

◆특집◆ 에너지빔 이용 정밀가공 기술

전자빔 응용 나노 가공기술

김재구*, 이재종*, 조성학*, 최두선*, 이응숙*

Nano-machining Technology Using Electron Beam

Jae Gu Kim*, Jae Jong Lee*, Sung Hak Cho*, Doo Sun Choi* and Eung Suk Lee*

Key Words : E-beam lithography (전자빔 리소그래피), Nano patterning (나노 패터닝), 3D nanomachining (3 차원 나노가공), Process parameter (공정 조건)

1. 서론

현대 산업 사회가 발전할수록 소비자가 요구하는 제품은 고기능화, 소형화 및 경량화를 지향하고 있다. 특히 반도체, 정보저장매체, 디스플레이, 바이오 칩 및 광학소자의 제작 등은 기능이나 크기에 맞춰 나노 형상(10^{-9} m)의 제작을 필요로 한다. 이러한 나노 크기의 형상을 제작하기 위해서는 다양한 방법¹이 적용되고 있지만 크게 분류하면 광 또는 전자빔 리소그래피를 통해 전체크기에서 조금씩 제거해 나가 원하는 형상을 제작하는 하향식 방법(Top-Down)과 원자 분자레벨에서 적절한 물리 화학적 방법을 통해 원하는 형태로 붙여나가는 상향식 방법(Bottom-Up)이 있다.

그 중에서 하향식 방법에는 다양한 도구가 물질을 제거하기 위해 사용되는데 각 도구의 제작 특징에 따라 형상 크기 또는 패턴 크기가 결정되며, 이를 위한 여러 가지 장비의 투자비용 대비 제작 가능크기에 대한 대략적 경향을 Fig. 1에 나타내었다. 고분해능을 갖는 가공 수단으로 전자빔 리소그래피 이외에 AFM(Atomic force microscopy) 및 STM (scanning tunneling microscope)의 probe tip을 이

용한 방법, 이온빔, EUV(Extreme Ultraviolet) 또는 X-ray를 이용한 방법 등이 이용될 수 있으나 정밀도 및 신뢰도 측면에서 전자빔 리소그래피 방법이 가장 확실한 방법이나 시간당 작업량 측면에서는 아직 해결해야 할 문제가 남아있다.

전자빔 가공기술은 1960년대 전후로 개발된 전자주사현미경을 기반으로 하며, 전자의 에너지를 이용하여 나노크기의 패턴을 제작하는 기술로 전자총에서 방출된 운동에너지를 가진 전자를 집속하고 정밀하게 편향시켜 스캔하는 방식으로 대상을 주로 레지스트를 가공(노광)한다. 이후의 공정은 일반 반도체 공정과 같이 레지스트를 현상하고 습식 또는 건식 방식에 의해 기판을 에칭하거나, 현상된 레지스트 자체를 마스터로 하여 복제하는 방법을 이용한다. 이 전자빔 가공방식은 나노크기의 집속 빔을 원하는 패턴에 따라 하나씩 조사하게 되므로 넓은 면적을 패터닝 하기에는 많은 시간이 소요되므로 공정시간에 덜 구애 받는 반도체 제조용 마스크제작, MEMS 소자 제작, 나노형상의 스탬프 제작 등에 많이 활용된다.

본 글에서는 전자빔 가공을 위해 필요한 전자빔 가공기의 대략적 소개와 가공에 영향을 주는 여러 가지 요소 및 국내외 가공 동향에 대해 소개하고자 한다.

