

나노임프린트 공정

고형민, 이종인, 정학기

군산대학교 전자정보공학부

목 차

I. 서론	2-3. 나노 임프린트 리소그래피의 기술 동향
II. 나노임프린트 리소그래피	2-3-1. 스탬프 제작 관련 기술
2-1. Hard lithography	2-3-2. 임프린트 장비 관련 기술
2-1-1. 가열식 임프린트	2-3-3. 재료개발
2-1-2. UV 나노임프린트	2-3-4. 응용기술
2-2. Soft lithography	III. 결론
2-2-1. Contact 임프린팅	참고문헌

1. 서론

오늘날 문명의 발전은 상당한 부분이 반도체 기술의 발달과 더불어 이뤄졌음을 부정하는 사람들은 그렇게 많지 않을 것이다. 반도체라고 하면 반도체 자체의 물성적 성질이나 반도체 논리 소자의 특성을 생각하기보다는 수십 mm^2 속에 수십만 개의 반도체 소자가 집적되어 있는 집적회로가 먼저 떠오른다. RLC수동소자와 반도체 소자들을 이용하여 이 집적회로를 기판 상에 설계한다면 그 회로의 부피는 대단히 클 것이다. 이러한 거대한 부피의 회로를 단지 수십 mm^2 의 면적으로 축소하는 기술을 리소그래피라 한다.

Lithography(리소그래피)란 litho(돌)과 graph(그림, 글자)를 뜻하는 말의 합성어로 석판화를 그리는 것으로 어원을 찾을 수 있다. 오늘날의 오프셋인쇄의 근본이 된 기술로서, 1798년 독일의 A. 제네펠더가 발명하였다. 반도체 생산에 사용되는 포토리소그래피 기술은 미세회로를 구현하고자 하는 기판 위에 포토레지스트가 코팅된 상태에서 마스크를 통해 노광하는 방식으로 진행된다. 리소그래피 기술의 발전이 없었다면, 오늘날 PC나 PCS가 인간의 일상 생활 속에서 보편화될 수 없었을 것이다. 그러므로 반도체 기술은 리소그래피의 발전과 더불어 발전하였고, 리소그래피의 발전은 오늘날의 문명 발전의 핵심을 차지하고 있다고 말할 수 있다.

정보 기술 혁명으로 일컬어지는 20세기의 기술발전은, 반도체 소자의 소형화 및 집적화에 크게 의존해 왔다. 반도체 소자 미세화의 진전에 의해, 고속 동작화, 저 소비전력화, 그리고 시스템 LSI로 불리는 기능의 통합화가 한층 가속화되고 있다. 그러나 현재 반도체 공정 및 마이크로급 소자제작에 널리 사용되고 있는 광학 프로젝션 리소그래피 기술이 광 회절 한계로 인해 100nm 벽에 부딪혀 차세대 리소그래피에 대한 필요성이 요구되고 있으나 광학소스와 렌즈의 물리적 한계로 인해 패턴 밀도의 증대는 필연적으로 광학 리소그래피 장비의 고가화를 가져오고 있다. 또한 전통적인 광학 프로젝션 리소그래피의 대체 기술로 EUV, 전자빔, 이온빔 등을 이용한 공정개발이 추진되고 있으나 고가의 장비가 요구되어진다. 나노임프린트 기술은 가격 등 경제적 효용성을 고려해 보았을 때 혁신적인 기술이라고 할 수 있으며, 미국이나 유럽, 일본 등 기술 선진국에서 경제적으로 나노 임프린트 공정 및 장비기술을 연구하고 있다.[1][4][5]

II. 나노임프린트

나노임프린트(Nano Imprint) 리소그래피는 1990년대 중반 미국 프린스턴 대학교의 Stephen Y.Chou 교수에 의해 도입된 나노제작 방법으로, 낮은 생산성을 갖는

전자빔 리소그래피를 보완할 기술로 주목받고 있다. 나노임프린트 기술은 CD(Compact Disk)와 같은 마이크로 스케일의 패턴을 갖는 고분자 소재 제품의 대량 생산에 사용되는 엠보싱/몰딩 기술을 리소그래피에 적용한 것이다. 나노임프린트 리소그래피의 핵심은 전자빔 리소그래피를 이용하여, 나노스케일의 구조를 갖는 스탬프를 제작하고, 이를 반복 사용함으로써, 전자빔 리소그래피의 생산성 문제를 극복하는 것이다.

