나노 임프린트 (Nanoimprint) 기술

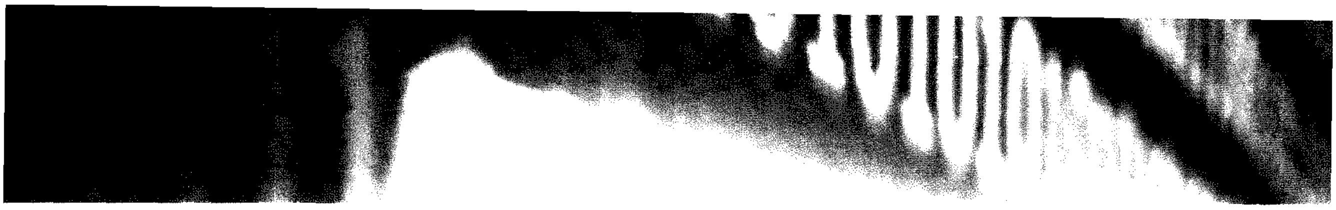
이기동 / LG전자기술원 소자재료연구소

나노 제작 기술

나노기술(NT : Nano Technology)은 정보 기술(IT : Information Technology) 및 생명 공학 기술(BT : Bio Technology)과 더불어, 21 세기 산업 발전을 주도할 새로운 패러다임의 기술로 주목받고 있다. 특히, 나노기술은 물리학, 화학, 생물학, 전자 공학 및 재료 공학 등 여러 과학/기술 분야가 융합되어, 기존 기술의 한계를 돌파하고, 다양한 산업 분야의 기술 혁신을 주도함으로써, 인류의 삶의 질을 획기적으로 향상시킬 것으로 기대되고 있다. 이러한 가능성에 주목하여 미국과 일본 등 기술 경제 선진국은 나노기술 연구 개발에의 막대한 투자를 통하여 기술적 우위를 확보하고, 이를 산업화하는 데 경쟁적으로 나서고 있다.

나노기술은 접근 방법에 따라, 크게 위로부터 아래로의 접근 (Top-down) 방식과 아래로부터 위로의 접근 (Bottom-up) 방식으로 나누어질 수 있다. 위로부터 아래로의 접근 방식은 지난 수 십여 년 동안 발전되어온 반도체 집적 소자의 역사에서 볼 수 있듯이, 기존의 미세 구조 제작 기술을 나노미터 스케일까지 더욱 발전시켜, 정보 저장 용량 및 정보 처리 속도의 증대를 지속하고자 하는 기술이다. 아래로부터 위로의 접근 방식은 물질을 원자 혹은 분자 단위 수준에서 제어하거나 자발적인 나노 구조 형성 현상을 이용하여, 기존의 기술로는 불가능한 새로운 물리적, 화학적 성질을 유도하고, 이를 이용하여 새로운 소재 및 소자를 제작하는 것으로 정의된다.

위로부터 아래로의 접근 방식의 대표적 예는, 기존의 반도체 소자 제조 공정에 사용되고 있는 광학 리소그라피 (Optical Lithography) 기술이다. 정보 기술 혁명으로 일컬어지는 20세기의 기술 발전은, 반도체 소자의 소형화 및 집적화에 크게 의존해 왔으며, 이러한 반도체 소자 제조 공정의 핵심 기술이 광학 리소그라피 기술이다. 현재, 광학 리소그라피의 광원은 최소 선폭이 130 nm 인 KrF 레이저로부터 고해상도의 ArF 레이저로의 이행이 이루어지고 있다. 그러나, ArF 레이저 리소그라피의 양산 단계에서의 최소 선폭은 100nm 인데 반해, 2003년에는 90nm, 2005년에는 65 nm, 2007년에는 45 nm 선폭 소자의 제조 요구가 대두될 것으로 예측된다. 이러한 상황에서 초 미세 기술로 기대되고 있는 것은 F_2 레이저 리소그라피, 극 자외선 리소그라피, 전자빔 투영 리소그라피, X-선 리소그라피 등이다. 이들 리소그라피 기술은 40 nm에서 70 nm까지의 패턴 제작을 가능케 하지만, 미세화가 진행됨에 따라, 노광 장비 자체의 초기 투자비용의 지수 함수적 증가와 더불어, 사용되는 빛의 파장과 같은 정도의 해상도를 갖는 마스크의 가격도 급등하는 문제를 갖고 있다. 즉, 기존 리소그라피 기술을 나노미터 영역까지 연장해 가는 기술 개발의 어려움과 더불어, 이러한 기술이 과연 경제적 효용성을 갖고 있느냐 하는 의