* 한국기계연구원 나노기계연구본부
Tel. (042) 868-7141
E-mail : gugu99@kimm.re.kr

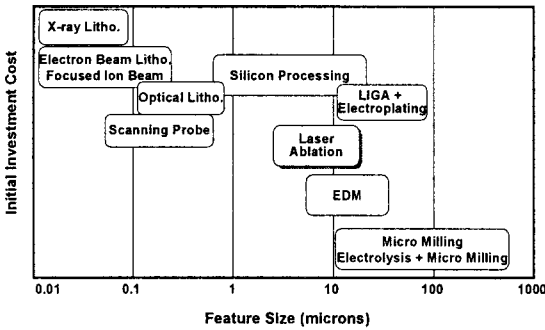


Fig. 1 Comparison between various machining tools in feature size and investment cost

2. 전자빔 리소그래피 장치

전자빔 리소그래피 장치는 Fig. 2 와 같이 크게 전자빔 방출부, 전자빔 제어부, 시편위치 제어부, 측정부로 나뉘며 전자가 움직이는 공간은 전자빔의 에너지 손실을 막기 위해 고진공 환경에서 설치된다. 이와 연계해서 각 부분의 제어, 패턴 생성과 전송 및 화상처리를 위한 소프트웨어로 구성된다.

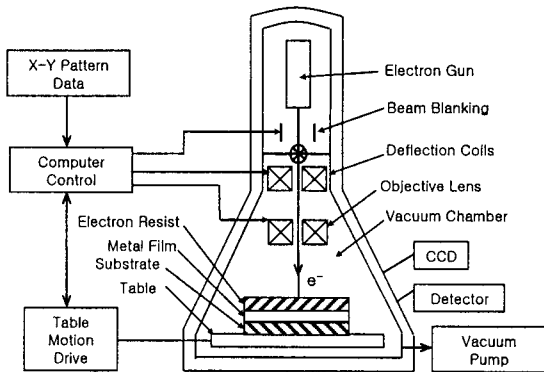


Fig. 2 Diagram showing the major components of a typical E-beam machining system

전자빔 리소그래피 장치는 리소그래피 방식에 따라 가우스 빔 (Gauss beam) 방식, 가변 빔 정형 방식과 투여 리소그래피 방식이 있다.² 가우스빔 방식은 주사전자현미경과 같이 전자총의 소스를 자계렌즈로 축소하여 시료면상에 미소 Spot 빔을 형성하는 것으로, 고휘도로 probe 전류를 크게 얻을

수 있는 전자원이 요구된다. 연구개발용 전자빔 리소그래피 장치에서는 서브 0.1 μm 영역의 패턴 리소그래피가 요구되는데 따라 전자원(electron source)도 LaB_6 등의 열전자 방출 방식보다 휘도가 높은 ZrO/W 든지 TiO/W 를 전자원으로 하는 열전계 방출 전자총, W 이나 TiC 를 이용한 전계 방출 전자총의 이용이 시도되고 있다.

가변빔 정형방식은 Fig. 3 과 같이 2 개의 단형 조리개 (Square Aperture)에 의해서 정형한 가변치수의 단형빔을 시료면상에 축소 투영하는 것이다. 제 1 단형 조리개상을 렌즈로 제 2 단형 조리개상에 결상하여 정형용 편향기로 결상 위치를 제어하는 것으로 단형 빔의 치수를 가변 시키는 방식이다. 이 방식은 최소 리소그래피 크기를 작게 하고 또한 빔 치수의 가변범위를 크게 함으로써 제 2 단형 조리개에서의 전류손실이 커져 전류이용 효율이 내려감으로써 throughput 을 저하시킨다. 또한 리소그래피 패턴이 미세화, 고전류밀도화는 Shot 수를 증대시키고 spot 빔 주사방식과 같이 고정밀도와 고속화의 양립이 곤란하다. 투여리소그래피 방식은 패턴의 미세화에 따르는 Shot 수의 증대에 의한 throughput 의 저하를 해결하는 방법으로서 제 2 단형 조리개부에 리소그래피 패턴블록에 대응하는 stencil mask 을 놓아 기본패턴을 블록마다 축소 리소그래피하는 기술개발이 진행되고 있다.

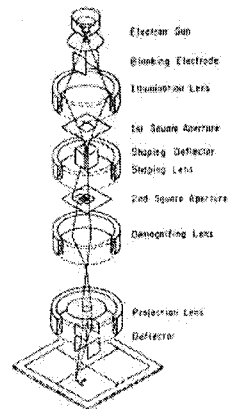


Fig. 3 Variable beam shaping type by two square apertures

이 외에도 수십 mm 크기의 전자 방출 및 제어부로 구성된 칼럼을 여러 개로 배열하여 단일 전자빔이 아닌 다중 전자빔을 이용하여 생산성을 높이는 연구도 시도되고 있다.