임프린트 방식의 공정은 크게 실리콘이나 석영을 스탬프 재료로 사용되는 Hard lithography와 부드러운 PDMS elastomer 스탬프를 사용하는 Soft lithography로 구분될 수 있다. 또한, Hard lithography는 불투명한 실리콘 스탬프를 사용하는 가열식 임프린트와 투명한 Quartz 스탬프를 통해 자외선을 투과시켜 레진을 경화시키는 방식을 채택하는 UV 임프린트 기술로 구분된다.[1][2]

2-1. Hard lithography

2-1-1. 가열식 임프린트

가열식 임프린팅 공정은 고온에서 물리적 접촉에 의해 마스터 패턴을 기판 위에 전사하는 것으로 1995년 프린스턴 Chou교수에 의해 제안되었다. 공정과정을 구체적으로 기술하면, 나노 크기의 패턴이 요철형태로 형성된 마스터를 먼저 제작하고, 이를 Thermoplastic 레진 레지스트가 코팅되어 있는 기판 표면을 고온조건(유리전도 온도 이상의 온도)에서 누른 후 냉각과정을 거쳐 분리하게 된다. 이때 폴리머 레지스트는 유동상태에서 마스터 패턴을 복제하게 된다. 이에 따라 마스터의 나노패턴이 정반대 형태로 전사되고, 이방성 에칭 작업을 거쳐 레지스트 표면에서 늘려진 부분에 남아있는 레지스트 재료를 완전히 제거함으로써 공정은 완료된다.(그림 1참조)

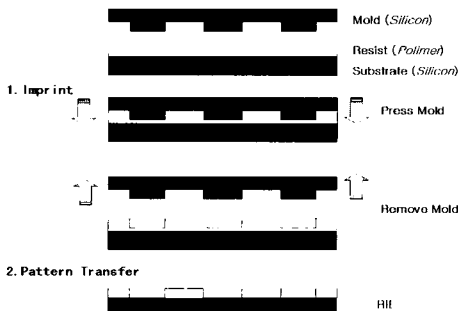


그림 1. 나노임프린트 프로세스

그림 2(a)는 10nm 지름, 60nm 높이의 기둥이 규칙적으로 배열되어 있는 SiO₂ 스탬프를 보여주고 있으며, 그림 2(b)는 실리콘 기판위에 80nm두께로 코팅된 PMMA 위에 고온 상태에서 스탬프를 각인하여 원형 홈을 성형한 모습이다.

그림 2(c)는 반응이온에칭(Reactive Ion Etching: RIE) 과정과 Metal deposition(Ti/Au를 PMMA위에 고르게 증착) 과정을 거친 후 Lift-off 공정을 통해 PMMA와 Ti/Au를 제거하여 만든 10nm 지름의 원형 금속 점들의 배열을 그림 2에서 각각 나타내고 있다.[2][3]

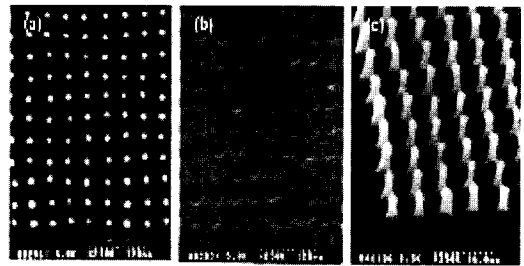


그림2.(a) 나노임프린터 프로세스로 제작된 지름 10nm, 높이 60nm의 기둥의 스탬프 (b) 스탬프에 의하여 각인된 형상의 사진 (c) RIE 과정 후 lift-off 공정을 통한 10nm 지름의 원형 금속점들의 배열 형상

2-1-2. UV 나노임프린트

1999년 텍사스 오스틴 대학의 Willson과 Srenivasan 교수 연구진에 의해 처음으로 제안된 기술로 상온저압 공정을 지향하고 있어 가열식 임프린트에 비해 열변화에 의한 변형을 줄일수 있으며 고정밀도 패턴전사, 고속 공정 및 다층형상 구현시 overlay accuracy를 높일수 있는 장점을 가진 방식으로 임프린트 공정 순서는 그림 3과 같다.