문이 제기된다.

아래로부터 위로의 접근 방식의 나노 제작 기술은 주사 원자 현미경을 이용한 원자의 배열이나 자연에 존재하는 원자들 사이의 결합력을 이용한 자기 조립 (Self-Assembly)에 의한 소자 제작 기술을 일컫는 것으로, 아직까지는 기초 연구 수준에 머물고 있다. 이 방식은 생산성이 너무 떨어지거나, 특성상 불 균일성을 피하기 어렵고, 신뢰성 등에 있어 극복해야 할 문제점들이 산적해 있다. 따라서, 나노미터 크기의 소자를 경제적으로 신뢰성을 갖고 생산할 수 있는 기술의 개발이 요구된다.

나노 임프린트 기술 개요

나노 임프린트 기술은 1990년 대 중반 미국 Princeton 대학교의 Stephen Y. Chou 교수에 의해 도입된 나노 소자 제작 방법으로, 생산선이 낮은 전자빔 리쏘그라피나 고가의 광학 리쏘그라피를 대신할 기술로 주목받고 있다. 나노 임프린트 기술은 컴팩트 디스크(CD)와 같은 마이크로 스케일의 패턴을 갖는 고분자 소재 제품의 대량 생산에 사용되는 엠보싱 (Embossing) 기술을 리쏘그라피에 적용한 것이다. 나노 임프린트의 핵심은 전자빔 리쏘그라피나 다른 방법을 이용하여, 나노스케일의 구조를 갖는 스탬프를 제작하고, 스탬프를 고분자 박막에 각인하여, 나노스케일의 구조를 전사하고, 이를 반복 사용함으로써, 전자빔 리쏘그라피의 생산성 문제를 극복하자는 것이다.

(그림 1) 은 대표적인 두 가지 타입의 나노 임프린트 공정 흐름을 보여준다. 우선, 열 경화 방식(그림 1의 왼쪽) 에서는 실리콘과 같은 기판에 고분자 박막을 스핀 코팅한다. 제작된 스탬프 (몰드) 와 기판을 평행하게 놓고, 고분자의 유리 전이 온도까지 가열한다.

스탬프를 고분자 박막과 물리적 접촉을 시키고, 압력을 가한 후, 온도를 낮춘다. 온도가 유리 전이 온도 이하가 되면 스탬프와 고분자를 분리한다. 한편, 자외선 경화방식은 유사한 방법이지만, 자외선 경화형 고분자를 이용해서 자외선 조사를 통해 경화하는 방식이다 (그림 1의 오른쪽). 이 방법은 높은 온도와 압력을 필요로 하지 않기 때문에 최근에 많은 연구가 진행되고 있다. 이렇게 하여, 스탬프 상의 나노 패턴은 고분자 박막으로 옮겨지게 된다. 최근에는 관련 장비 기술의 발달에 힘입어, 작은 면적의 스탬프를 제작하고, 웨이퍼의 일부분에 임프린트 공정을 수행하고, 스탬프의 위치를 이동시켜 반복 작업을 수행하는 스텝 반복 (Step-and-repeat) 방식의 기술에 대한 연구가 활발하다 (그림 2). 특히, 자외선 경화 방식과 스텝 반복 방식이 결합된 Step and Flash Imprint Lithography (그림 1) 은 기술적으로 가장 앞서 있다고 평가되고 있다.