3. 전자빔 가공 공정 및 파라미터

3.1 전자빔 가공 공정

전자빔에 의한 가공 공정은 Fig. 4 에 나타난 바와 같이 사용하는 레지스트에 따라 약간 다르다. 전자빔에 노출된 레지스트의 구성 성분인 폴리머 체인이 절단(scission)이 되는지 또는 서로 교차연결(cross linking)이 되는지에 따라 양각 또는 음각으로 구분되고, 상대적으로 분절된 짧은 사슬을 가진 부분이 일반적인 유기용매에 대해 용해도가 커지므로 이러한 용해도의 차이로 인해 패턴이 형성된다. 이를 마스크로 하여 화학적 용액에 의한 습식 또는 플라즈마, 이온 등에 의한 건식 에칭 공정을 통해 기판에 나노 형상을 제작하기도 하며, 에칭 공정 없이 레지스트에 형성된 나노 형상을 그대로 다른 PDMS 와 같은 고유동성 고분자로 전사하거나 전기도금방법으로 전사해서 스탬프 만들고 이를 이용한 나노 임프린팅, 나노 성형 등의 공정으로 흘러간다.

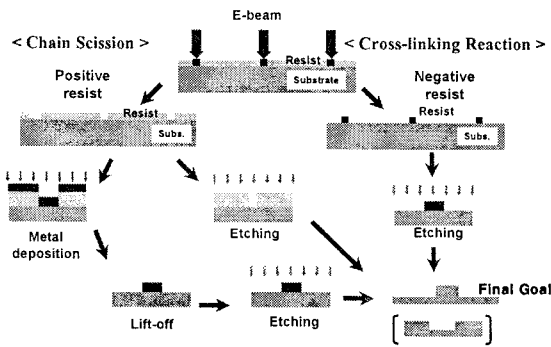


Fig. 4 Schematic process for the device fabrication using E-beam machining and post-processing

3.2 전자빔 가공의 주요 파라미터

전자빔에 의한 가공은 집속된 전자빔의 에너지에 의해 대상물의 물질변화를 야기하는 것이므로 전압, 전류, 노출시간, 개구(Aperture) 크기, 작업공간길이 등이 집속 크기 및 재료와의 상호작용을 일으키는 데 있어 주요 변수가 된다. 이를 좀 더 자세하게 고찰해 보면 먼저 전압의 경우 필라멘트에서 튀어나온 전자는 애노드에 의해 강하게 이끌리며 가속되는데 가속된 전자는 운동에너지를 갖고 있다. 드브로이의 물질파의 개념은 운동하는 입자

는 파동의 성질을 동시에 가지며 입자로서의 운동량과 파동으로서의 파장은 서로 반비례하고 이를 연결해주는 h (프랑크 상수)로 표현할 수 있다. 이를 이용하면 전자빔의 파장은 다음과 같이 간단한 수식으로 표현할 수 있고 이는 고전압일수록 파장이 짧다는 것을 의미하며 해상도를 높일 수 있다. 다만 고전압일수록 재료에 전하의 축전이 커질 수 있는 단점이 있다.

$$\lambda = 1.23 / V_a^{1/2} \quad (1)$$

여기서 λ 는 파장 (nm), V_a 는 가속 전압 (V) 을 의미한다.

다음은 전류의 영향으로 전압이 높을수록 전류의 양은 커지며 많은 전류의 양이 시편의 표면에 입사하게 되면 산란이 커지고 손상을 줄 수 있어 가능하면 줄이는 것이 좋은 해상도를 얻는 것에 유리하다. 하지만 너무 줄이면 노출시간을 크게 한다 하더라도 대상물의 임계 감도에 도달하기 어려우므로 주의할 필요가 있다.

