembly) 기술을 보고한 바가 있다.[2] 고분자 박막들은 도포 과정에서 템플릿 표면의 나노 패턴을 10 nm 이하 분해능으로 복제하며, 이를 이용하여 10nm 이하급 초미세 나노 구조체를 형성할 수 있다. 두 번째 단계에서는 유기 용매 증기를 접착 필름과 복제 박막 몰드 간 계면에 제공하여 두 고분자 필름 간 접착력을 선택적으로 감소시킴으로써 나노 구조체를 다양한 기판 상에 전사시킨다. 이렇게 전사된 나노 구조체는 추후 소자 제작에서 핵심 소재로 활용된다.
연구팀은 이러한 새로운 시도를 통해, 통상적인 실리콘 웨이퍼 기판뿐만 아니라 플렉서블 기판, 커브드(curved) 기판, 심지어는 사람 피부 표면과 같은 생체 표면상에도 초미세 나노 구조체를 이식하는데 성공하였다. 개발한 초미세 나노 전사 프린팅 기술을 활용하여 폭발성 가스의 빠른 감지 기능이 있는 고성능 수소 센서를 프린팅하여 제조하였으며 또한 과일 표면에 존재하는 극미량의 잔류 농약을 비파괴적으로 검출하는 데에도 최초로 성공하였다.

● 본 연구팀이 개발한 새로운 나노 전사프린팅 기술은 초고밀도 센서, 반도체 등을 저비용으로 제조할 수 있는 기반 기술에 해당된다. 또한 플렉서블, 굴곡진 기판 혹은 요철이 있는 기판 등의 기판 위에도 나노 소재 및 소자의 제작이 가능해, 고성능의 플렉서블 혹은 웨어러블 전사 소자 제작에 매우 유용할 것으로 기대된다. 현재 반도체 소자 제조에 활용되는 광리소그래피 기술과 비교 했을 때, 초기 투자비용과 공정비용이 현저히 낮다는 면에서도 소자 제작비용을 혁신적으로 낮출 수 있는 기술로 평가된다. 더불어, 본 기술로 제작되는 10 나노 이하 수준의 높은 분해능을 갖는 나노 구조체에서 나타나는 양자효과를 활용할 수 있어 기존 소자의 성능을 크게 뛰어넘는 새로운 나노 소자를 실현하는 등 높은 잠재성이 있다.

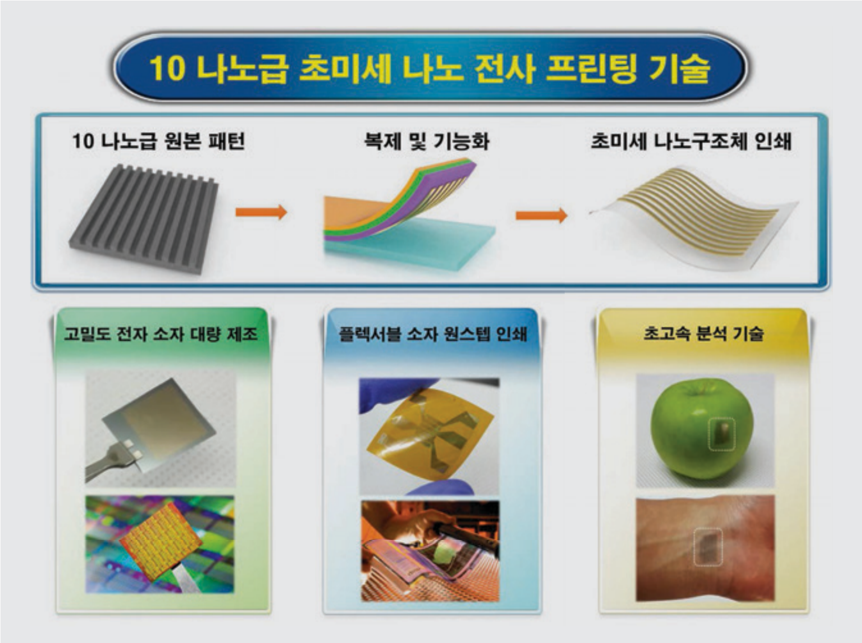

그림 1.
용매 보조 방식의 새로운 초미세 인쇄 기술의 과정과 이 기술을 이용한 미래 응용 분야

연구비 지원
글로벌프론티어사업(CISS- 2011-0031848)

연구 실적

- **논문** : [1] High-resolution nanotransfer printing applicable to diverse surfaces via interface-targeted adhesion switching, Nature Communications, 5:5387(2014)
  [2] In Situ Nanolithography with Sub-10 nm Resolution Realized by Thermally Assisted Spin-Casting of a Self-Assembling Polymer, Advanced Materials, 27, 4814-4822(2015)
- **특허** : 유기 용매 증기를 이용한 접착력 제어 방식의 나노 구조체 제조 방법 및 나노 전사 프린팅 방법
- 연합뉴스 보도 “10나노급 나노구조체 인쇄 · 전사 기술 세계 최초 개발”