나노 임프린트에 의해 패터닝된 고분자 박막은 다음과 같이 사용될 수 있다.

(a) 식각 (Etching) 이나 리프트오프 (Lift-off process)를 위한 마스크

이 경우의 고분자 박막은 광학 리쏘그라피의 감광제(Photoresist)와 정확히 같은 역할을 하게 된다. 식각 저항막으로 하부 반도체, 금속 박막의 식각 공정에 이용됨으로써, 기존의 광학 리쏘그라피가 제공할 수 없는 10 nm 이하의 선폭까지 저가로 제작할 수 있다.

(b) 고분자 자체가 전기적, 광학적 특성을 가졌을 경우에는 소자 자체

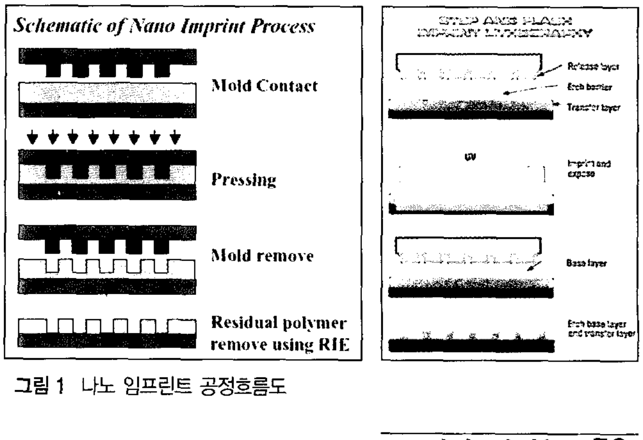


그림 1 나노 임프린트 공정흐름도

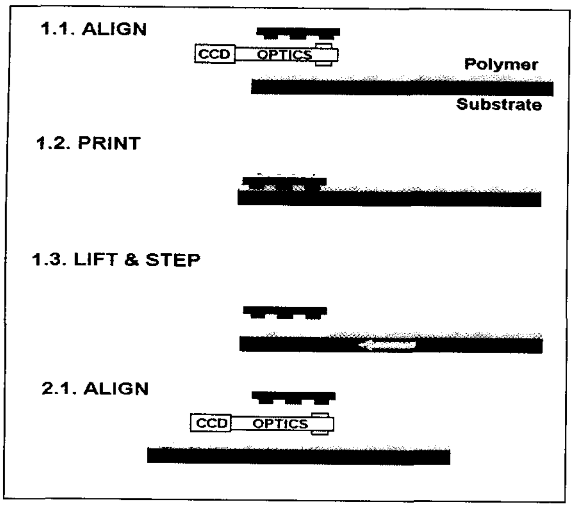


그림 2 스텝 반복 방식의 나노 임프린트 기술

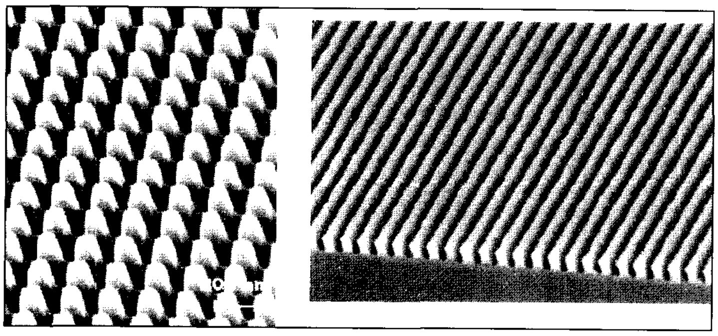


그림 3 나노 임프린트를 이용하여 제작된 나노 패턴

고분자가 광 흡수 손실이 작은 광 도파로 용 고분자일 경우는 직접 임프린트하여 광 도파로의 코어층을 패터닝 할 수 있다. 또한, 고분자가 전도성 혹은 반도체 고분자인 경우에는 메모리 소자, 유기 박막 트랜지스터 등을 식각 공정 없이 저가로 제작할 수 있는 방법이 된다. 또한, 고분자 필름 표면에 특정한 패턴을 전사하여 특수한 광학적 기능을 부여할 수도 있다.