집속크기에 영향을 주는 개구 크기의 관련성은 전자기 렌즈의 렌즈의 수차에 기인한다. 수차는 개구 크기에 의한 구면수차(Spherical Aberration), 전자빔 에너지 분포에 의한 색수차(Chromatic aberration)가 있다. 개구 크기를 줄이면 전자기 렌즈에서 많이 휘어지는 가장자리의 전자빔을 막아 그만큼 해상도를 높일 수 있다. 하지만 너무 작게 하면 전류량이 작아지므로 전류 특성과 마찬가지로 임계 감도에 이르지 못하는 점과 다음에 설명하는 회절한계에 의한 영향을 줄 수 있다.

회절 한계빔(diffraction-limited beam, d_d)은 Fig. 5 와 같이 개구부 크기(D)와 작업공간길이(f)에 의해 결정되며 다음 식으로 표현된다.

$$d_d = 0.6 \frac{\lambda}{\alpha} \quad (2)$$

여기서 λ 는 식(1)에서 유추 할 수 있고, α 는 시편에 입사하는 수렴각으로 개구부 크기와 작업공간 길이와의 관계식 $D/2f$ 로 표현된다. 위 식을 보면 가속전압이 클수록, 작업공간 길이가 작을수록 분해능 측면에서 유리함을 알 수 있다. 또한, 개구 크기가 커야 회절 한계빔 관점에서는 유리하나 구면수차의 영향이 있으므로 작게 설정하는 것이 바람직하다.

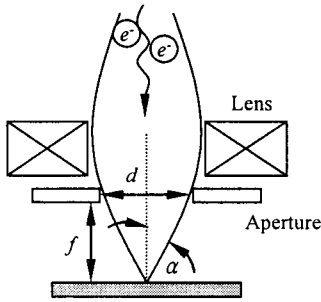


Fig. 5 Schematic geometry representing the diffraction-limited beam

한편, 해상도에 미치는 영향으로 전자빔이 레지스트로 입사되었을 때 나타나는 전·후방 산란도 고려해야 할 대상이다. 산란은 가속된 전자빔이 재료에 입사하게 되면 전자빔 입자와 핵과의 쿨롱힘에 의해 산란을 일으켜 경로 변경을 갖는 탄성산란과 재료에 에너지를 전달하고 손실되어 전자빔 입자가 정지하는 비탄성 산란으로 크게 나눌 수 있다. 이 효과는 물질의 화학적 구성과 가속전압에 의해 크게 좌우되며 일반적으로 가속전자의 에너지가 클수록 또 원자 분자량이 적을수록 깊이 침투하여 산란효과 및 산란부피가 적으나 그렇지 않은 경우 산란이 커져 실제 원하는 패턴크기와 다른 선폴을 갖는 근접효과(Proximity effect)를 가져오게 되어 해상도에 큰 영향을 주게 된다. 이러한 재료와의 반응은 비탄성 산란에 의한 단위 길이당 에너지 감소를 기술한 Bethe Range 에 의해 정성적으로 알 수 있으나, 탄성 및 비탄성 산란에 의한 전자의 궤적 변화와 에너지 천이의 수학적 모델을 수립하고 확률함수와 난수 등을 이용해 전자 궤적을 계산하는 몬테카를로 전산모사방법을 이용하는 해석적 접근방법이 널리 이용되고 있다.

실제 전자빔이 레지스트에 입사되어 반응을 일으킬 때는 위의 파라미터에 의해 생성되는 전류를 어느 정도 크기에 어느 정도 시간 동안 레지스트에 조사하느냐 따라 결정되며 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$D = \frac{I_p t_d}{SSZ} \quad (3)$$

여기서 D 는 도즈량(C/cm²), I_p 는 레지스트에 입

사되는 전류(A), T_d는 노광 위치에서의 노출시간(s), 그리고 SSZ 는 픽셀간 step 크기(mm)이다.

또한 대상재료인 레지스트의 종류에 따라 다르지만 성능은 빠른 감도, 높은 해상도 및 높은 내에칭성에 의해 결정된다.³ 높은 감도를 가진 레지스트는 상대적으로 낮은 해상력을 갖기 때문에 제작하고자 하는 형상 및 응용에 맞는 레지스트를 선정하여야 하며 경우에 따라서는 각기 다른 분자량이나 성능을 가진 레지스트를 복층으로 코팅하여 패터닝하기도 한다. 이런 경우 감도 및 산란의 효과가 서로 달라 다른 패턴 치수를 갖게 되어 lift-off 공정이나 3 차원 형상 제작에 응용된다.

