

E-Beam Lithography 및 NSOM Lithography 소개

전자빔 리소그래피기술

전자빔 리소그래피기술은 전자선 감광제를 도포한 시료 면에 전자빔을 조사하여 감광제재를 구성하는 고분자를 결합 또는 절단하여 시료 면상에 감광제 패턴을 형성하는 기술로, 1950년대에 주사형전자현미경의 기술을 기초로 출발했으며, 최근에는 반도체소자, 특히 초 LSI의 제조라인으로 사용되어있는 축소투영노광장치(스텝퍼)용의 레티클(확대mask)의 제작에 있어 핵심적인 기술이다.

본 기술은 최근에 100 nm~50 nm급 나노임프린팅기술이 ITRS(International Technical Road Map for Semiconductor)의 차세대리소그래피 기술로 부각되면서 국내외에서 많은 연구가 진행되고 있는 나노임프린팅 리소그래피(Nanoimprinting Lithography)에서 가장 핵심적인 공정인 마스터 또는 스템프제작에 있어 필수적인 기술이다. 이러한 마스터는 고분해능을 갖는 전자빔 리소그래피 이외에 AFM 및 STM의 probe tip을 이용한 방법이 이용될 수 있으나 정밀도 및 신뢰도 측면에서 전자빔 리소그래피 방법이 가장 확실한 방법이나 Throughput 측면에서는 아직 해결해야 할 문제가 남아있다. 현재 전자빔 리소그래피 기술은 기존의 e-beam lithography, probe lithography 등과 같은 serial-process가 아니라, e-beam projection을 이용한 parallel process 방식이 개발되고 있으며, 다중빔(multi-beam)을 이용하여 생산성을 향상시키고자 하는 방법 등이 연구 제시되고 있다. 특히, parallel process에 의한 electron beam lithography 기술은 소위 projection e-beam lithography 기술로 통칭하여 부르는 기술로서, 산업화가 가능한 생산성의 확보를 전제로 하여 전자빔을 이용하여 프로젝션 형태의 리소그래피 기술의 개발을 말한다.

전자빔 리소그래피기술과 관련하여 지금까지의 연구는 그림2와 같이 미국의 Bell Laboratories, ASML, Applied Materials 의 SCALPEL(SCattering with Angular Limitation Projection Electron-beam Lithography), 미국의 IBM, 일본의 Nikon의 PREVAIL(Projection Reduction Exposure with Variable Axis Immersion Lenses), 일본의 LEEPL사의 LEEPL(Low-Energy Electron-beam Proximity Lithography)라는 명칭으로 활발히 연구되고 있으며, 미세화나



그림 1. 나노패터닝기술의 응용분야.

	Electron Beam Lithography	E-beam Projection Lithography		
		SCALFEL (e-Lith, Lucent, Applied materials, ASML)	PREVAIL (IBM, Nitze)	LEEPL (LEEPL)
System Overview				
Resolution	10 nm	< 100 nm	< 100 nm	< 100 nm
Throughput	1.4 hr (100 cm ²)	25 (300 mm wafers / hr)	20 (300 mm wafers / hr)	40 (300 mm wafers / hr)
Mask	No mask	Membrane mask	Si stencil mask	
Advantage	High resolution	Throughput		
Issue	Throughput	Resolution vs. Throughput		

그림 2. 전자빔 리소그래피 연구현황.

한국기계연구원 최대근 (Choi, Dae-Geun)

전자디바이스의 연구개발용에서는 Throughput 보다는 리소그래피 분해능이 높고 자유도가 높은 장치가 요구되고 있다.

전자빔 리소그래피기술의 특징은 ① 높은 안정도를 갖는 전자 광학계와 진공중의 레이저측정에 의해서 빔편향계의 자기교정이 가능하고, ② 미세패턴 리소그래피가 레이저 측정분해능에 가까운 정밀도로 가능하며, ③ 웨이퍼기판상에 직접 리소그래피 함으로써 다른 공정처리에 의해서 형성한 패턴과 연계하여 고정밀도의 미세패턴 형성이 가능하다. 그러나, ① 최소패턴의 형상이나 치수가 이차전자생성, 감광제특성에 의해서 좌우되며, 분해능은 전자빔크기나 전류밀도분포만으로는 정해지지 않고, ② 리소그래피가 가능한 패턴이 미세화 함에 따라 throughput이 저하하고, ③ 전자광학계를 구성하는 축대칭 자계렌즈의 특성이 구면수차와 색수차에 의해서 제약되고 있다. 다음 그림 3은 전자빔 리소그래피의 경통부의 형상을 나타내고 있다.

