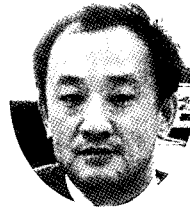


전자빔 응용 나노가공 기술



이 찬 홍

한국기계연구원 공작기계그룹



강 재 훈

한국기계연구원
지능생산시스템그룹

반도체산업 분야와 관련한 IC 소자의 경우에 있어서는 더욱 초고집적화 되어지는 회로의 필요성에 대응하기 위하여 최근에 전세계적으로 0.13 μm 의 패턴성형 기술이 개발되어 상용화되고 있으며, 90nm 이하까지도 도달할 수 있다는 가능성을 확인한 바 있다. 상대적으로 가격이 저렴하고 사용이 용이하여 널리 적용되던 기존의 광학식 노광장비는 해상도의 한계로 인하여 가능한 최소 선폭이 약 0.2 μm 정

도로 국한되며, 이보다 더욱 미세한 선폭의 경우에 있어서는 X-ray 혹은 전자빔 등을 이용한 방식에 의존하게 되는 추세이다.

이와 같은 경향은 그림 1에 나타낸 바와 같이 반도체 관련 기술의 개발이 더욱 가속화되면서 라인 패턴성형에 대한 요구 정도가 과거에 비하여 급속히 변화되어 2001년에는 이미 향후 2년 이내에 70nm급의 초미세 선폭을 목표로

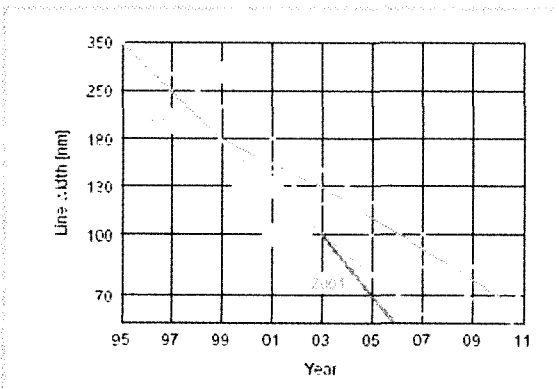


그림 1. 반도체소자에 요구되는 패턴 성형 폭의 요구 추세

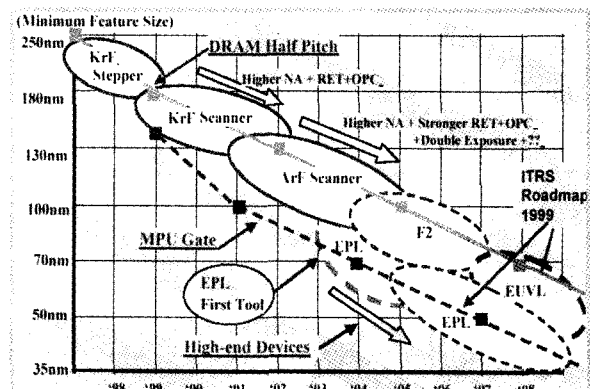


그림 2. 초미세 형상의 패턴에 대응하기 위한 노광원의 변화 추세

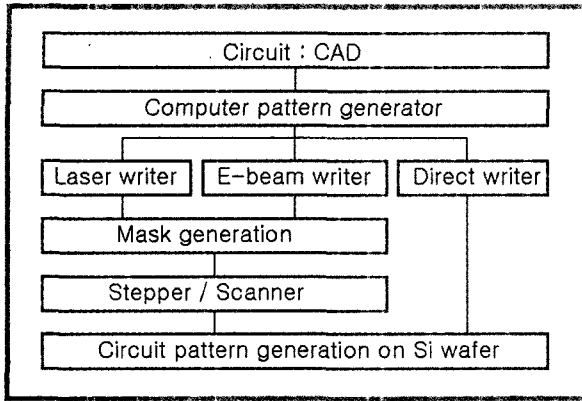


그림 3. 초미세 선폭의 패턴성형을 위한 노광방식의 비교

하고 있다는 것과 그림 2에 나타난 바와 같이 이러한 목표를 달성하기 위해서는 KrF, ArF의 자외선 빔을 거쳐 보다 더 파장이 짧은 F₂의 극자외선 빔 혹은, 전자빔을 노광원으로 채택할 수 밖에 없을 것이라는 예측에 의해서도 확인할 수 있다.