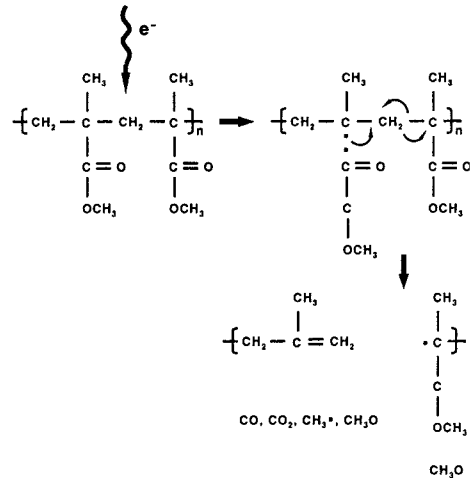


Fig. 6 Structure change by the E-beam radiation-induced polymer chain scission and by-products

일반적으로 많이 사용되는 PMMA 의 경우의 주사술 절단 기작을 Fig. 6 에 나타내었으며, 여러 가지 종류의 레지스트와 이에 상응하는 적정 도즈량 및 가능한 최소 선폴을 Table 1 에 나타내었다. 이 밖에도 기존의 일반적인 레지스트의 사용은 레지스트 분자량에 의해 어느 정도 분해능이 결정되기 때문에 수 나노미터 정도의 두께를 갖는 초박막인 SAM(Self-assembled monolayer)를 이용하여 선폴을 줄이려는 시도도 있다.^{4,5}

위의 주요 파라미터 이외에도 레지스트 도포 두께, 현상액 종류, 농도 및 현상시간, 스캐닝 방법(벡터 또는 라스터 방식), 구역간 위치오차(Stitching error) 최소화 등도 나노 형상을 결정짓는 요인이 된다.

Table 1 Properties of E-beam resist

	Resolution (nm)	Sensitivity ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	Developer
PMMA	10	100.0	MIBK:IPA
EBR-9	200	10.0	MIBK:IPA
PBS	250	1.0	MIAC:2-pentanone 3:1
ZEP	10	30.0	xylene:p-dioxane
AZ5206	250	6.0	KLK PPD 401
COP	1000	0.3	MEK:ethanol 7:3
SAL-606	100	8.4	MF312:water

4. 전자빔 가공 응용 예

전자빔을 이용해서 제작된 몇 가지 나노 형상 제작 예를 소개하면 먼저 기계연구원에서 제작된 가스를 검출 할 수 있는 나노센서 예이다.

Fig. 7 은 제작된 센서로 가장자리 부분에 측정 평가를 위한 Probe pin 이 접촉될 수 있도록 전극 Pad 를 설치하였고, 센서부는 반응 가스와의 반응 면적을 넓히고 제작의 용이성을 고려해 약 100 nm 의 간극을 가질 수 있도록 제작된 것을 보여주고 있다. 상대적으로 큰 면적에 대해서 광학적 리소그래피 방식으로 전체 패터닝을 하였고, 전자빔 리소그래피 방법으로 나노급 형상의 센서부를 제작하였다.⁶

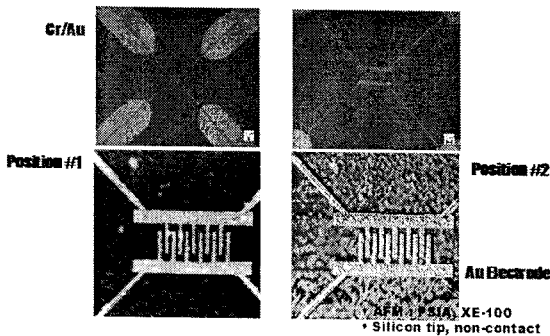
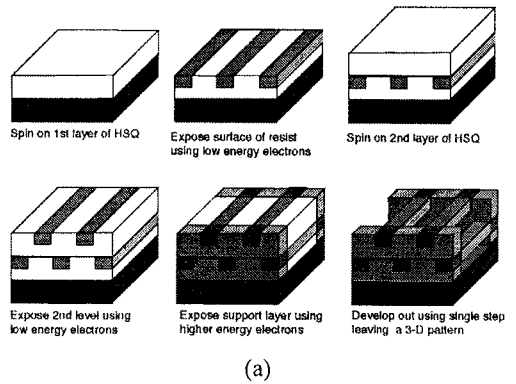


