



이 응 속 | 한국기계연구원 나노융합기계연구본부 나노융합산업진흥센터장 | e-mail : eungsug@kimm.re.kr

이 글에서는 나노급의 패턴이나 형상구조물을 값싸고 대량으로 찍어낼 수 있는 패터닝 기술인 나노임프린트 기술을 소개하고자 한다.

세계적으로 주목받는 ‘나노임프린트 기술’

산업기술의 발달에 따라, 생산기술은 초미세화, 초정밀화, 지능화, 융복합화 등으로 발전하고 있다. 특히 초미세화는 밀리미터 크기에서 마이크로미터, 더 나아가 나노급 형상구조물을 갖는 다양한 종류의 제품을 요구하기에 이르렀다. 나노 기술이란 나노 크기($\text{nm} \cdot 10^{-9}\text{m}$), 즉 10억분의 1m, 머리카락 굵기 10만분의 1 수준의 미시 세계에서 물질 현상을 규명하고, 구성 요소를 조작·제어해 기존 제품의 성능을 획기적으로 향상시키거나 기존에 없는 새 성능을 창출하는 기술이다. 세계적인 시장조사업체인 럭스리서치(Lux Research) 사는 ‘나노 테크놀로지 가치 사슬 진단(Sizing Nanotechnology Value Chain)’이라는 보고를 통해 2014년 나노 기술 시장 규모를 2조 6,000억 달러(2,400조 원)로 전망했다. 반도체, 전자소자, 정보통신, 환경, 에너지 등 거의 모든 산업의 패러다임을 바꿀 것이란 예측이다. 하지만 나노 시장이 본격적으로 열리기 위해서는 기존의 기술을 기반으로 하여 융합된 나노 생산 기술이 있어야 한다.

융합기술이란 단순히 기술 간의 혼합이 아닌 첨단 기술 간의 융합으로 현재의 과학기술의 한계를 극복하고 나아가 커다란 시장을 형성할 수 있는 신산업 창조의 가능성이 보여야 의미가 있다. 그 대표적인 예로

나노임프린트 기술을 들 수 있다. 일반적인 나노급 초미세 구조물의 생산기술로서는 물리화학적인 에칭방법이나 레이저, FIB 등의 고에너지빔을 이용하는 방법이 있다. 나노임프린트 기술은 나노패턴의 금형을 이용한 성형기술로서 대량으로 값싸게 생산할 수 있으며, 이를 구현하기 위해서는 나노스케일에서의 물리현상을 고려한 재료기술, 스탬프(금형)제작기술, 점착방지막기술, 에칭기술, 측정분석기술이 필요하며 나노미터급 정밀제어기술은 필수적으로 기계, 전자, 재료, 물리, 화학기술의 융합기술이다. 따라서, 나노임프린트 리소그래피기술은 차세대 나노공정기술의 근간이 되는 핵심원천기술로서 2003년도 국제 반도체기술(ITRS) 로드맵에 차세대 노광기술로 등재된 세계적으로 주목받는 기술이다.

노광공정 기술을 대체할 나노임프린트 공정

나노임프린트 공정(NIL: Nanoimprint Lithography) 기술은 현재 반도체 제조 공정의 표준 기술로 자리 잡은 노광공정(露光: optical)을 대체할 나노 응용 메모리, 차세대 디스플레이 제작의 핵심 기술로 떠오르고 있다. 고가의 칩뿐 아니라 휴대폰 센서 같이 가격이 저렴한 제품의 정밀도를 저렴한 가격에 획기적으로 증대시킬 것이란 기대를 모으고 있다. 분야를 가리지



않고 제조업 전반에 나노 기술을 채용할 수 있게 되는 것이다.

반도체 제조 공정의 표준 기술로 자리 잡은 노광 공정 기술은 필름에 사진을 찍는 것과 같은 원리다. 반도체 재질 기판 위에 자외선에 반응하는 감광제를 입힌 다음 노광장비(스테퍼 또는 스캐너)를 통해 자외선을 조사하여 웨이퍼 위에 반도체 패턴을 만든다. 보

통 볼펜으로 종이 위에 찍은 한 점 안에 50만 개 이상의 트랜지스터를 넣을 수 있는 수준까지 발전했다.