전자빔 리소그래피장치는 리소그래피방식에 따라 가우스 빔 (Gauss beam) 방식, 가변빔 정형방식과 투영리소그래피 방식이 있다. 가우스빔방식은 주사전자현미경과 같이 전자총의 소스(crossover)를 자계렌즈로 축소하여 시료면상에 미소 Spot 빔을 형성하는 것으로, 고휘도로 probe전류를 크게 얻을 수 있는 전자원이 요구된다. 연구개발용 전자빔 리소그래피 장치에서는 서브 0.1 μm 영역의 패턴리소그래피가 요구되는데 따라 전자원(electron source)도 LaB6 등의 열전자방출방식보다 휘도가 높은 ZrO/W든지 TiO/W를 전자원으로 하는 열전계방출전자총, W01나 TiC를 이용한 전계방출전자총의 이용이 시도되고 있다. 가변빔 정형방식은 그림 4와 같이 2개의 단형조리개 (Square Aperture)에 의해서 정형한 가변치수의 단형빔을 시료면상에 축소 투영하는 것이다. 제1 단형조리개상을 렌즈로 제2 단형조리개상에 결상하여 정형용 편향기로 결상위치를 제어하는 것으로 단형 빔의 치수를 가변시키는 방식이다. 이 방식은 최소 리소그래피 크기를 작게 하고 또한 빔치수의 가변범위를 크게 함으로써 제2 단형조리개에서의 전류손실이 커져전류이용 효율이 내려감으로써 throughput을 저하시킨다. 또한 리소그래피패턴이 미세화, 고전류밀도화는 Shot수를 증대시키고 spot 빔주사방식과 같이 고정밀도와 고속화의 양립이 곤란하다. 투영리소그래피방식은 패턴의 미세화에 따르는 Shot수의 증대에 의한 throughput의 저하를 해결하는 방법으로서 제2단형조리개부에 리소그래피 패턴블록에 대응하는 stencil mask을 놓아 기본패턴을 블록마다 축소 리소그래피하는 기술개발이 진행되고 있다.

이러한 전자빔 리소그래피기술은 메모리소자 제조공정에서 사용되는 스텝퍼에 비해서 양산성이 낮아 원가 면에서 불리하기 때문에 물리적인 디바이스치수가 특성을 결정하는 고주파용의 FET 등의 제조라인에서 100 nm 정도의 게이트패턴을 형성하거나 그림 5와 같이 기능성 나노패턴을 형성하는데 이용되고 있으며, 높은 성능이 요구되는 ASIC이나 논리 어레이의 배선패턴가공에 있어 전자빔을 이용한 직접가공기술은 매우 중요한 기술이다.

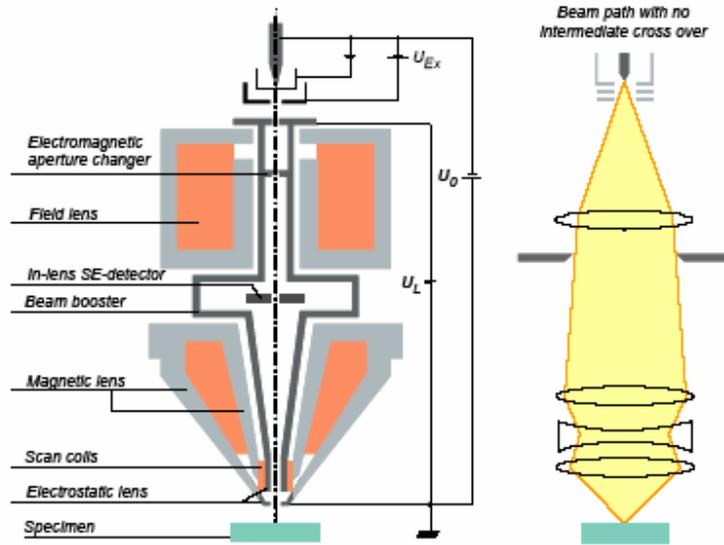


그림 3. 전자빔 리소그래피 경통부 형상 (LEO사, Gemini Column).