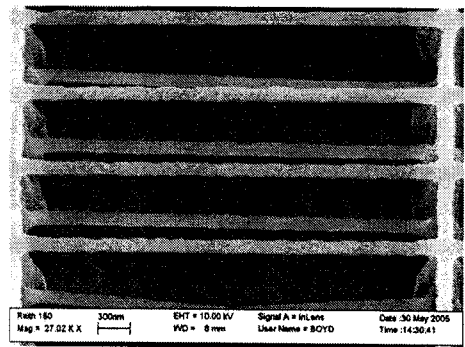
Fig. 7 FE-SEM and AFM images of the fabricated functional nano sensor

3 차원 형상 가공에 대한 예로 Fig. 8 은 다우

코닝사에서 상품화 된 HSQ 란 고분자 물질을 이용해서 제작된 형상이다. HSQ 가 열 또는 전자빔 노광에 의해 서로 연결된 구조를 갖는 특성을 이용하고, 각 층에 대해 낮은 가속 전압을 사용하여 깊이를 조절함을 반복적으로 수행한다. 마지막으로 지지대 부분은 높은 가속 전압을 이용하여 각 층 모두가 반응을 일으키도록 하고 현상하게 되면 지지대에 연결된 필라멘트가 Fig. (b)와 같이 형성된다. 여기서는 이미 노광된 층 위에 또 한번 레지스트를 도포할 때 나타나는 두께의 불균일이 중요한 인자 중 하나가 되며, 이는 도포시 고속 회전하면서 레지스트를 투여하거나 또는 동시에 공기 등으로 압력을 주어 솔벤트가 아래층 레지스트에 접촉하는 시간을 최소화 함으로 영향을 줄일 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 8 Illustration of process flow of the multiple layer, multiple exposure technique (a) and SEM Micrograph of a two layer grating structure fabricated using multiple low energy exposures (b)⁷

Fig. 9 는 낮은 가속전압 영역에서 같은 도즈량을 주고 가속전압을 조절하여 깊이를 조절해서 만들어진 나노급 3 차원 형상이다. 일반적으로 이와 같은 형상을 만들 때 일정한 전압으로 노광과 현상을 반복하여 제작하였는데 이럴 경우 해상도가 떨어지고 공정비용이 높다는 단점이 있는데, 단순히 전압을 조절하는 것으로 같은 형상을 제작할 수 있어 기존의 문제점들을 해결할 수 있다. 여기에서는 적절한 레지스트(여에서는 SOG:spin-on-glass 사용) 및 현상 조건이 중요한 변수가 된다.

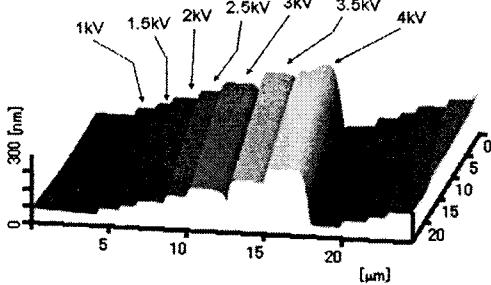


Fig. 9 AFM images of 3D mold, EBL using 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, and 4 kV accelerating voltage at 250 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ EB dose⁸