나노 임프린트 기술은 다양한 전자 소자, 저장 매체, 광 소자, 바이오 센서 등의 제작에 적용 가능함이 이후의 연구를 통해 밝혀져 왔다. (그림 3) 은 나노 임프린트를 이용하여 제작된 나노 패턴의 예이다.

나노 임프린트 기술 이슈

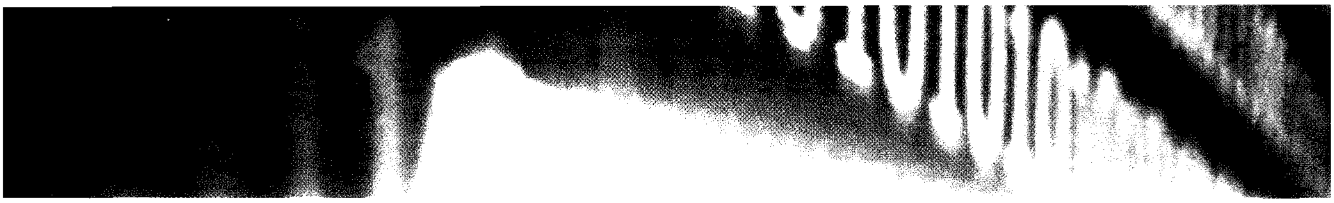
나노 임프린트 기술은 나노스케일의 구조를 저가로 생산할 수 있는 가능성에도 불구하고, 실제 제품의 생산에 적용되는 기술로 발전하기 위해서는 해결해야 할 몇 가지 문제점을 가지고 있다.

가) 다단계 공정 (Multi-level Process)을 위한 정렬 기술

일반적으로 반도체 소자는 증착, 노광, 식각 등의 반복 다단계 공정을 이용하여 제작된다. 나노 임프린트 기술이 나노스케일의 초고집적 회로 제작에 사용되기 위해서는 10 nm 이하의 정렬 오차가 요구되나, 현재는 0.5 μm 수준에 머물고 있다. 정렬 정밀도는 스탬프의 크기, 정렬 과정에서의 고분자의 열적, 기계적 안정성, 스탬프 및 기판 재질에 따라 달라진다. 광학적 정렬 방법은 0.5 μm 수준으로 제한된다. 압전 구동(Piezo-Drive)을 이용하면 30 nm 수준의 정렬이 가능할 것으로 예상되나, 사용할 수 있는 크기는 수십 mm로 제한된다. 최근에는 자외선 경화를 이용하고, 회절 무늬를 측정하는 정렬 방법이 제안된 바 있다. 다단계 공정에서 정렬도의 결여는 나노 임프린트 기술이 극복해야 할 최대 약점이므로, 광학 소자를 비롯한 다단계 공정이 필요 없는 소자가 초기 응용 제품이 될 것으로 보여진다.

나) 고 밀도 패턴 대 면적 스탬프 제작

스탬프의 크기는 한 번에 인쇄할 수 있는 면적을 결정하며, 이것은 나노 임프린트의 생산성을 결정하는 중요한 요인이다. 최근의 연구는 6 인치 웨이퍼에 수백 nm 간격을 가진 50 nm 패턴을 인쇄한 것이 보고되고 있다. 고 밀도의 나노 패턴을 갖는 대 면적 스탬프를 전자빔 리쏘그라피로 제작하는 것은 고비용을 요구하므로, 스텝 반복 임프린트 방식을 사용하는 것이 현실적인 방법이다. 그레이팅(Grating)등