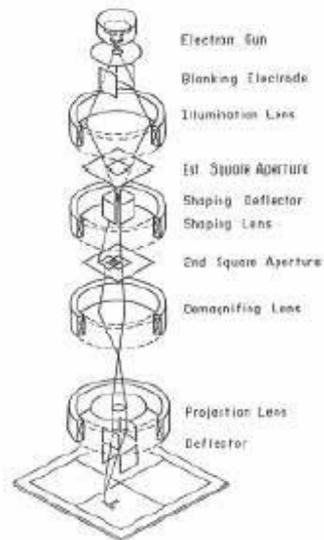


그림 4. 2개의 단형조리개에 의한 가변 빔 정형방식.

한국기계연구원 최대근 (Choi, Dae-Geun)

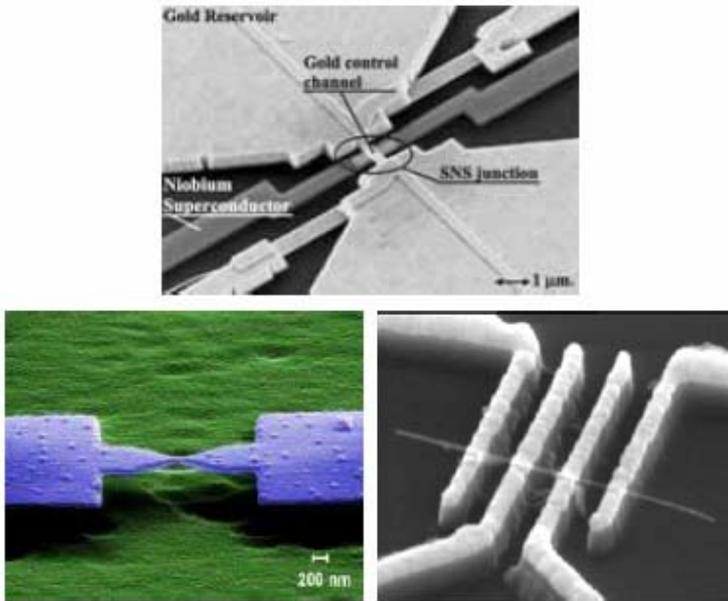


그림 5. 전자빔 리소그래피의 응용분야

근접장현미경 리소그래피(NSOM Lithography)

NSOM 리소그래피는 파장보다 작은 핀 홀(aperture)을 통하여 나오는 근접장 광을 이용하는 것으로, 나노 스케일의 광원을 이용하는 광 리소그래피라고 생각할 수 있다. 그러나 이때 사용되는 핀 홀의 직경이 작아질수록 통과되는 광의 강도는 급격하게 감소되어 100 nm 이하의 핀 홀을 통과하는 경우 10^{-6} 정도의 감쇠가 있다고 알려져 있다. 이러한 점 때문에 일반적으로는 패터닝을 하거나 광 정보 저장장치(Optical Data Storage)의 사용이 매우 어렵기 때문에 광량의 투과율을 높이기 위하여 레이저가 입사하는 핀 홀부의 테이퍼 각(taper angle)을 다단으로 주거나, 근접장 광원의 빔강도(beam intensity)를 높이기 위하여 수십에서 수백 펨토초(femtosecond)의 레이저 펄스를 인가하여 금속박막을 어블레이션(ablation)한 결과도 발표되었다. 이러한 선행연구 결과를 바탕으로 근접장 리소그래피의 효과적인 패터닝을 위하여 펨토초 레이저를 이용한 방법과 UV에 감광성이 좋은 포토레지스터를 이용한 UV 근접장 패터닝이 연구되고 있다.

