



전자선 가공(리소그래피)장비의 개발 현황

이 글에서는 현재 반도체산업 및 전자부품산업 등에서 폭 넓게 사
용하고 있는 전자선 가공장비의 역사 및 국내외 개발 현황에 관하여
소개하고자 한다.

글·조양구 / 한국표준과학연구원
물질량표준연구부, 부장
e-mail · ykcho@kriss.re.kr

나노기술은 전자통신에서 재료, 의약, 생명 과학, 환경, 에너지, 우주, 안보에 이르기까지 거의 모든 분야에 응용될 수 있다. 따라서 나노기술 단독의 시장 규모를 평가하는 것은 크게 의미가 없으며, 나노기술의 응용이 가능한 모든 분야의 시장의 규모를 평가하는 것이 타당하리라 생각한다. 이 경우 나노기술의 시장 규모는 우리가 예측하기 힘든 어마어마한 규모가 될 것이다. 이러한 나노기술의 근간이 되는 것은 나노스케일의 패터닝 기술일 것이다. 따라서 나노 패터닝 기술의 개발은 나노 기술만을 이용한 단일 시장의 규모 이외에 나노 기술을 응용한 모든 분야의 시장을 창출하기 위한 핵심 기술일 것이다.

현재 국내의 나노패터닝 기술 개발에 대한 연구 실적은 크게 두드러진 활동이 보이지 않고 있다. 특히 전자빔이나 나노임프린트에 대한 연구결과는 활발하게 나오지 않고 있다. 원자탐침을 이용한 패터닝 기술은 현재의 패터닝 기술 중에서 최소 크기의 패턴 형태를 정의할 수 있으나 기본 원리상 산업화가 가능한 수준의 생산성의 확보가 불가능하기 때문에 전자빔을 이용한 프로젝션 방식의 나노패터닝 기술에 대한 연구가 반드시 필요하며, 이 기술의 확보를 통하여 나노기술의 응용 및 산업화가 가능하리라 생각된다.

한편 나노스케일의 패터닝에 대한 선진국의 연구는 나노기술의 발전을 국가의 최우선 정책목표로 하고 있는 미국을 중심으로 이루어

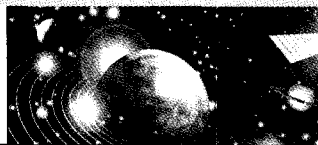
지고 있으며, 일본도 그 뒤를 따르고 있다. 전자빔 프로젝션 리소그래피 기술은 미국의 Bell Laboratories를 중심으로 한 SCALPEL, 미국의 IBM을 중심으로 한 PREVAIL, 그리고 일본의 SONY·NTT를 중심으로 한 LEEPL로 요약할 수 있으며, 이들의 연구 결과에 의하면, 100nm급의 패턴을 형성할 수 있는 기술을 제시한 상황이다. 그 이외의 기술은 아직까지 산업화가 가능한 수준이라고 평가하기 힘들며, 산업화가 가능한 새로운 나노패터닝 기술에 대한 아이디어는 제시되지 않은 상태이다.

전자현미경으로부터의 발달 과정

여기서 전자선 가공장비의 전신이 되는 전자현미경의 개발부터 살펴보면, 1924년에는 도 브로이(L. de Broglie)에 의해서 전자선이 파동성을 갖으며 광선에 유사한 성질을 갖는다고 하는 획기적인 이론을 발표하였다. 이론으로부터 가속전압 60KV라고 하면, 전자선의 파장은 0.005nm로 되기 때문에 빛의 파장의 10만 분의 1만큼 되어, γ 선의 파장에 필적하는 것이 된다.

그럼으로써 전자파가 광파와 비교하여 훨씬 짧은 것을 알았지만, 이것에 의해서 분해능이 높은 현미경을 만들기 위해서는 전자파에 대한 렌즈를 만들지 않으면 안 되었다.