의 미세 광학 소자와 같이 주기적인 패턴이 필요한 경우는 레이저 간섭 리소그라피를 사용하여 스탬프를 제작하기도 한다. 스탬프 내에서의 미세 패턴의 밀도 및 구조는 고분자의 유동을 제어하므로, 임프린트 공정에 큰 영향을 미친다. 따라서, 양각 또는 음각의 패턴이 스탬프 내에서 어떻게 배치되어야 하는가의 설계 규칙에 대한 연구도 필요하다.

다) 스탬프와 고분자의 점착 (Adhesion) 방지

스탬프와 고분자의 점착은 임프린트 후 스탬프를 분리하는 데, 어려움을 줄 뿐 아니라, 예측하기 어려운 결함을 생성하여, 소자 생산성을 크게 떨어뜨릴 수 있다. 스탬프와 고분자의 점착 문제를 해소하기 위하여, 스탬프의 표면 에너지를 낮추어, 고분자와의 점착을 감소시키는 점착 방지 층 (Anti-adhesion Layer)이 사용되고 있다. 그러나, 점착 방지 층을 주기적으로 스탬프에 코팅하는 것은 공정 시간을 늘려, 생산성을 떨어뜨리기 때문에, 이상적으로는 점착 방지 층을 사용하지 않는 것이 바람직하다. 이를 위하여 점착이 일어나지 않는 고분자와 스탬프의 조합에 대한 연구와 함께 적절한 공정 윈도우를 정의하는 연구가 진행되어야 한다.

라) 나노 임프린트용 고분자 재료

고분자의 경화 시간을 줄이는 것은 나노 임프린트의 생산성을 높이는 한 방법이다. 임프린트 온도 및 압력을 가능한 한 낮추는 것도 그에 필요한 시간을 줄임으로써, 생산성을 높이며, 이것은 고분자 재료와 밀접한 관련을 갖고 있다. 나노 임프린트 공정을 조절하기 위해서는 고분자의 기계적 성질의 이해, 즉, 온도에 따른 고분자 점성 (Viscosity) 및 탄성 (Elasticity) 의 변화, 외부 압력에 대한 고분자의 유동 및 변형 등에 대한 이해가 필요하다. 나노 임프린트 용 고분자 재료가 만족하여야 할 특성으로는 스탬프와의 낮은 점착성, 식각 공정을 위한 우수한 식각 저항성, 미세 패턴 형성의 가능 등이 있다. 최근에 독일의 Microresist 사에서 나노 임프린트 용 고분자 재료의 상용 생산을 시작한 바 있다.

마) 스탬프의 수명

스탬프의 수명은 나노 임프린트의 생산성을 결정짓는 핵심적 요소이다. 지금까지의 연구는 실험실 수준의 자동화되지 않은 장비에서 수행되어 왔기 때문에, 스탬프의 수명에 대한 충분한 연구가 되어 있지 못하다. 수동작업을 통한 임프린트는 40회의 반복 사용까지 보고되고 있다. 스탬프의 수명을 연장하는 다른 시도는 스탬프를 복제하는 것이다. 열 경화성 고분자를 이용한 400nm 선폭의 패턴을 가진 스탬프의 복제가 보고되어 있다. 이 경우 하나의 마스터로부터 스탬프를 복제하여, 마스터 당 1,000회의 사용이 가능하다. 니켈 도금에 의한 스탬프 복제도 널리 사용되고 있다. DVD 제작을 위한 니켈 스탬프의 경우는 수만 번의 사용이 가능하다고 알려져 있으므로, 나노 임프린트용 스탬프의 수명도 양산에 적합한 만큼 연장될 수 있을 것이다.