현재 반도체 산업 분야에 있어서 초미세 선폭의 패턴성형을 위한 노광공정은 그림 3에 나타난 바와 같이 레이저 빔이나 전자빔을 이용하여 마스크를 제작한 후에 스텝퍼 등을 이용한 투사방식으로 패턴을 성형하거나 마스크를 배제한 직접성형 방식으로 패턴을 성형하는 형태로 분류할 수 있으며, 아직은 여러 가지의 제반 문제점들로 인하여 직접성형 방식이 노광공정에도 부분적으로 적용되긴 하지만 양산 라인에서 보다는 시제작용 분야에 주로 편중되거나 마스크와 미소한 구조물 등의 제작 등에 활용되고 있는 실정이다.

이와 같은 노광 및 직접 성형 등의 제거가공 외에도 전자빔을 응용한 분야로는 원천적인 초기의 목적인 SEM(Scanning Electron Microscopy: 주사식 전자현미경) 측정을 비롯하여 금속재료 등의 표면개질 처리, 용접, CVD와의 중합처리 등을 들 수 있다.

전자빔을 이용한 가공기술은 SEM을 사용하는 과정에 있어서 전자의 흐름을 집중하여 조사하면 집중된 에너지가 열에너지로 변환되어 대상물 표면의 일부가 용융되어져 국부적으로 소실된다는 현상으로부터 착안된 것이다.

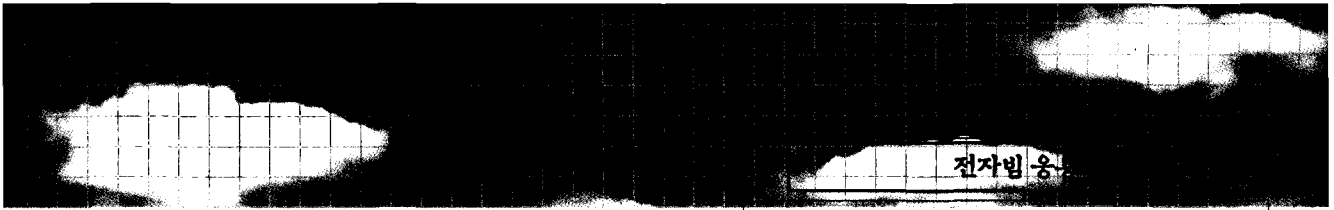
전자빔을 이용한 가공시스템은 전자현미경의 일종인

SEM을 기본구조로써 채택하게 되므로, 전자빔을 이용한 가공기술을 이해하기 위해서는 우선 SEM을 포함한 전자현미경과 관련된 기본적인 지식을 알아둘 필요가 있다. 전자현미경은 광학현미경에 있어서 광선과 광학렌즈가 수행하는 역할을 전자빔과 전자렌즈로 대체하여 대상물의 확대상을 결상시켜 관찰하는 현미경의 일종이라고 간단하게 정의할 수 있으며, 광학현미경의 분해능은 광원의 파장에 의하여 제한되지만 전자빔의 파장은 0.1 μm 이하로 매우 짧아서 광학현미경으로는 관찰할 수 없었던 바이러스 등의 미생물까지도 선명하게 관찰할 수 있다.

전자빔은 전자선이라고도 하며 파장이 약 0.1~0.005 μm 정도로 극히 짧으므로 고진공 분위기나 전기장, 자기장이 형성되지 않을 경우에는 직선으로 전파되는 특성을 지닌다. 전자는 음전기를 지니는 입자이며, 전기장 혹은 자기장 내에서는 그 진로가 변화하므로 이와 같은 현상을 이용하여 전자들을 집중시킬 수 있는 정전 및 자기장형의 전자렌즈를 제작하여 적용하게 된다.

전자현미경에서는 이와 같은 자기장형 전자렌즈를 채택하며 전자들은 렌즈 축에 대한 임의의 지점으로부터 여러 기울기로 방출된 후, 코일을 권선한 형태를 지니는 전자렌즈에 전류를 통하여 형성한 자기장에 의하여 회전운동이 이뤄져 축을 중심으로 한 바퀴 회전한 후 다시 동일한 축상의 다른 지점에서 만나게 되므로 자기장형 전자렌즈에 있어서는 축에 대하여 상이 회전한다는 특징을 지니게 된다. 자기장의 세기가 클수록 초점거리가 짧게 되므로 코일의 주위에는 철 계통의 덮개를 부착시키는 한편, 안쪽에는 고순도 순철 계통의 자극편을 형성시키는 전자렌즈를 적용함으로써 자기장이 자극편의 작은 간극에만 집중적으로 형성되어져 초점거리가 짧으면서도 강력한 렌즈의 효과를 기대할 수 있으며 광학렌즈와는 달리 코일의 전류를 변화하여 초점거리를 자유롭게 변경할 수 있다는 장점도 얻을 수 있다.