이미 해밀튼(OV. R. Hamilton) 등에 의



해서 “빛이 불균일한 굴절률의 매질중을 진행할 때의 경로는, 하전입자가 전계나 자계의 속을 진행할 때의 궤도와 완전히 동일한 형식에 따른다”라는 것이 발표되어 있고, 이 유사성으로부터 추론한 부쉬(H. Busch)는 1926년에 회전대칭인 자계 또는 전계에 의해서 전자선은 렌즈작용을 받아, 전자상을 확대 또는 축소하는 것을 증명하였다.

이것이 전자기하광학의 선구가 되어, 그 후 몇 사람의 과학자의 손을 거쳐서 현재의 전자기하광학의 기초가 확립되었다. 1931년에 베를린공과대학의 루스카(E. Ruska)가 크놀 교수(M. Knoll)의 지도 아래, 두 개의 속이 빈 코일을 사용한 자계형렌즈를 써서 철망의 상을 약 20배로 확대하는 것에 성공하였다. 이것을 갖고 전자현미경이 광학현미경의 분해능을 능가할 수 있는 것을 실증할 수 있었던 것이다.

1934년에는 루스카의 연구발표에 흥미를 가진 말튼(L. Marton)이, 수평형의 전자현미경을 만들었지만 그 성능은 광학현미경의 영역을 벗어나지 못하였다. 그렇지만, 이것들을 이용하여 사진 건판에 직접 촬영하는 것을 시도했다는 것과 장래생물에 이용될 수 있는 것을 실험적으로 시도한 일은 오늘날까지 중요한 점으로 되어 있다.

1935년에 루스카는 베를린 공과대학에서 지멘스(Siemens) 사로 옮기고, 보리스(B. von Borries)와 협력하여 초고분해능 전자현미경의 완성을 목표로 연구를 계속하여, 1938년 드디어 3nm의 분해능을 갖는 자계형 전자현미경의 완성을 보았다. 그리고 다음 해인 1939년에는 세계 최초의 상용전자현미경을 시장에 내었다. 더욱 같은 해(H. Mahl)이 정전(전계)형 전자현미경의 제작에 성공하여, 그 분해능으로써 8nm를 얻는 데 도달하

였고 광학현미경의 성능을 훨씬 넘는 것에 성공하였다.

일본에서는 1939년에 일본학술진흥회의 안에, 전자현미경특별연구위원회를 구성하여, 세토 조우지(동경 대학 명예교수)위원장을 중심으로 전자현미경의 연구가 시작되었다. 그 후, 1941년경부터 동경 대학, 경도 대학, 오사카 대학, 전기시험소에 있어서 전자현미경의 개발연구가 개시되어, 1947년경에는 각 메이커를 포함하여 본격적으로 전자현미경의 제작에 착수하였다. 이때 일본의 Hitachi, Jeol, Topcon(Akashi), Shimazu 등의 각 회사들이 여러 종류의 전자현미경을 내놓기 시작하였다. 이때까지만 해도 전자현미경은 모두 투과형 전자현미경이었다.

전자선 가공장치의 발전

그 후 1960년대를 전후하여 유럽에서 사용하기가 편한 주사형 전자현미경이 개발되었다. 이러한 주사형 전자현미경의 등장은 빔을 마음대로 방향을 바꿀 수 있게 됨으로써 손쉽게 전자선 패턴을 가공할 수가 있게 되었다.

패턴발생기능을 갖는 전자빔 리소그라피장치는 리소그라피방식으로 분류하면 다음과 같다.

Gauss 빔방식(스폿 빔주사방식)

주사전자현미경과 같이 전자총의 소스(crossover)를 자계렌즈로 축소하여 시료면상에 미소 스폿 빔을 형성하는 것이다. 고휘도로 probe 전류를 크게 얻을 수 있는 전자소스가 요구된다. 연구개발용 전자빔 리소그라피장치에서는 서브 0.1 μm 영역의 패턴리소그라피가 요구되는데 따라 전자소스도 LaB₆ 등의 열전자방출방식보다 휘도가 높은



ZrO/W든지 TiO/W를 전자소스로 하는 열전계방출전자총, W이나 TiC를 이용한 전계방출전자총의 이용이 시도되고 있다. 또한 리소그래피가 가능한 패턴치수의 축소에 따라 빔 이용효율도 저하되기 때문에 필연적으로 수율도 저하한다. 미세한 패턴이나 고정밀도화가 필요한 패턴의 윤곽부를 미소빔으로 리소그래피하여 고정밀도화를 필요로 하지 않는 비교적 큰 패턴이거나 패턴 내의 over-writing에는 빔 전류가 높은 굵은 빔을 이용하는 방식도 연구되고 있다.