바) 나노 임프린트 장비

나노 임프린트는 스탬프와 기판의 평행 정도를 수십 nm 이내에서 유지하여야 하므로, 특별히 고안된 장비가 필요하다. 2002년 말부터 2003년 초에 세계적으로 다수의 장비 업체들이 나노 임프린트 장비를 선보이고 있다. 이들 업체들을 나노 임프린트 기술 연구 그룹으로부터 파생된 업체들과 기존 반도체 장비 업체가 나노 임프린트로 기존 기술을 확장한 경우로 나눌 수 있다. 전자에 해당하는 업체로는 스웨덴의 Obducat과 미국의 Molecular Imprint, Nanonex가 있다. 이중 스웨덴의 Obducat은 열 경화 방식의 임프린트와 자외선 경화 방식의 임프린트를 하나의 장비에서 수행할 수 있도록, 모듈 형태로 제공하고 있으며, Molecular Imprint는 앞서 언급하였던 Step-and-Flash Imprint 방식의 장비를 생산하고 있다. 기존 반도체 업체로는 유럽의 EVG 와 Suss Microtek을 들 수 있다. 이들 업체는 기존 반도체 공정에 사용되던 Wafer Bonder, Flip-chip Bonder,

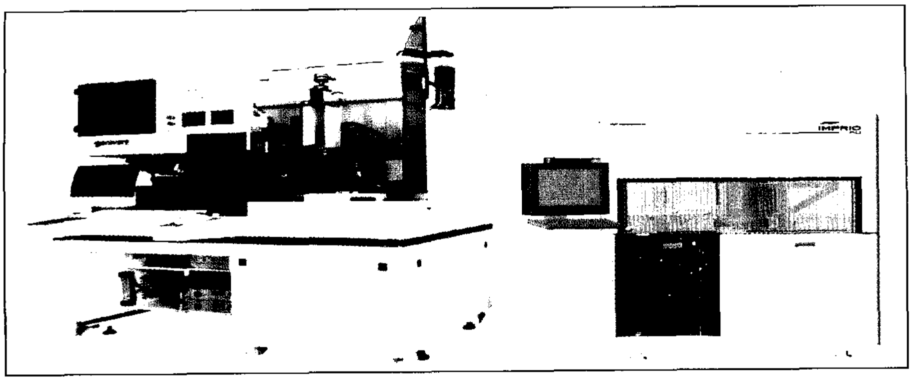


그림 4 나노 임프린트 장비(왼쪽 : Suss Microtek 사, 오른쪽 : Molecular Imprint 사)

Mask Aligner 등을 일부 개조하여, 나노 임프린트 장비로 제공하고 있다. (그림 4)는 Suss Microtek와 Molecular Imprint의 나노 임프린트 장비 외관 사진이다. 아직, 나노 임프린트 기술이 양산에 적용된 예가 극히 적기 때문에, 궁극적으로 어느 업체의 장비가 기술적 우위에 있는 지는 현재로서는 불확실하며, 장비의 연구 개발은 나노 임프린트를 이용한 제품 개발 및 생산과 더불어 더욱 발전되어야 할 분야이다.

나노임프린트 기술의 활용 분야

나노 임프린트 기술은 공정 기술이기 때문에 활용 분야가 다양하다. 새로운 나노 소자의 제작에 적용할 수 있으며, 기존의 마이크로 스케일의 소자를 저가로 생산할 수 있는 가능성을 제공한다. 활용이 예상되는 분야는 다음과 같다.

◇ 광통신 부품 : 나노 임프린트 기술을 이용하여, 고분자 기반의 광 도파로 소자를 저가로 생산할 수 있을 뿐 아니라, 그레이팅과 같은 나노 스케일의 구조가 포함된 광소자도 저가로 제작할 수 있다. 최근 편광판, 편광빔 스플리터 등의 초미세 광학부품을 나노 임프린트를 이용하여 생산하는 Nanoopto라는 기업이 미국에 등장하였다.