전자현미경은 결상방법이나 사용목적에 따라 일반적으로 투과형, 표면방출형, 주사형의 3종류로 크게 분류할 수 있으며, 주사형 전자현미경인 SEM은 1938년에 독일의 M. Arden이 제안하여 실용화된 것으로써 전자총(빔건)으로부터 방출된 전자빔을 대상으로 다수의 자기장형 전자렌즈를



이용하여 약 100nm 이하의 직경을 지니는 미세한 빔으로 집속시켜 대상물에 주사하고, 이 때에 전자가 도달된 곳으로부터 공작물의 물성과 형상에 따라 변화되어 방출되는 2차 전자의 신호를 관측용 CRT의 휘도로 변화시켜 미세한 형상으로 확대되어 나타나게 하는 기구를 지닌다.

전자빔을 이용한 노광방식은 SEM의 경우와 같이 전자빔을 주사함으로써 증착되는 에너지를 이용하여 레지스트 필름 층에 대한 원하는 바대로의 패턴 등 형상을 성형하는 것이며, 초기에는 X-ray 노광장비용 마스크나 초고집적 회로 디바이스의 급속 시작품용 가공에 적용하였으나 최근에는 바이오 센서와 초미세 형상의 미소 금형 및 마이크로 머신 부품 등의 가공에도 널리 적용하고 있는 실정이다.

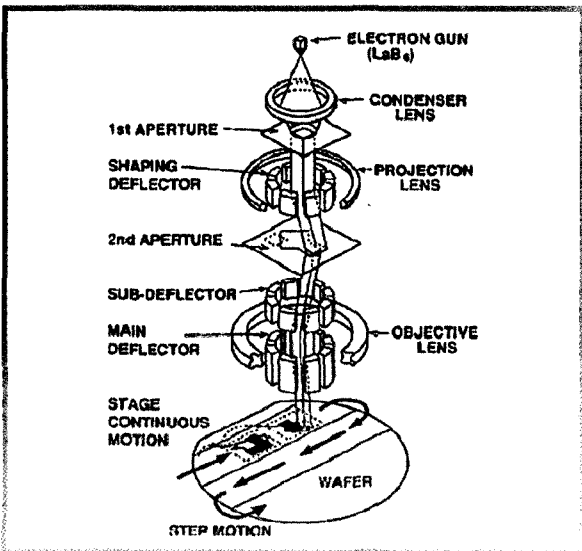
전자빔원을 형성하는 것이나 대상물 표면에 대하여 주사하는 것은 일상 생활에서 항상 마주치는 TV용 브라운관이나 PC용 모니터의 경우와 매우 흡사하다고 할 수 있다. 즉, 전자빔이 충돌하여 방광되는 과정에 의하여 비교적 큰 점 형태의 격자를 형성하며 스크린의 표면에 전자빔이 주사된다는 것과는 유사하며, 전자빔 가공에 있어서는 약 1,000배 이상의 높은 해상도를 지닌다는 차이가 있다.

전자빔을 이용한 가공방식은 다양한 소재의 대상물에 적

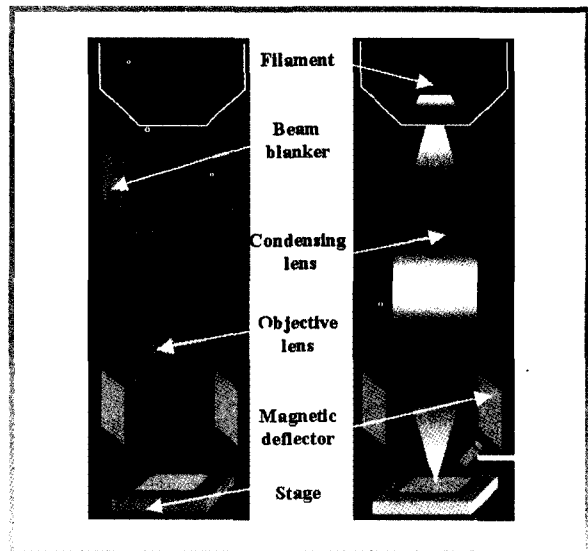
용할 수 있으며, 원하는 바대로의 임의의 형상을 성형할 수 있고 특히, 30nm 이하의 매우 높은 해상도를 발휘할 수 있다는 장점을 지니는 반면에 가공 처리 속도가 느리고 전용 시스템이 고가라는 단점을 지닌다.