가변 빔 정형방식

가변빔 정형방식은 수율이 낮은 스폿 빔 주사방식을 바꿀 수 있는 방식으로서 제안되었다. 스폿 빔 주사방식에 있어서의 실용적인 최소 리소그래피 크기는 패턴치수의 안정성, 재현성의 관점에서 빔 직경의 3, 4배 정도를 필요로 한다. 거기서 사각 빔방식에서는 최소 리소그래피 크기에 대응하는 사각 조리개(square aperture)위의 상을 시료면상에 직접 형성시키는 것이다.

가변빔 정형방식은 두 개의 사각 조리개에 의해서 정형한 가변치수의 사각 빔을 시료면상에 축소 투영하는 것이다. 제1사각 조리개 상을 렌즈로 제2사각 조리개 상에 결상하여 정형용 편향기로 결상위치를 제어하는 것으로 사각 빔의 치수를 가변시키고 있다.

가변 빔 정형방식에서는 최소 리소그래피 크기를 작게 하고 또한 빔 치수의 가변범위를 크게 하는 것은 제2사각 조리개에서의 전류 손실이 커져 전류이용효율이 내려감으로써 수율을 저하시킨다. 또한 리소그래피 패턴이 미세화, 고전류밀도화는 빔의 동작을 증대시키며 스폿 빔 주사방식과 같이 고정밀도와 고속화의 양립이 곤란하다.

Block(cell)투사식 리소그래피

패턴이 미세화에 따르는 shot수의 증대에 의한 수율의 저하를 해결하는 방법으로서 제2사각 조리개부에 리소그래피 패턴 블록에 대응하는 stencil mask을 놓아 기본패턴을 블록마다 축소하여 리소그래피하는 기술의 개발이 진행되고 있다. 전자빔 프로젝션 리소그래피 기술은 미국의 Bell Laboratories를 중심으로 한 SCALPEL, 미국의 IBM을 중심으로 한 PREVAIL, 그리고 일본의 LEEPL을 중심으로 한 LEEPL로 요약할 수 있으며, 이들의 연구 결과에 의하면, 100nm급의 패턴을 형성할 수 있는 기술을 제시한 상황이다.

전자선 가공장비의 독자 개발

경통의 설계제작

현재 국내에서는 이러한 전자선렌즈설계나 관련 기초지식이 없어 이러한 분야의 연구가 거의 이루어지지 않았으나 앞으로의 나노패턴을 연구하기 위해서는 필수적으로 전자렌즈의 연구를 수행해야 하는 관계로 지난 수년간 시행착오를 거듭하며 독자적으로 스폿 빔방식의 전자선 리소그래피 장비를 개발하였다.

자기렌즈를 설계하는 데에서 중요한 것은 필라멘트와 집속렌즈와의 결합이다. 먼저 필라멘트는 개발의 용이함으로 인해 텅스텐선을 구부린 헤어핀타입의 필라멘트를 독자적으로 설계하여 개발하였다. 이러한 텅스텐 필라멘트는 전계방출방식과 비교하여 진공이나쁜 상태에서도 쉽게 산화되지 않고 가격이 싸므로 초기 개발에는 전계방출방식보다 유리하다.