먼저 E-beam등의 나노리소그래피 장비를 통해 투명한 몰드기판 위에 마스터 패턴을 제작한다. 그리고 자외선에 의해 경화되는 (UV curable) Prepolymer 레진을 기판 위에 스핀코팅(또는 디스텐싱 방식을 이용하기도 함) 한 후, 제작된 마스터를 레진 위에 접촉시킨다. 이때 Capillary force에 의해 레진은 패턴 안으로 충전됨으로써 패턴 전사가 이루어지게 된다. 충전이 완료된 후, 투명한 기판을 통과한 자외선은 폴리머 경화를 유발하고 다음 단계에서 마스터 몰드는 제거된다.

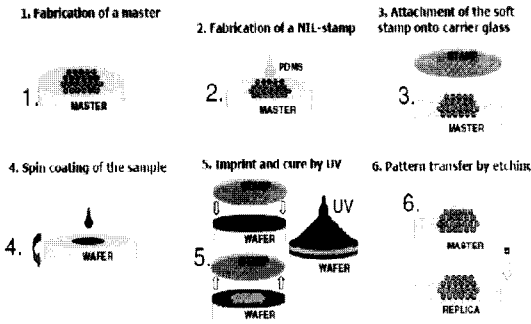


그림 3. UV 나노임프린터 공정 진행도

임프린팅 시 원활한 충전 및 균일한 패턴 사이즈 구현을 위해 마스터 몰드는 기판과의 직접 접촉을 피하게 되는데, 이때 발생하는 잔류 두께는 물리적 식각에 의해 제거된다. 필요에 따라 후가공을 통해 기판 에칭 또는 Metal lift-off 를 수행할 수 있다.

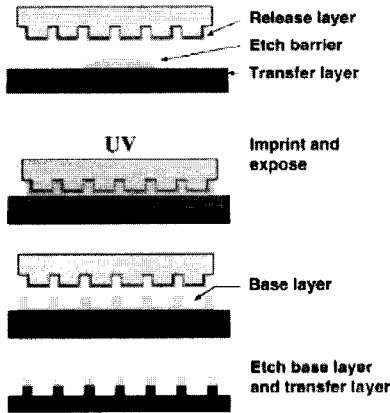


그림 4. SFIL 공정 개략도

UV임프린트는 One-shot 방식의 대면적 공정 이외에 반복적 스텝핑(step and repeat) 방식으로 웨이퍼 스케일 공정이 가능하다. 반복적 스텝핑 UV임프린팅 기술은 텍사스 오스틴 대학의 연구진이 개발한 SFIL(Step and Flash Imprint Lithography)로 알려져 있다 SFIL에서는 레진을 스핀코팅하지 않고, Stamping 되는 구역에 레진을 국소 dispensing 하여 스텝핑 공정으로 완료한 후, 다음 구역으로 이동하는 Multiple dispensing 방식이 적용된다. 공정 결과 실리콘 기판위에 전사된 패턴형상은 그림 5에 나타나있다.

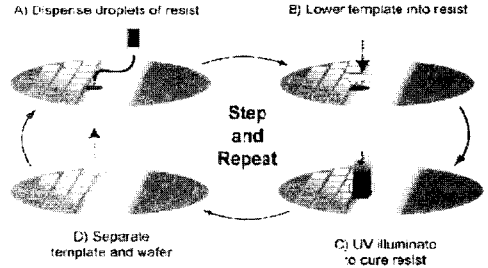


그림5. SFIL의 step and repeat 공정

UV 임프린트에서는 낮은 점성의 UV curable organosilicone monomer 레지스터로 사용하고 UV 투과를 위해 투명한 몰드를 사용하기 때문에, 패턴 정밀도를 높이고(~up to 20nm) 광학적 정렬오차 조절이 가능하다(~100nm). 단 패터닝 소재 선택에 있어 제한이 있으며, 대면적 공정 시 균일한 패턴 두께를 얻는 것이 어려운 단점이 있다. 그림 6은 SFIL에 의해 구현된 패턴과 다층화 된 구조물의 모습을 보여주고 있다.[1][2][3]