따라서 전자빔을 이용한 노광방식은 패턴의 성형 처리 속도가 상대적으로 늦다는 불리한 점을 지녀 아직은 글라스 마스크나 임프린팅용 스텝퍼 등의 패턴을 성형하는 분야에 국한되어 주로 적용되기도 한다. 최근까지도 약 150nm 이상의 크기와 이보다 작은 크기를 지니는 패턴 성형 분야들에 있어서는 각각 UV와 X-ray의 투영 방식을 채택한 성형 방법이 대량 생산화를 위한 주요한 기법으로 채택되는 것이 사실이다. 그러나 이러한 기법들은 1회에 단위 라인을 성형하는 것이 아니라 전체적인 패턴을 동시에 성형하는 것이므로 직접성형 방식의 가공분야에는 채택되지 못한다는 결점이 따른다.

SEM의 경우에는 일반적으로 30keV의 최대 가속전압을 적용하는 반면에 전자빔을 이용한 가공시스템에 있어서는 높은 Aspect ratio의 초미세 가공을 수행하는 경우도 있으므로 10~100keV의 다양한 용량을 적용하고 있으며, 따라서 시스템의 크기도 SEM에 비하여 매우 큰 사례도 있다.



투사방식의 전자빔 가공시스템



직접성형방식의 전자빔 가공시스템

그림 4. 전자빔을 이용한 초미세 가공시스템의 분류

최근에 독일의 WMI 연구소에서는 25keV의 가속전압으로 2nm의 직경을 지니는 전자빔을 형성하여 단위 원자 크기라고 할 수 있는 약 10nm의 극미세 선폭 패턴 성형에 성공했다는 보고도 있다.

앞에서도 서술한 바 있지만 그림 4에 나타난 바와 같이 전자빔을 이용한 초미세 가공시스템은 직접 성형 방식과 마스크를 사용하는 투사 성형 방식으로 크게 분류할 수 있으며, 직접 성형 방식은 마스크를 제작하여 사용하지 않고도 상대적으로 고해상도를 발휘할 수 있는 자유 형태의 임의 패턴을 성형할 수 있으나 생산 처리 성능에서는 저하된다는 단점을 지닌다.

전자빔을 이용한 가공시스템은 고전압 발생장치와 경통, 진공 챔버 및 대상물을 이동하는 장치와 전기적인 제어부로 크게 분류되어 구성되며, 세부적으로 경통은 빔진, 빔집속 코일렌즈, 빔 변형기구, 빔 블랭커, 빔 스티그메이터, 빔

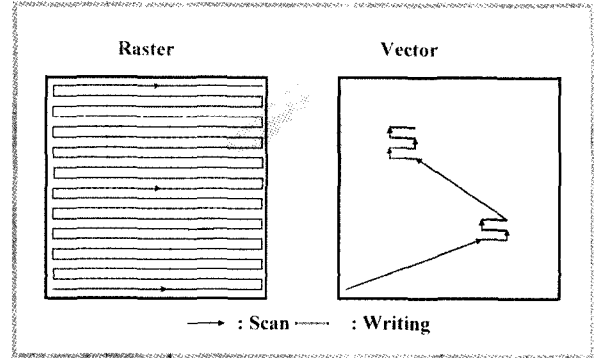


그림 5. 전자빔을 이용한 가공에 있어서 전자빔 주사방식의 비교

어퍼쳐, 빔 얼라이먼트 등으로 구성되는 한편, 챔버는 2차 전자검출기 등을 갖춘 주요 핵심 H/W 유니트들로써 구성된다.