◇ 디스플레이용 부품 : 디스플레이는 반도체 산업과 함께 한국 경제를 이끌 견인차로 성장하고 있다. 평판형 디스플레이의 제작에서도, 패터닝 기술은 중요한 위치를 차지하며, 나노 임프린트 기술은 저가의 패터닝 기술 개발에 크게 기여할 것이다. 또한 디스플레이용 부품을 나노 임프린트 기술을 이용하여 저가로 생산한다면, 디스플레이산업의 경쟁력 확보에도 기여할 것이다. 관련 부품은 마이크로렌즈 어레이, 액정 프로젝터 및 프로젝션 TV 용 편광판과 편광 빔 스플리터, 액정 디스플레이용 확산판 등을 들 수 있다.

◇ 초고속 고밀도의 정보 저장 매체

한국은 CD, CD-RW, DVD 등 광 기록 저장 장치의 세계 시장 점유율에 있어 선두를 달리고 있다. 나노 임프린트 기술은 이러한 광 기록 저장 장치에 쓰일 테라비트급 기록 매체를 저가로 제작할 수 있는 가능성을 제공한다.

◇ 바이오 센서 및 바이오 칩

바이오 기술은 정보 기술 및 나노기술이 융합되어 발전해 가고 있으며, 나노 임프린트 기술은 진단용 DNA 칩 및 단백질 칩 등의 바이오 칩, 랩온어 칩(Lab-on-a-chip)의 저가 제작에 활용될 수 있다.

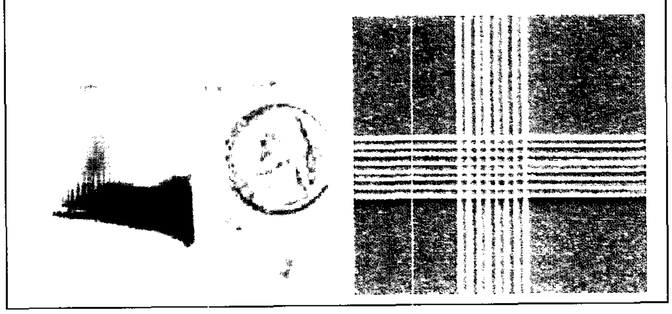
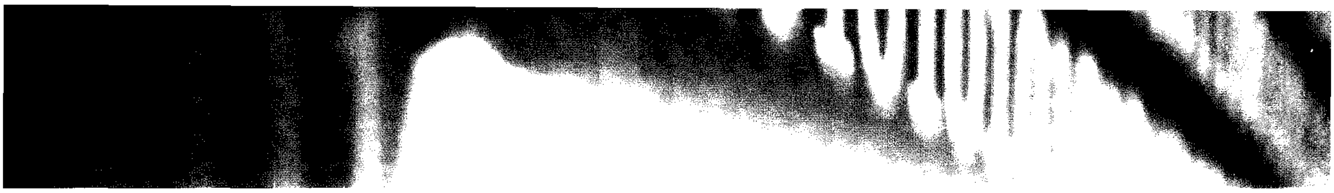


그림 5 휴렛 팩커드가 발표한 분자 메모리



◇ 고분자 메모리, 유기 박막 트랜지스터, RFID 태그 등의 유기 전자 소자

유기 전자 분야는 유기 EL 디스플레이의 상업화와 더불어 산업적 중요성이 증대되어 가고 있다. 특히, 유기 전자 소자 제작에 나노 임프린트 기술을 적용하면, 별도의 식각 공정없이 패턴을 제작할 수 있는 장점을 가진다. 최근 휴렛팩커드는 나노 임프린트 기술을 이용한 분자 메모리 제작을 발표한 바 있다. (그림 5)