이러한 텅스텐이 고압전원에 의해 가열이

될 때 약 2,000°C 이상이 유지될 때 최대한의 열전자가 방출하여 높은 휘도를 내며 자기렌즈 안으로 들어가 제1단 집속렌즈에서 꺾이고 이것을 다시 약하게 꺾음으로써 주사코일 안쪽으로 집속이 되게 들어가게 한 후 대물렌즈에서 빔 사이즈를 최대한 작게 집속을 한 후 XY-스캔 코일에 가해주는 패턴 제너레이터 신호에 의해 전자선 빔을 자유로이 꺾어서 패턴을 만들 수 있는 것이다.

빔 브래킹장비의 설계제작

빔 브래킹장비는 필라멘트에서 발생되어 나오는 전자선 빔을 전장의 힘으로 꺾음으로써 빔의 서터 역할을 하려는 목적이다. 이러한 빔 브래킹 장비는 크게 자기방식과 정전방식이 있으며 자기방식의 경우에는 고속으로 스위칭을 할 때 코일 주변의 자성재료의 자기이력곡선으로 말미암아 파형의 왜곡이 심한 관계로 최근에는 대부분의 빔 브래킹장비가 정전방식을 채택하고 있으므로 본 연구팀에서

도 정전방식을 택하게 되었다.

또한 이러한 정전방식의 경우 그림에 나와 있듯이 상층부와 하층부에 두는 방식이 있는데 상층부에 설치할 경우 빔의 크로스 오버 포인트에서 전장을 가할 수 있음으로써 가장 깨끗하게 잔상이 없이 빔을 끊을 수 있는데 반해서 빔 브래킹장비의 삽입으로 인한 광축의 보정이 매우 어려워 새로이 렌즈계통을 설계하여야 하는 어려움이 있으며 하층부에 놓고 설계할 경우 빔 조리개 바로 밑에 둠으로써 비교적 깨끗하게 상을 끊을 수 있는데 반해 광축이 약간 증가함으로써 대물렌즈의 전류값을 약하게 할 필요가 있다. 이 두 가지 방식 어느 쪽이나 기존의 주사전자현미경의 광학계를 그대로 사용하고 조정할 경우 화상의 저하가 나오게 되므로 전용 노광장비와의 화질 차이가 바로 이곳에서 발생하게 된다. 현재 개발을 서두르다 보니 정확한 화상의 증가를 구하는 작업은 뒤로 하고 일단 전체 빔 브래킹장비의 하드웨어와 이것을 구동시키기 위한 전원장비를 설계하여 일부 제작 시험하였다. 설계상의 치수는 전극판 간격 2.5mm, 공급전압 100~150V로 30KV로 가속해오는 전자선을 꺾을 수 있는 설계를 하였다.

고안정 고압전원의 개발

특수 설계한 스위칭방식에 의한 고 안정성 고압회로는 높은 안정도가 필요한 전자현미경의 전원으로 손색이 없었으며(안정도 ppm 수준) 종전에 제작한 유침식에 비해 높은 전압 안정성은 소형 경통으로 10만 배까지 확대해서 시료를 관측할 수 있었다. 이러한 개발품이 양산시 가격 경쟁력을 지녀야 하므로 국산 부품의 적용에 의한 부품수급의 원활화와 가격상승을 억제하는 데 성공하였다.

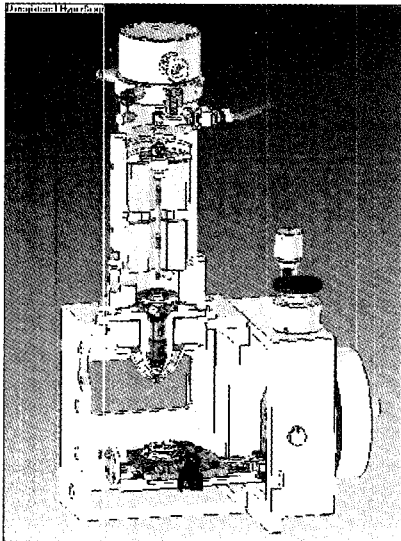
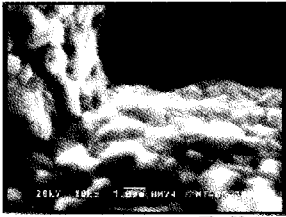
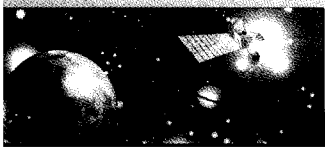
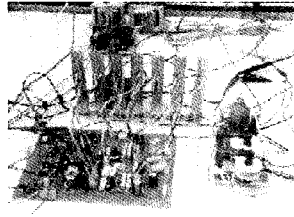