경통은 고전압 발생장치로부터 생성된 가속전압에 의하

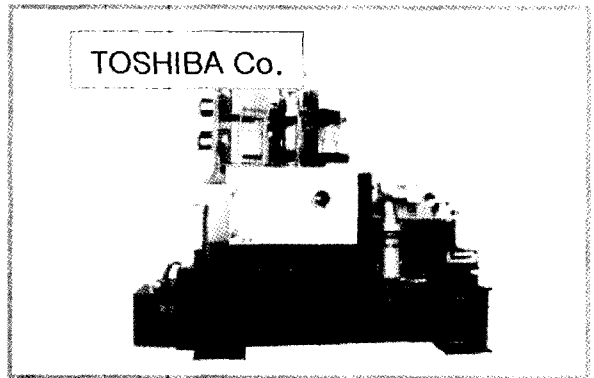
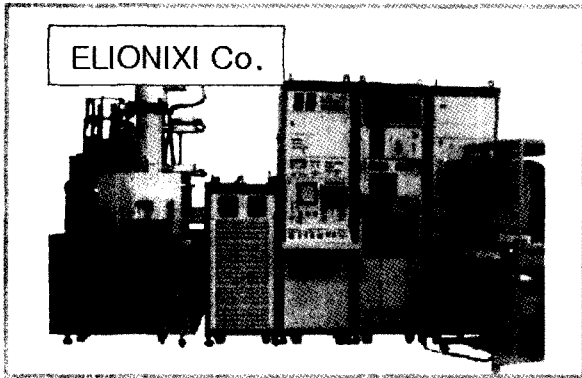
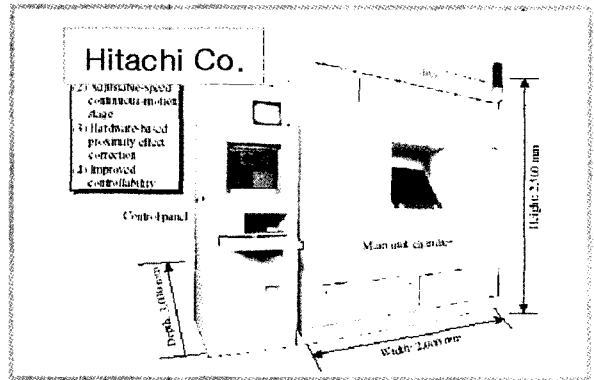
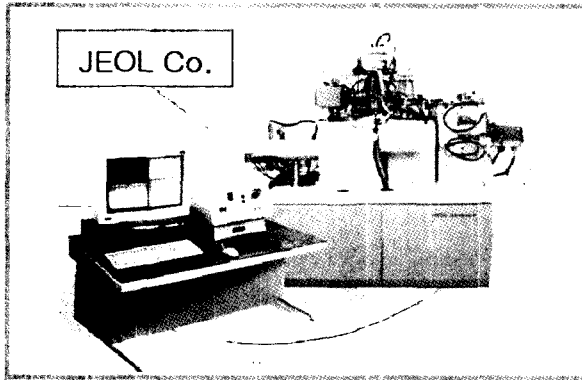


그림 6. 시판중인 전자빔을 이용한 전용 가공시스템의 예

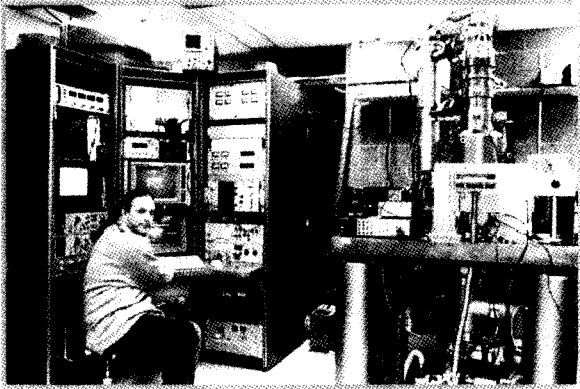
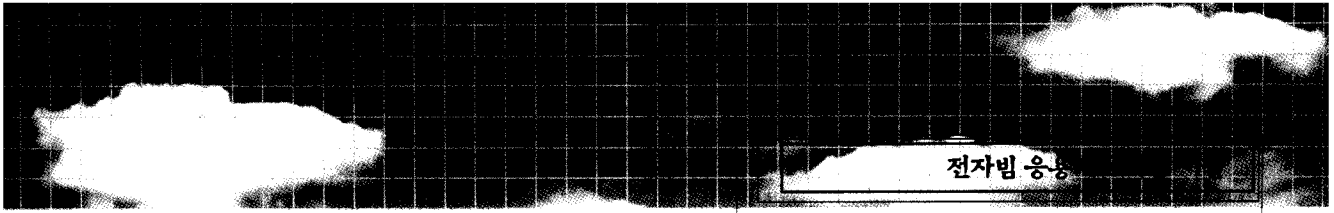