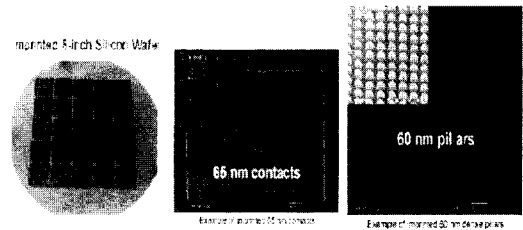


그림6. SFIL의 step and repeat 공정 후 전사된 패턴 형상과 구현된 패턴과 다층화된 구조물 모습

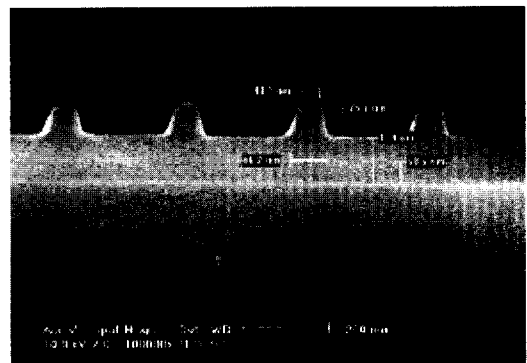


그림 7. SFIL공정에 의한 임프린트 결과 (50nm선폭이미지)

2-2. Soft lithography

2-2-1. Contact 임프린팅

프린팅 방식의 인쇄술은 기존 광학 리소그래피의 대체 기술 중 하나로 1990년 중반 IBM의 연구진에 의해 연구되기 시작되었다. 비슷한 시기인 1993년 하버드 대학의 Kumard와 Whitesides은 Alkanethiol 잉크가 묻은 폴리모가 금도금된 표면과 접촉시 Thiol 단분자막이 형성되는 현상을 발견하여 잉크의 단분자막만을 표면에 전사하는데, 이러한 현상을 이용한 u-contact printing이라는 새로운 공정을 개발하게 되는 계기가 되었다. Hard stamp(Si or Quartz)를 사용하는 UV/thermal 임프린트와는 달리 PDMS soft elastomeric stamp를 사용하여 레지스트 위에 잉크를 마이크로 및 나노스케일로 패터닝하고 형성된 단분자막을 이용하여 나노구조물을 제작하는 방식이다. 이는 Soft lithography의 한 종류 기술이라고 할 수 있다.

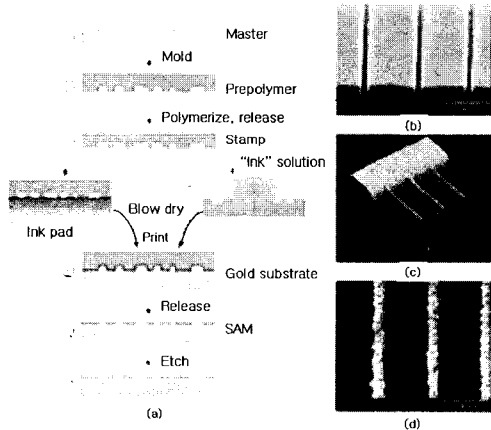


그림 8. (a) μ -contact 임프린팅 공정순서도 (b) 마스터 (c) 스탬프 (d) 프린팅 후 etching 공정 후의 전자주사현미경의 각각의 사진

접촉식 프린트를 구성하는 주요 기술로는 마스터, elastomer, 스탬프, 잉크, 프린팅 장비 등이 있다. 공정순서를 살펴보면, 그림 8(a)에서와 같이, 실리콘 웨이퍼 위에 E-beam이나 기타 나노패턴 구현이 가능한 리소그래피로 마스터 패턴을 제작한 후, Prepolymer를 옹고시킨 후 이를 마스터로부터 떼어냄으로써 스탬프 제작은 완료된다. 다음 단계에서 그림 8(a)-④나 그림 8(a)-⑤의 방