노광 방식은 집적도를 높이는 데 근본적인 한계가 있다. 렌즈를 정밀하게 만드는 제조 기술의 한계가 있고, 자외선도 자체 파장을 가지고 있어 무한정 정밀도를 높이기 어렵다. 따라서 최근에는 공기보다 굴절률이 더 큰 물 등을 사용(액침공정)해 집적도(half pitch DRAM)를 Sub-20nm 높이는 연구가 진행되고 있다. 22nm까지는 ArF 광원(파장 193nm)에 의한 액침노광과 중복패턴(double pattern), 2중노광기술의 조합에 의해 이루어졌다. 그러나 십수나노미터에서는 파장이 13.5, 15.5nm인 극단자외선(EUV)을 사용하고 있다. ASML과 캐논은 파장이 일반 자외선보다 적은 극(極) 자외선(EUV: Extreme Ultraviolet)을 사용하는 공정을 개발하고 있다. 현재는 세마텍(SEMATEC), 벨기에 IMEC, 미국 IBM, 대만 TSMC, 미국 인텔(INTEL), 한국 삼성전자 등의 몇 개의 대기업만이 EUV노광장치의 알파기를 도입한 단계로 양산화를 위한 실용기 개발에 들어갔으나 많은 어려움이 있는 것으로 알고 있다.

하지만 노광 방식은 아무리 고가 장비를 써도 10nm의 수준에 도달하기 어렵다. 파장을 갖는 자외선의 축

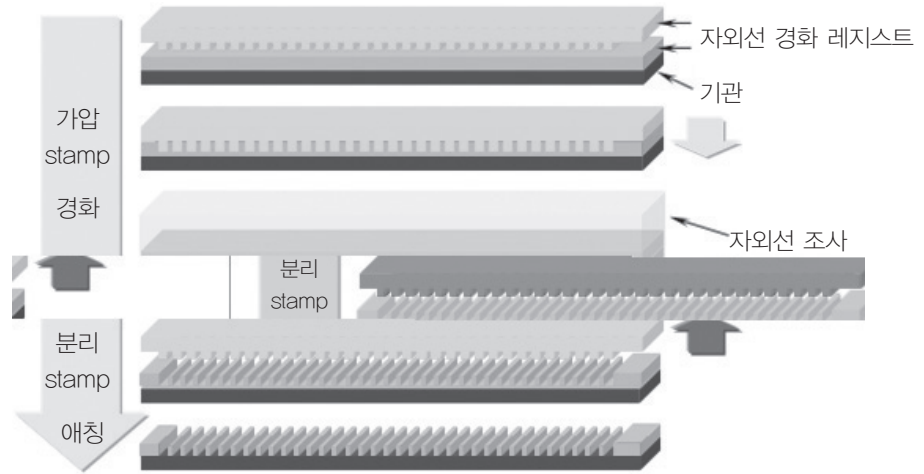


그림 1 자외선 나노임프린트 리소그래피 개념도

소 또는 반사가 불가피해 웨이퍼에 찍히는 상(象)이 왜곡된다. 가격도 기하급수적으로 늘어난다. 193nm 수준의 장비는 대당 1,000만 달러 수준이지만 물을 이용한 방식(액침 공정)은 3,000만 달러, 극자외선 방식 장비는 6,000만 달러를 넘을 것으로 알려져 있다. 이런 비용적인 면 이외에 기존의 노광 장비에서는 차세대 디스플레이나 바이오산업에서 요구되고 있는 곡면에 대한 패턴 성형이나 플렉시블한 다양한 기판에 적용이 불가능한 단점이 있다.

이런 한계를 단숨에 넘어설 수 있는 가장 유력한 차세대노광기술이 나노임프린트 공정 기술이다. 나노임프린트 기술은 1995년 미국 프린스턴 대학 교수이자 나노텍스의 설립자인 초우(Chou) 교수가 전자 광선을 이용해 일종의 스탬프(stamp)를 만든 다음 열을 가하면 변형 가능한 수지에 눌러본 결과, 기존의 어떤 방식보다 정밀한 반도체를 만들 수 있다는 실험으로 발전하였다. 일종의 인장 반지(signet ring)와 비슷한 원리로 기판 위의 고분자 박막에 나노 패턴의 스탬프를 놓고 압력을 가해 회로 패턴을 찍는 것이다. 당시 초우 교수가 성공한 반도체의 집적도는 25nm 수준이었는데 현재 6nm 수준까지 끌어 내려졌다. 나노임프린트