그림 7. 미국의 MIT 공대에서 구축하여 활용중인 전자빔을 이용한 가공시스템

여 전자빔을 형성하고 조절하는 부위로서 전자들이 광속에 유사하게 가속되도록 하는 한편, 다수의 전자기적인 코일 렌즈에 의하여 패턴 성형을 수행할 수 있을 정도의 극미세

한 형태를 지니는 프로브가 되도록 포커싱하는 역할을 한다. 그리고 전자에 예민하게 반응하는 레지스트로 도포된 실리콘 웨이퍼 등의 대상물을 임의의 위치로 이동할 수 있는 스테이지에 장착하여 전자들이 공기의 분자들과 충돌되어 분산되지 않도록 하기 위한 진공 챔버 내에 넣은 후, PC와 전기적인 회로에 의하여 시스템을 정밀 제어함으로써 가공을 수행한다.

미세한 선폭의 패턴과 임의의 자유 형상 등을 성형하기 위한 주사방식은 그림 5에 나타낸 바와 같으며, TV의 경우와 같이 전체의 면적에 대하여 아주 작은 점광으로 주사함으로써 패턴의 형상에 대응하도록 전자빔을 점멸하는 래스터 주사방식과 원형 및 직사각형의 점광으로 패턴형상의 노광 부위를 빈틈없이 덮어버리는 벡터 주사방식으로 크게 분류할 수 있다.

전자빔을 이용한 가공시스템은 그림 6에 나타낸 바와 같

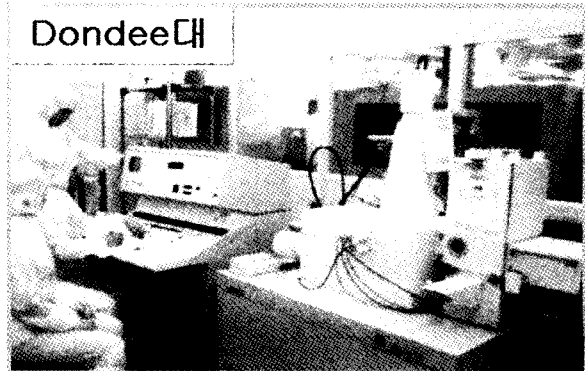
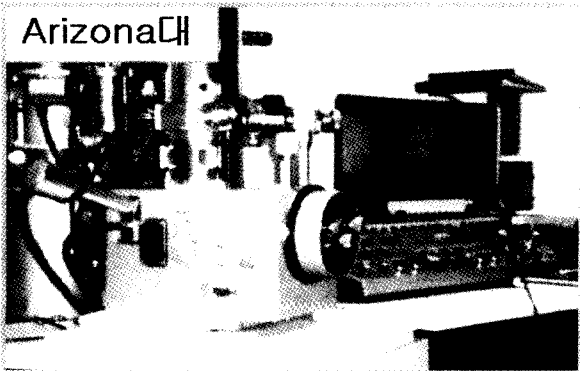
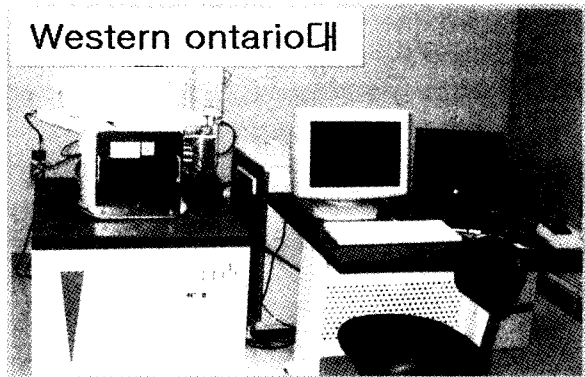
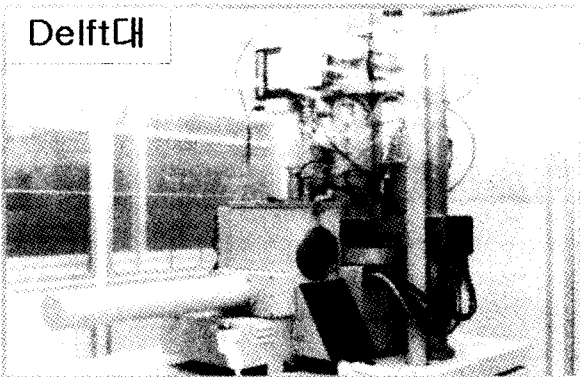