1. 펨토초레이저 근접장리소그래피와 SAM

최근 광, 반도체, 생명공학에 이르기까지 많은 분야에서 보다 미세하고 정밀한 패터닝 기술의 수요가 증가하면서, 그 사이즈는 마이크로에서 나노단위로 발전하고 다양한 패터닝 기술이 발표되고 있다. 이러한 기술 중 최근에 주목받고 있는 연구중의 하나가 티올(thiol) 분자들의 자기조립박막(self-assembled monolayer, SAM)을 이용한 방법이다. 금이나 은 위에 화학적 흡착으로 형성된 유기물질의 초박막인 자기조립박막은 마찰, 세포나 단백질 등의 연구를 위하여 활발하게 연구되고 있으며 또한 1-2 nm의 매우 얇은 두께를 가지고 있기 때문에 기존의 반도체 공정에서 사용되던 두꺼운 노광물질을 대체할 수 있는 코팅층으로도 관심을 끌고 있다. 티올에 의하여 형성된 자기조립박막은 200 nm 근처의 짧은 파장을 갖는 UV레이저가 조사될 때 주위의 산소와 결합하여 산화되는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 자기조립박막의 노광특성을 연구하기 위하여 광역의 파장에 대한 자기조립박막의 광 흡수율을 측정하여 박막의 광학적 특성을 분석하였으며, 특히 UV영역이 아닌 800 nm의 가시광선 영역의 펨토초 레이저를 조사하여 나노스케일의 패터닝을 하는 방법이다.

SAMs는 지금도 활발하게 연구되고 있는 LB막과 함께 대표적인 유기 분자 박막이다. 그러나, SAMs는 분자막과 표면 사이의 이온결합에만 의존하는 LB막에 비해 기질 표면과의 결합력이 강하여 튼튼한 분자막을 만들 수 있고, 비교적 단순한 도구만으로도 단분자막을 쉽게 만들 수 있어 LB보다 한 단계 발전한 유기 분자 박막이라고 하겠다. SAMs에 대해 간단히 말하자면, 그림 6과 같이 주어진 기질의 표면에 자발적으로 입혀진 규칙적으로 잘 정렬된 단분자막이라 할

한국기계연구원 최대근 (Choi, Dae-Geun)

수 있다. 흡착분자의 구조를 보면 기질과 반응하는 머리 부분(head group)과 분자막의 기능을 좌우하는 꼬리부분의 작용기(tail group) 그리고 규칙적인 분자막 형성을 가능하게 하는 몸통 부분의 긴 알킬 사슬로 구성되어진다. 이 세가지 부분을 적절하게 바꾸면 광에 대한 노광특성이 달라진다.

여러가지 다양한 도구들을 사용하여 이러한 SAMs 표면특성을 알아낼 수 있다. 가장 널리 사용되는 기술로는 infraredspectroscopy, ellipsometer, contact angle by different liquids, x-ray photoelectron spectroscopy, electrochemistry, scanning probe measurement 등을 들 수 있다.

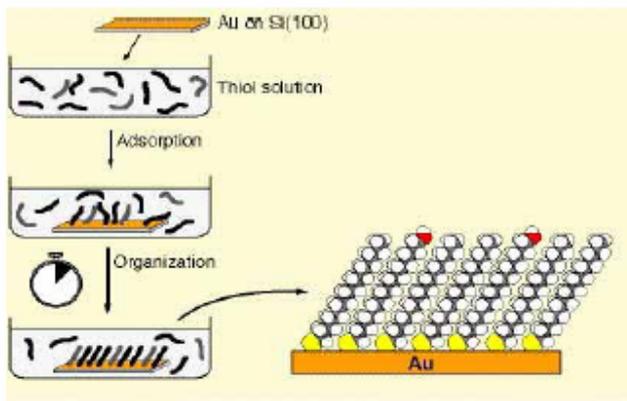


그림 6. Self-assembled monolayers(SAMs) 개념도.

또, 나노스케일의 패턴형성을 하기 위한 방법으로, 그림 7과 같이 펄스 레이저를 근접장현미경(NSOM)에 커플링하는 방법이 있다. 이 방법에서, 펄스 레이저의 경우 중심파장의 범위가 넓어 매질을 통과할 때 파장에 따른 굴절율의 차이로 군속도분산(Group Pulse Dispersion)을 일으켜 펄스 레이저의 특성을 잃어버리게 되기 때문에 펄스 레이저의 펄스가 늘어나는 것을 막기 위하여 가능한 반사형 광학계를 사용하며 광화이버 대신에 내부가 비어있는 나노피펫을 사용한다. 근접장 광의 세기는 그림 8과 같이 핀홀(aperture)의 끝에서 멀어질수록 급격하게 감소하기 때문에 50 nm 이하의 간극을 유지해야 광학적 측정 및 패턴닝이 가능하다.