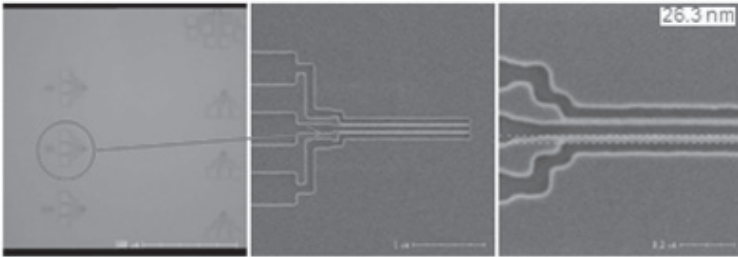


그림 2 나노임프린트를 이용한 30nm급 저항변화 메모리 패터닝 결과

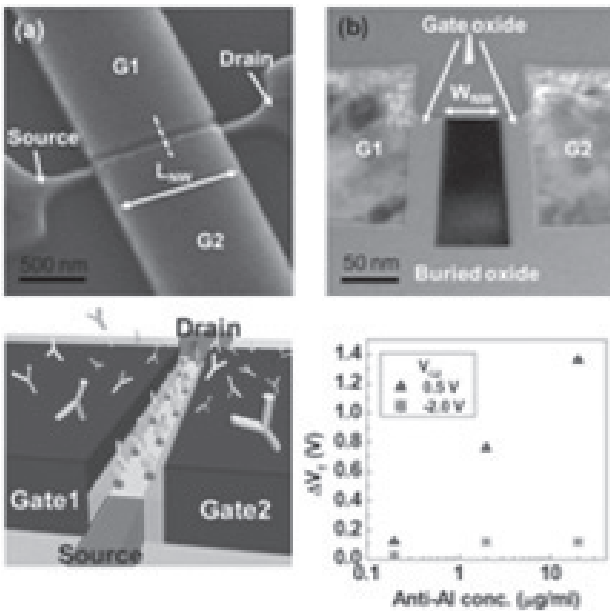


그림 3 나노임프린트를 이용한 30nm 나노갭 바이오 소자 제작

방식은 복잡한 노광 부품이 필요 없고, 집적도도 획기적으로 향상되는 장점이 있다. 종류는 크게 가열식과 자외선식으로 나뉜다. 가열식은 열 변형이 가능한 고분자 수지 표면을 고온에서 눌러 성형하는 방법으로 단층 구조물 패터닝이 가능한 광학, 디스플레이, 바이오 제품에 주로 활용되고 있다. 자외선식은 저점성 광경화성(자외선을 쬐이면 굳어지는 성질) 수지를 사용해 성형하는 방식이다. 상온과 1기압 정도의 저압에서 공정이 가능하기 때문에 대량 생산이 가능한 장점이 있다.

최근 세마텍(SEMATECH) 나노임프린트 프로젝트

책임자 매트 말로이(Matt Malloy)의 2011년 리뷰논문에 따르면, 플래시메모리는 극한의 초정밀 분해능 축소를 요구하는 반면 정렬정밀도/결함이 로직소자에 비해 상대적으로 요구조건이 낮기 때문에, 최적의 공정전략으로 나노임프린트가 검토되고 있다. 산업체에서는 2013년 플래시메모리에서 22nm 기술요구를 예상하고 있으며, 2009년 이후 ITRS는 NIL을 22nm 이하 기술로 위치시키고 있어 22nm급 플래시메모리 공정기술로 정착될 가능성이 높다.

기술력 향상과 산업화를 위한 연구소 · 대학 · 산업계 동향

서울대 이흥희 교수 등은 고분자의 부피압축과 소성변형만을 이용하여 상온에서 임프린트할 수 있는 상온임프린트 기술과 모세관현상리소그래피(capillary force lithography) 기법을 제안하였다. 한국기계연구원(KIMM)에서는 2003년 대면적 EPS(Elementwise Patterned Stamp)를 사용한 저 진공/대기환경에서의 UV-NIL공정을 제안한 바 있다. 특히 대기환경에서 EPS를 사용한 UV-NIL을 구현하기 위해 웨이퍼 척에서 균일한 압력을 부가할 수 있는 공정기술을 개발하였으며, 8인치 이상의 웨이퍼의 임프린트 공정을 구현하기 위해 대면적 스탬프를 사용한 단계반복(step-and-repeat) 기법을 개발하였다. 최근 평판판넬 디스플레이 적용을 위한 2세대급의 유리 기판에 임프린트가 가능한 공정 기술을 개발하였다. 또한, 30nm 이하의 저항메모리소자(RRAM)제작, 30nm 나노갭을 이용 바이오검출소자 적용기술개발, LCD, OLED를 포함한 차세대 디스플레이, 조명용 공정 및 장비기술, 플라즈마 모닉스 센서 제작, 유기태양전지 나노임프린트 적용 기술 등이 개발되었다.