법으로 잉크시키고 이를 금도금 박막 위에 접촉시킨다. 이때 금박막 위에 잉크의 단분자막이 전사되고, 이를 Etch barrier로 이용하여 기판 안으로 물리적 식각(Si 기판인 경우 주로 SF6 gas가 포함된 plasma etching 적용) 공정이 수행된다. 그림 8(b),(c),(d)는 Contact printing 공정의 각 단계에서 구현된 패턴형상을 보여주고 있다. 본 공정 기술은 공정최적화(non diffusive ink사용, 잉크 시간, 스탬프의 기계적 변형 최소화 등)을 통해 100nm급 패턴 제작이 가능한 것으로 보고되고 있다. Soft stamp의 장점인 우수한 Conformal contact 거동을 이용하여, 곡면 프린팅이 가능하기도 하다. 최근에는 스탬프의 soft한 성질과 hard한 성질의 장점을 모두 이용하기 위해 hard backbone을 부착시키는 방법이 고려되고 있다. Ink diffusion으로 인해 100nm이하의 극미세패터닝에 있어 기술적 어려움이 뒤따르는데, 이는 단분자막 위에 구리입자를 전해가공(direct electroless deposition)하는 Bottom-up approach로 극복될 수 있는 것으로 예상된다.[1][2]

2-3. 나노 임프린트 리소그래피의 기술 동향

나노 임프린트 리소그래피는 나노 크기의 구조를 저비용으로 생산할 수 있는 가능성에도 불구하고, 산업체에서 실질적으로 사용하기에는 해결해야 될 문제점이 많이 있다.[1]

2-3-1. 스탬프 제작 관련 기술

나노임프린트 리소그래피 공정을 수행하기 위해서는 마스터 또는 스탬프라고 불리는 마스터 패턴이 새겨진 스탬프가 필요하다.

스탬프의 크기는 한번에 인쇄할 수 있는 면적을 결정하며, 이것은 나노임프린트 리소그래피의 생산성에 영향을 주는 한 요인이다. 스탬프 제작과정에는 다음의 중요한 문제들이 있다. 나노급 패턴을 정교하게 구현할 수 있는 나노리소그래피 기술, 레지스트 상 패턴과 마스터 기판에 식각 후 얻어지는 패턴 사이의 차이, 즉, CD 오차 최소화, 다층화 구조물 구현 기술, 3차원 구조물 구현 등이 있으며, 형상 측정을 위해 전도성 박막을 레지스트와 같이 사용하는 연구도 수행되고 있다. 스탬프 내에서의 미세 패턴의 밀도는 고분자의 유동에 의해 제한되므로, 양각 또는 음각의 패턴이 스탬프 내에서 어떻게 배치되어야 하는가에 대한 설계 규칙에 대한 연구가 진행되어

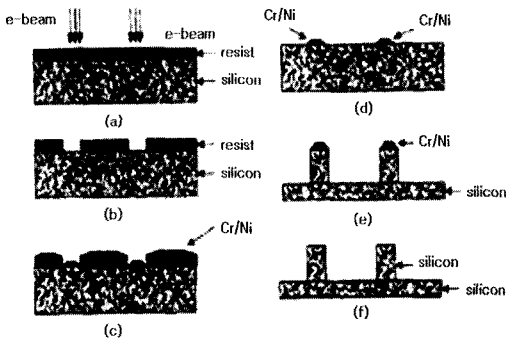


그림 9. (a) exposing the resist (b) developing the resist (c) evaporating Cr/Ni (d) lift-off (e) reactive ion etching into the silicon (f) Cr/Ni etching

야 한다. 스탬프 제작과 더불어 스탬프와 고분자 재료들 간에 접착 문제를 해결하기 위하여, 제작된 스탬프의 표면처리가 중요한 요소로 대두되고 있다. 지금까지 알려진 이형제로서는 가장 일반적으로 이용되고 있는 것이 트리데카플루오르-1,1,2,2-테트라하이드로옥틸트리클로로실란(tridecafluoro-1,1,2,2-tetrahydrooctyltrichlorosilane)으로서 표면에서의 반응 메카니즘은 아래 그림과 같다.