그림 8. SEM을 기존구조로 한 전자빔을 이용한 가공시스템의 예

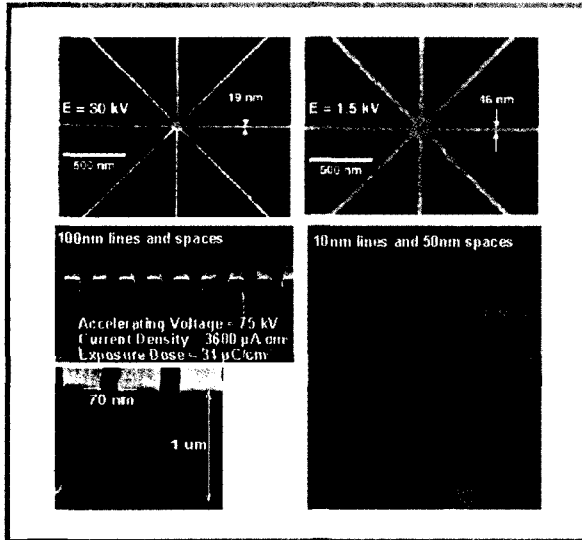


그림 9. 전자빔을 이용한 직접성형 가공 방식에 의한 초미세 형상 및 라인 패턴의 가공 예

이 주로 SEM 장비를 주로 생산하고 있는 일본의 히타치, 도시바, 제을, 캐논, 니콘, TEL, EBARA, DAINIPPON 등, 미국의 FIE, SCALPEL, LEICA, PHILIPS, REO, ELIONIX 등, 독일의 RAITH 등 기업들에서 개발하여 상품화하고 있다.

한편, 미국의 MIT 공대에서는 그림 7에 나타낸 바와 같이 70nm의 최소 선폭이 가능하고 8인치 웨이퍼 크기까지 대응할 수 있는 전자빔 가공 시스템을 구축하여 '93년부터 실험용 소자 기판의 직접 성형과 X-ray 노광용 마스크의 패턴 성형을 위한 연구 분야에 적용한 바 있다.

최근에 전세계적으로 전자빔을 이용한 가공기술의 개발에 관한 연구가 경쟁적으로 이뤄지고 있는 바, 대표적으로는 미국의 Cambridge대, Delft대, Berkeley대, Arizona대와 NASA, Oak Ridge 연구소, 캐나다의 Western ontario대, 호주의 CSIRO 연구소, 영국의 Dundee대, 독일의 후라운호퍼 연구소, 일본의 동경대, 와세다대 등을 예로 들 수 있으며, 그림 8에 나타낸 바와 같이 주로 상품화되고 있는 SEM을 기본 구조로 활용하고 초미세 선폭 생성용 S/W를 적용하는 형태의 전자빔을 이용한 가공시스템을 구축하여 초미세 형상의 패턴 성형 해상도를 향상시키는 한편, 선폭과 깊이의 비율을 높이기 위한 관련 연구들을 수행하고 있다.

그림 9에는 전자빔을 이용한 가공의 예를 나타내었으며, 가속전압이 높을수록 더욱 미세한 선폭을 지니는 형상을 가공할 수 있는 한편, 선폭과 대비한 깊이비가 약 7~8 이상이 되는 미세한 선폭의 형상도 가공이 가능하고 약 10nm의 초미세 선폭을 지니는 형상도 성형이 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

전자빔을 이용한 가공기술은 더욱 더 미세해지는 패턴 성형으로의 요구를 충족시킬 수 있는 획기적인 방안으로써 활용되어 궁극적으로는 모바일폰, 컴퓨터 등의 고성능화 기술에 적용된다. 디지털 비디오, 인터넷과 전자화 산업 분야 등을 필두로 하여 점차적으로 증가하는 데이터 처리량을 전송하고 저장하기 위한 요구는 한계가 없는 것같이 보이는 현실을 감안하면 극한적인 미세한 패턴의 성형 기술은 필수불가결하다고 할 수 있다.