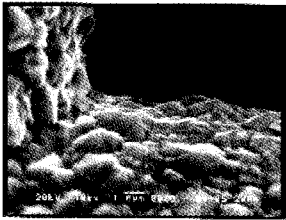
그림 1 경통에 빔 브래킹장치가 장착된 모습



중전의 고급전원



고압전류기판



현재 개발된 특수 고압전원



고압전류시판기

그림 2 개발한 고압전원

디지털영상처리부(Scan 발생부 및 Image 영상처리부) 설계 제작

여기서 지금까지 제작한 아날로그 방식의 제어회로를 대부분 디지털회로로 개조하지 않는 한 고속으로 나노패턴을 생성할 수 없기 때문에 불가피하게 기존의 화상처리 부분을 디지털화하게 되었다. 또한 기존의 전자선 빔을 직접 꺾어 미세한 곡선이나 패턴을 그리기 위해서는 기존의 주사코일이 디지털화된 패턴 제너레이터와 연결이 되어야 하는데 그러기 위해서도 화상처리 분야의 디지털화 작업이 필수적이다.

Scan 발생부 및 image 영상처리부의 전자회로 설계를 위해 32bit RISC CPU인 S3C2410(Samsung, ARM9계열)을 사용하였다. 기존의 X, Y scan을 위해 고속의 AD converter를 사용하여 scan mode를 full, half, photo 1, photo 2의 네 가지 모드로 설계하였다. 또 얻어진 시료의 image를 회전시키는 mode(image scan rota-

tion mode)를 위한 기능을 추가하는 연구도 진행하고 있다.

주된 설계 포인트는 다음과 같다;

- PC의 운영 프로그램에서 USB나 network를 통해 설정 파라미터를 받는다.
- 설정된 scan mode에 따라 X, Y scan 신호 data를 CPU (S3C2410)에서 timer에 의해 발생시킨다.
- 고속의 D/A에서는 scan mode에 따른 scan 신호를 발생시킨다.
- Scan 신호에 따라 probe 주사 신호로 변환되어 시료를 주사한다.

- 주사된 시료에서 발생된 2차 전자를 capture하여 pre-amp를 통한다.
- 고속 A/D 변환기에서는 pre-amp의 출

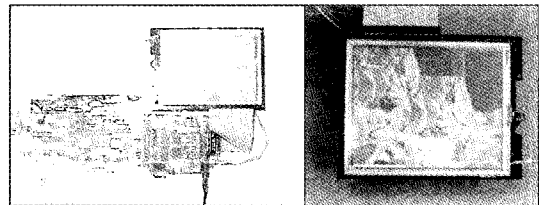


그림 3 실제 제작된 디지털 영상보드(액정화면에 영상출력)

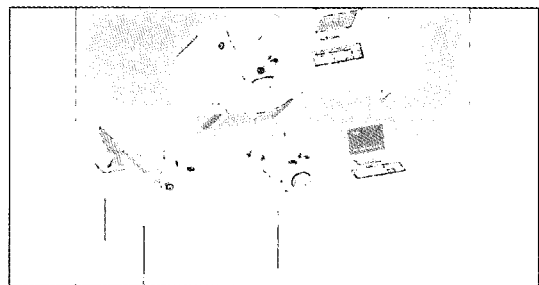
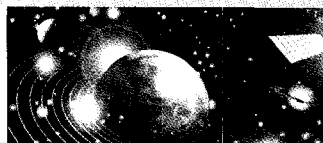


그림 4 현재 조립 중인 모델의 완성 예상도



력신호를 디지털로 변환시키고 FIFO에 연속적으로 저장한다.