FORMATION OF LOW SURFACE ENERGY RELEASE LAYER

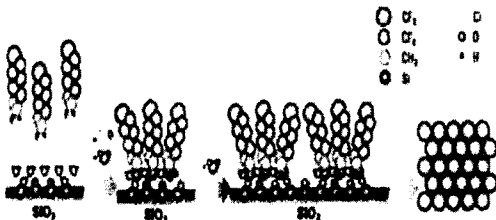


그림 10. 스탬프 표면에서 이형막 형성 메카니즘

플루오르화된 긴 알킬 탄소에 의해 부동 표면을 형성 함으로서 낮은 표면 자유에너지를 가지게 스탬프 표면을 개질하여, 많은 횟수의 임프린트 사이클뿐만 아니라 피롤리돈(pyrrolidone)과 같은 화학약품을 이용한 스탬프 세척에도 견딜 수 있는 표면을 제공한다. 그 외에도 플루오르화된 에틸렌프로필렌 (FEP) 혼성중합체, 테트라플루오렌 고분자, perfluoro-2-butene, Aquaphobe CFTM(Gelest Co.), KP-801MTM(Shine-etsu 화학) 등을 이용한 표면처리 및 스탬프와 고분자 표면과의 접착강도에 관한 연구결과들도 발표되고 있다. 가장 이상적인

것은 고분자의 점탄성 성질, 임프린트 온도, 스탬프와 고분자 사이 계면 에너지의 적절한 조화를 통하여 별도의 이형제를 이용하지 않는 것이다.[1][2]

2-3-2. 임프린트 장비 관련 기술

다양한 방법으로 제작된 스탬프를 이용하여 실제적인 임프린트 공정을 진행하기 위해서 필수적으로 요구 되는 것이 장비의 유용성이다. 현재까지 몇몇 업체에서 6인치 웨이퍼까지 공정이 가능한 장비를 개발, 판매하고 있는데, 이는 연구 개념의 장비이다. 나노임프린팅 공정 장비는 나노패턴의 신뢰성이 있는 구현을 위해 다수 이 중 요소 개발을 전제로 하고 있는데, 구체적으로 정렬기술, 스테이지, 균일한 프레싱 기술, 진동절연장치, 몰드로딩 장치, Demolding, UV임프린팅 공정의 경우 UV조사장치와 Dispensing 또는 폴리머 증착장치, 가열식 임프린팅 공정의 온도조절장치의 세부요소 장치 및 기술 개발이 요구되고 있다.[1][2][3][4]

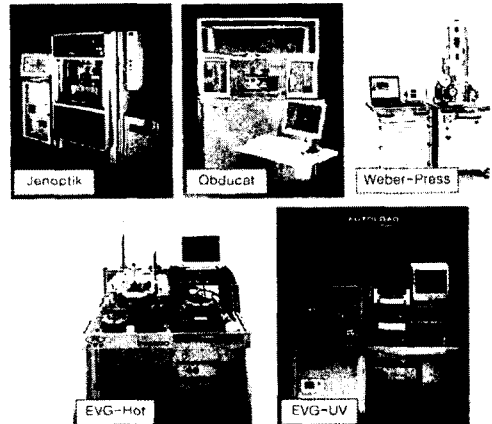


그림 11. 상용화 되어 있는 나노임프린트 장비들

2-3-3. 재료개발

나노임프린트 리소그래피는 기본적으로 스탬프의 나노구조를 폴리머에 각인하여 기판에 전사하는 것으로서 패턴 된 고분자 박막은 다음의 세 가지 정도의 용도로 사용될 수 있다.

- a. 건식 식각을 위한 마스크
- b. 리프트오프 공정을 위한 패턴 형성
- c. 고분자 자체가 전기적, 광학적 특성을 가졌을 경우에는 소자 자체

재료 개발 시 각각의 용도에 따라 차별화 되어 진행되어야 하고 요구되는 물성들도 차별화 되어야 할 것이다.

건식 식각 시, 식각 조건에 대한 선택비가 고려되어야 하고 식각 후 쉽게 제거되어야 한다. 열가소성 고분자와 열 경화성 폴리머를 비교할 경우, 임프린트 공정을 위해서는 낮은 전이온도의 아몰퍼스 열가소성 수지가 좋으나, 건식 식각 안정성을 위해서는 비교적 높은 유리전이온도의 방향족성 고분자가 좋은 상반성을 보이므로 적절한 최적화가 중요함을 알 수 있다.