결 론

나노기술의 산업화를 위한 세계적인 경쟁은 치열하며, 결국 새로운 물리적 현상에 기초한 소자의 개발과 이를 값싸게 고속으로 대량생산할 수 있는 제조 기술을 확보하는 국가가 21세기 과학 기술을 선도하게 될 것이다. 나노 임프린트 기술은 현재 연구되고 있는 나노 제작 기술 중 가장 실용화가 유력한 기술로 주목받고 있으며, 이제 학계에서의 연구를 넘어서서 기업체에서의 실제 적용을 위한 기술 개발로 이어지고 있다. 미국의 NanoOpto사의 경우에서 보듯이, 나노 임프린트 기술로 광통신 부품을 생산하는 회사가 출현하였으며, 스웨덴의 Obducat, 오스트리아의 EVG 등 나노 임프린트 관련 장비 제작 업체도 다수 등장하고 있다. 휴렛-팩커드의 분자 메모리 제작에서 볼 수 있듯이, 나노 임프린트 기술은 차세대 나노 패터닝 기술에서 중요한 위치를 차지할 것으로 전망된다.

현재의 기술 수준은 전술한 바와 같이, 그 가능성에도 불구하고, 산업화 기술로 성장하기 위해서는 몇 가지 문제점을 안고 있다. 대면적화 기술, 다층 공정을 위한 나노미터 급 정렬 기술, 스탬프의 장수명화 기술, 고분자 재료의 연구 개발 및 관련 장비 개발이 요구된다. 이러한 기술적 과제들을 해결하기 위한 연구 개발 노력이 세계적으로 진행중이며, 이러한 기술적 과제들이 해결된다면, 기존의 나노 공정 기술과는 비교할 수 없는 경제성을 가진 기술로 자리잡을 것이다.

저가/고속/대량 생산이 가능한 나노소자 제조 기술의 개발이 미칠 경제적 효과는 금액으로 환산할 수 없을 만큼 지대하다. 나노 임프린트 공정 기술이 적용될 수 있는 분야는 반도체 소자, 디스플레이 부품, 광통신 부품, 정보 저장 장치, 바이오 소자 등 무궁무진하며, 이러한 소자가 창출하는 경제적 가치는 매우 크다. 또한, 공정 기술 개발을 통해 축적된 기술은 장비 개발에도 기여하여, 나노 공정 장비 산업의 발전에 큰 영향을 줄 것이다.

이러한 중요성에도 불구하고, 국내에서의 나노 임프린트 기술의 연구 개발 노력은 매우 미비한 실정이다. 대학의 소수 연구 그룹만이 소규모로 기초 연구를 진행하고 있으며, 산업체와 연관된 실제 제품 개발에 가능한 기술 개발 노력은 전무한 실정으로, 국내의 기술적 기반이 취약하다. 다행히, 2002년 10월 출범한 과학기술부 프론티어 사업의 일환인 나노메카트로닉스 기술 개발사업에서 나노 임프린트 기술을 나노 패터닝 기술의 주요 기술로 인식하고, 산학연 공동 연구 개발을 시작하고 있다. 나노 임프린트 기술이 얼마나 작은 패턴을 가능케 할 것인가는 더 이상 중요한 이슈가 아니며, 대면적화, 스탬프 장수명화, 다층 공정 기술 등 산업화에 필수적인 기술 측면을 집중적으로 개발해 나갈 때이다. 세계적으로도, 이 부분의 연구 개발의 진전은 아직 초기 단계이므로, 산업체가 중심이 되어, 대학 및 정부출연연구소가 공동 연구를 진행한다면, 국내의 나노 임프린트 기술은 세계를 선도할 가능성을 가지고 있다. 나노 임프린트 기술의 확보 및 산업화는 나노스케일의 소자를 저가로 대량생산하는 것을 가능케 하여, 반도체 분야에서 이룩한 국내의 기술력을 더욱 발전시킴으로써, 초고집적화가 가속되고 있는 정보처리, 저장과 관련된 신 기능의 소자 개발을 가능케 하여 세계적인 기술 우위를 지속적으로 확보하는 데 기여할 것이다.