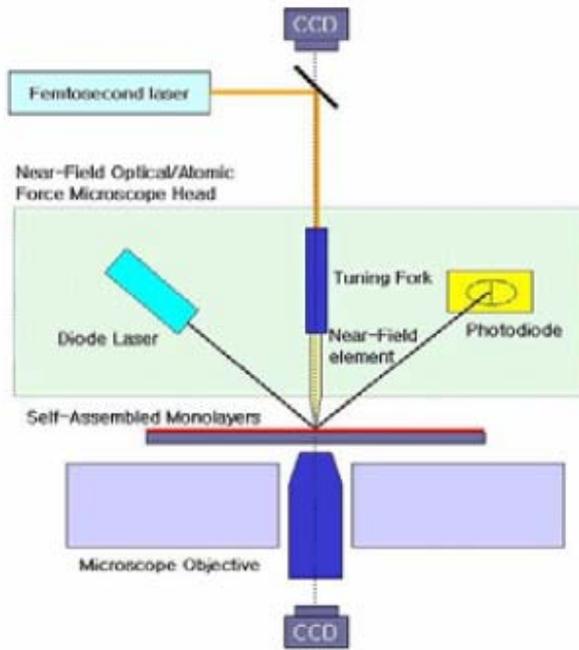


그림 7. 펄초레이저와 NSOM 커플링에 의한 패터닝방법.

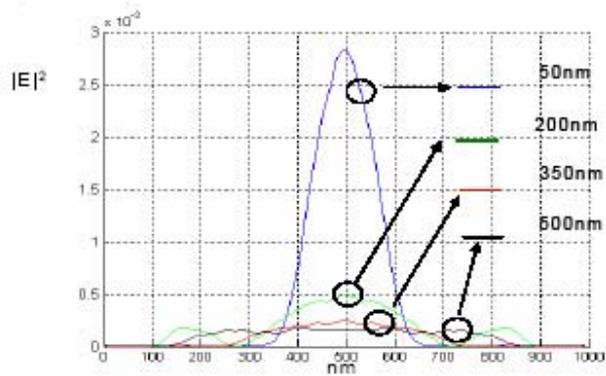


그림 8. 핀홀과 시편의 간격에 따른 근접장광의 세기.

2. 자외선 레이저 근접장 리소그래피

근접장의 나노프로브를 이용한 가공기술로는 비교적 높은 에너지의 레이저빔을 나노프로브에 투과시킴으로써 레이저 빛에 노출된 재료가 어블레이션(ablation)을 통해 직접 가공되도록 하는 방법과, 이와는 달리 비교적 낮은 에너지를 조사하면서 소재에 광화학적 반응을 유도하여 원하는 형태의 가공이 일어나게 하는 방법 등이 있다.

자외선을 이용한 근접장 패터닝 기술은 후자의 경우에 해당하는 기술로, 빛에 민감한 광경화성 액체폴리머에 나노프로브를 통해 빛을 조사하여 빛에 노출된 부분만이 고체구조물로 성형되도록 하는 나노리소그래피기술의 일종이다. 아울러 근접장 부가조형에서는 나노프로브의 이송경로 및 위치를 초정밀이송계를 이용해 임의의 방향으로 제어할 수 있으며 이에 따라 직선 및 곡선 형상을 임의로 가공할 수 있는 장점이 있다. 반도체 공정이나 X-선 리소그래피와 같이 마스크를 필요로 하는 공정의 경우 가공형상이 바뀔 때마다 마스크를 다시 제작하여야 하며 이에 소요되는 경비 및 시간의 부담이 큰데 비하여 근접장 부가조형의 경우 별도의 마스크가 필요 없고 소프트웨어를 통해 이송계의 운동을 제어함으로써 원하는 형상을 수시로 제작할 수 있는 장점이 있다.