리프트오프 공정을 위한 패턴형성 재료 역시 건식 식각 마스크 재료와 유사하나, 보다 세밀한 가공이 가능한 전자빔 리소그래피에 적합한 재료가 요구된다. 나노임프린트에서 고분자 재료 역시, 매우 중요한 인자로서 영향을 미치기 때문에 레지스트의 조성과 스탬프 계면에서의 상호작용, 흐름성, 스탬프를 떼어낼 때 재변형 등에 대한 연구가 지속적으로 이루어져서 최적화 및 특화된 재료공급이 수반되어야 할 것으로 생각된다.

광학 폴리머 재료의 개발 방향은 낮은 광 손실, 낮은 굴절률 이방성, 낮은 편광의존 손실, 높은 열 안정성, 좋은 접착 성질, 공정 유용성, 환경적 안정성 등을 만족하는 새로운 재료의 개발이 주된 관심사가 되고 있다.[1][2][3]

2-3-4. 응용기술

공정기술 향상을 위한 연구와 발 맞추어 나노임프린팅 공정에 의한 적용소자 개발 역시 집중적으로 추진되고 있다. 나노임프린트 리소그래피를 이용한 응용은 나노전자, 바이오, 광소자, MEMS등에 다양한 가능성을 가진 공정기술로서의 적용이다.

매우 다양한 분야에 나노임프린트 리소그래피 공정기술이 응용될 수 있는 핵심기술로서 가능성은 충분히 입증되고 있다. 향후 보다 세밀한 공정개발을 진행하여 실제 양산기술로 성숙 발전시키기 위한 노력이 경주되어야 할 것으로 생각된다.[1][2]

Ⅲ. 결론

우수한 나노기술 공정을 하기 위해 세계는 치열한 경쟁을 하고 있다. 새로운 소자의 개발과 이를 저비용으로 고속으로 대량 생산할 수 있는 제조 기술을 확보하기 위해 노력하고 있다. 나노임프린트 리소그래피 기술은 차세대 나노 공정기술에서 핵심적인 위치를 차지하고 있다.

나노임프린트 리소그래피 기술은 반도체 소자 디스플레이 부품, 광통신 부품, 저장 장치 등 다양한 산업과 접목시킬 수 있다. 저비용으로 고속, 대량 생산이 가능한 나노 반도체 제조 기술 개발의 경제적 효과는 엄청날 것이다.

천연자원이 부족한 우리나라에서 미국이나, 일본 등 선진국들과 경쟁하기 위해서 많은 비용과 인력을 투자해야 할 것이다. 단기적인 계획이 아닌 장기적이고 종합적인 계획을 통한 연구 개발을 진행해야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 한국과학기술정보원, “나노공정·측정기술”
- [2] 권재홍, “나노임프린트 공정기술 및 동향”, 주간기술동향 통권 1287호, 2007. 03.
- [3] 최대근, “나노임프린트를 위한 표면처리공정 및 기능성 재료”, 고분자과학과 기술 제17권 2호, 2006. 04
- [4] 김상태, “반도체 산업 기술 및 포토레지스트의 기술 동향”. 고분자과학과 기술 제 16권 제 1호, 2005. 02
- [5] 정태진, “반도체 공정용 리소그래피 기술의 최근 동향”, 전자통신동향분석 제 13권 제5호, 1998. 10

저자소개



고형민(Hyung Min Ko)

2008. 군산대학교 전자정보공학부
재학 중



이종인(Jong In Lee)

1979. 울산대학교 전자공학전공(BS)
1983. 전북대학교 전자공학전공(MS)
1987. 전북대학교 전자공학전공(Ph.D)

1988.~ 현재. 군산대학교 전자정보공학부 교수

2003.~2004. 호주 시드니대학교 객원교수

※ 관심분야: 회로망 해석 및 설계, 아날로그 및 디지털
필터설계



정학기(Hak Kee Jung)

1983. 아주대학교 전자공학과(BS)
1985. 연세대학교 전자공학과(MS)
1990. 연세대학교 전자공학과(Ph.D)
1995. 일본 오사카대학 객원연구원

2004. 호주 그리피스대학 객원연구원

2006. 한국해양정보통신학회 편집이사

2007. 한국해양정보통신학회 상임이사

※ 관심분야: 반도체소자설계 및 시뮬레이션, 몬테카르
로 시뮬레이션