국내 NIL장비회사 중 하나인 새한 나노텍과 한국기계연구원은 다양한 한 종류의 나노임프린트 장비를 개발보급하고 있고, 고려대 이현 교수 등은 임프린트 후 잔여층을 최소화 및 균일화할 수 있는 공정기술을 제안했으며, (주)휴젼은 롤 프레싱 방식에 의한 임프린트 장비를 출시하였고, ETRI, LG전자기술원, 부산대 나노과학대에서는 가열방식과 자외선방식 NIL공정을 사용한 광소자 및 부품 적용기술 개발에 주력하고 있다. DMS와 ADP 엔지니어링 등의 국내 디스플레이 장비 회사에서 기존의 LCD 또는 OLED 생산에 임프린트 기술을 적용하는 연구를 수행하였다.

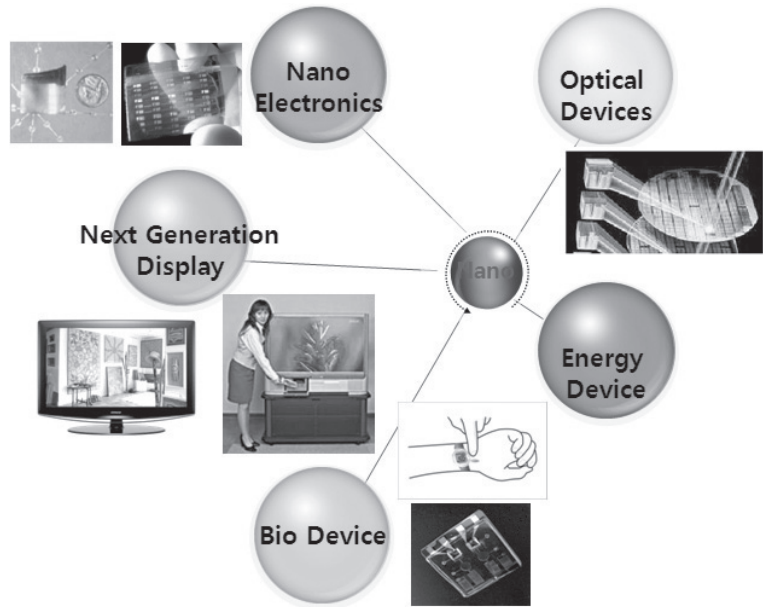


그림 4 한국기계연구원에서 개발하고 있는 나노임프린트 적용 제품 예

나노임프린트 기술로 새로운 제품 시장 창출기대

나노임프린트 공정은 기존 노광 공정에 의한 마이크로/나노 패턴 형성에 비해 약 1/10 정도의 공정 비용이 소요되고, 특히 장비에 있어서 고가의 렌즈 및 광원 대신에 나노패턴이 형성된 스탬프만을 이용하여 직접성형을 수행하므로 장비 제작 단가를 크게 낮출 수 있다.

이런 비용적인 면 이외에 기존의 노광 장비에서는 수행이 불가능한 곡면에 대한 패턴 성형이나 플렉시블한 다양한 기판에 적용 가능한 장점이 있다.

현재 디스플레이 관련 업체에서 차세대 디스플레이 또는 현 LCD 생산의 단가를 낮추기 위한 방법으로 임프린트 공정에 대한 연구가 진행되고 있으며 향후 양산에 이와 같은 공정이 적용될 경우 예상보다 더욱 큰 시장이 열릴 것으로 예상된다.

최근 들어 바이오센서, 바이오칩, 랩온어칩(Lab-on-a-Chip)에 대한 시장은 계속해서 성장해가는 추세이다. 따라서 나노임프린트를 이용한 바이오센서의 개발은 기계 산업이 바이오 영역을 개척하여 새로운 수요를 찾을 수 있음을 보여줄 수 있고, 유비쿼터스 IT 기술과 결합하여 새로운 의료시스템이 구축될 수 있다.

또한, 나노임프린트 공정 응용 나노패턴드 박막태양전지, OLED용 나노광학필름 제조용 롤투롤(roll-to-roll) 생산공정기술 등은 낮은 공정비용, 공정의 고속대면적화/연속화, 유연기판 적용 가능 등의 확장된 기술적 경쟁력을 가지고 있어, 제품 제조 단가의 혁신적인 절감으로 세계적인 기술 경쟁력 확보에 기여할 수 있다. 그 외에도 광학소자 및 패턴된 미디어(patterned media)와 같은 저장 매체에 대한 적용기술 연구가 활발히 진행되고 있어, 새로운 제품 시장의 창출될 것으로 예상되고 있다.