- 1 frame의 주사가 완료되면 FIFO에 저장된 image data를 구동 board에 부착된 TFT LCD에 표시하거나 USB 또는 network로 전달하여 PC의 운영 프로그램에 표시한다.

독자적인 고유모델 개발

현재 그림처럼 우리나라 고유모델의 디지털 전자선 노광장비를 개발하고 있으며 여기에는 다음과 같은 사항이 고려되었다.

- 우리나라의 현실에 맞는 독자적인 고유 모델설계개발(디지털, 다목적, 변형가능 등)
- 외국의 기술도움 없이 자체설계개발(모든 분야에서의 기술자립)
- 각 부품의 기술자립을 통한 원가절감 잠재적 응용성으로는 다음과 같다.
- 전자부품의 마스크가공 : 각종 광학기기의 마스크제작
- 각종 산업용 기계에의 전자현미경 경통 공급 : 반도체, LCD산업 등 정밀기계공업 이용분야
- 기타 하전입자 광학을 이용한 분석, 가공 장치에의 이용 : 새로운 첨단분석장비 개발 등이 있겠다.

전 망

나노기술은 전자통신에서 재료, 의약, 생명과학, 환경, 에너지, 우주, 안보에 이르기까지 거의 모든 분야에 응용될 수 있다. 따라서 나노기술 단독의 시장 규모를 평가하는 것은 크게 의미가 없으며, 나노기술의 응용이 가능한 모든 분야의 시장의 규모를 평가하는 것이 타당하리라 생각한다. 이 경우 나노기술의 시

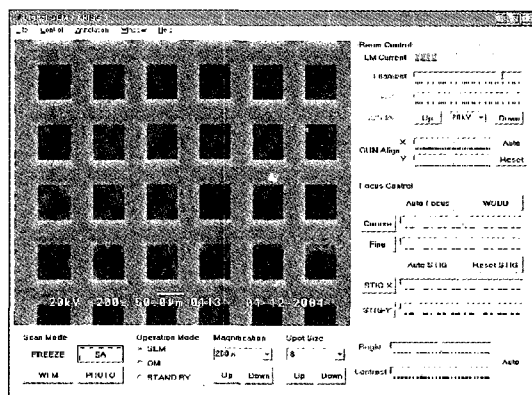


그림 5 현재 개발 중인 디스플레이 모듈

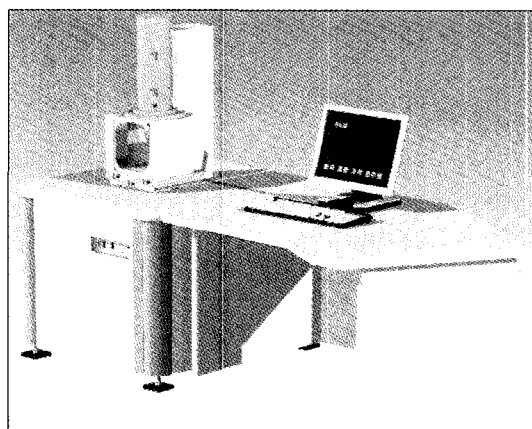


그림 6 연내 개발제품의 완성도

장 규모는 우리가 예측하기 힘든 어마어마한 규모가 될 것이다. 이러한 나노기술의 근간이 되는 것은 나노스케일의 패터닝 기술일 것이다. 여기서 이러한 나노 패터닝의 마스크를 만드는 데에 전자선 가공기술은 필수적인 기술로서 나노 패터닝 기술의 개발은 나노기술만을 이용한 단일 시장의 규모 이외에 나노기술을 응용한 모든 분야의 시장을 창출하기 위한 핵심 기술인 것이다. 나노 패터닝 기술의 개발과 더불어 나노 패터닝 장비의 개발을 동시에 수행한다면 나노 패터닝 기술의 개발로 인해 얻어지는 부가가치는 실로 엄청날 것이다.