그림 9는 자외선 근접장 패터닝을 위한 실험장치를 나타낸 것으로, 우선 레이저 광은 근접장 현미경에 부착된 나노프로브를 통해 초정밀이송계 위에 놓인 시편에 조사된다. 시편표면은 레이저 빛의 파장에 민감하게 반응하는 광폴리머가 코팅되어 있으며 나노프로브에서 생성된 근접장에 의해 경화가 일어난다. 일반적으로 나노프로브의 광투과율이 약 10^{-6} 정도로 매우 작은 값을 가지므로 나노프로브를 이용한 가공의 경우 이와 같이 극히 작은 에너지에서도 가공이 가능하다는 것이 전제되어야 하므로 광민감도가 매우 높은 폴리머를 사용하는 것이 필요하다. 그림 10은 펄스초레이저와 NSOM 커플링에 의한 패터닝결과를 나타낸 것으로, 레이저 파워와 주사속도에 따라 패턴의 폭과 깊이조절이 나노 스케일에서 가능함을 알 수 있다.

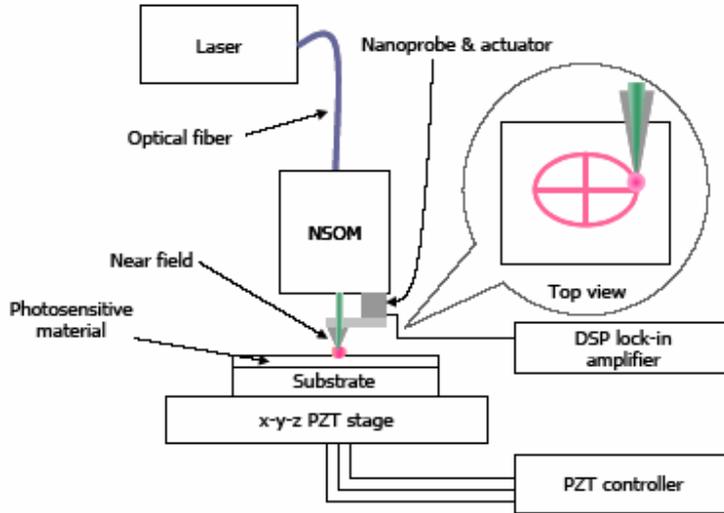


그림 9. UV 레이저와 NSOM 커플링에 의한 패터닝방법.

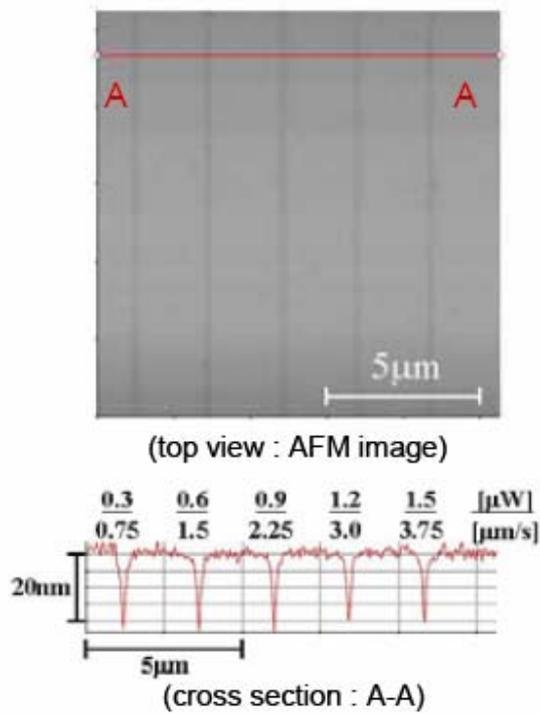


그림 10. UV레이저와 NSOM 커플링에 의한 패터닝결과 (DPR-i5500@435nm).

한국기계연구원 최대근 (Choi, Dae-Geun)

참고: 본고의 전자빔 리소그래피 기술과 근접장현미경 리소그래피 기술에 관한 내용은 참고문헌으로 물리학과 첨단기술 2004년 10월호의 이재중, 장원석 (한국기계연구원)박사님의 글을 요약 하여 소개해 드린걸로 보다 자세한 사항은 참고문헌을 참고하시기 바랍니다.)