5. 국내의 동향

나노기술에 대한 선진국의 연구는 나노기술의 발전을 국가의 최우선 정책목표로 하고 있는 미국을 중심으로 이루어지고 있으며, 일본, 독일을 비롯한 EU 도 그 뒤를 따르고 있다. 전자빔 응용 나노스케일의 패턴링에 관한 연구는 나노기술 개발 프로그램 내에서 수행되고 있으며 국내에서는 2007 년 15 대 전략기술의 하나로 나노기반 전략기술이 선정되어 활발히 연구될 예정이다.⁹

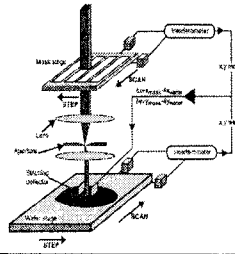
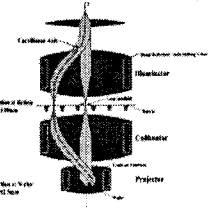
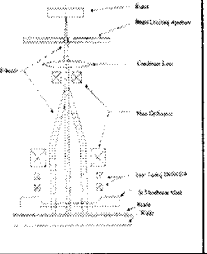
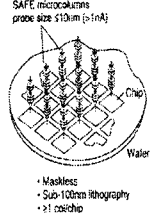
전자빔 장치 측면에서 연구개발 동향을 보면 현재의 E-beam lithography, probe lithography 등과 같은 serial-process 가 가진 낮은 생산성을 극복하고자 parallel process 방식이 개발되고 있으며, 초소형 컬럼을 사용한 다중빔(multi-beam)을 이용하여 생산성을 향상시키고자 하는 방법^{10,11} 등이 제시되고 있다. 특히, parallel-process 에 의한 electron beam lithography 기술은 소위 projection e-beam lithography 기술로 통칭하여 부르는 기술로서, 산업화가 가능한 생산성의 확보를 전제로 하여 전자빔을 이용한

여 이미지를 축소 투영하는 방식인 프로젝션 형태의 리소그래피 기술의 개발을 말한다. 미국의 Applied Materials, 네덜란드의 ASML 이 주축이 되어 eLITH 협의체를 구성하고 Lucent, Motorola, Samsung 등이 SCALPEL(Scattering with Angular Limitation Projection Electron-beam Lithography) 개발에 참여했으나 개발에 어려움을 겪고 있다. 또, 미국의 IBM 을 중심으로 일본의 Nikon 사와 공동으로 개발하는 PREVAIL(Projection Reduction Exposure with Variable Axis Immersion Lenses), 네덜란드 Mapper Lithography 사의 마스크리스 형식의 10,000 개 이상의 전자빔을 이용하는 방식,¹² 그리고 프로젝션 형태가 아닌 등배 전사를 이용하는 일본의 LEEPL 사를 중심으로 LEEPL (Low-Energy Electron-beam Proximity Lithography)라는 명칭으로 활발히 연구되고 있으며, 미세화나 전자다바이스의 연구개발용에서는 Throughput 보다는 리소그래피 분해능이 높고 자유도가 높은 장치 요구되고 있다.¹³

나노급 미세형상 가공기술과 관련하여서는 국외의 경우 독일의 Friedrich Schiller Univ. (Jena), 프랑스의 CNRS, 일본의 Jeol 사, 미국의 AT & T Bell 연구소에서 전자빔을 이용한 미세구조물 직접형성 기술을 개발하고 있으며, 특히 독일의 Friedrich Schiller Univ.에서는 연속적인 입체형상생성기술 분야에서 독자적인 연구결과를 발표하고 있다. 전자빔을 이용한 연속적 입체형상가공과 관련된 연구는 일본의 Osaka Univ., OMRON 사, 스웨덴의 Chalmers Univ. of Technology, 미국의 UC California, 스위스의 CSEM 등에서 연구하고 있다. 이외에, 스위스의 EPFL(Ecole Polytechnique Federal de Lausanne), 미국의 Univ. of Connecticut 에서는 전자빔 리소그래피 기술을 이용하여 양자선 응용 나노부품 적용기술을 연구하고 있다.

국내의 경우 한국기계연구원 및 한국표준과학연구원 등에서 전자빔 장치를 개발하고 있으며, 한국과학기술연구원 등에서 반도체공정을 이용하여 단순한 구조의 입체형상을 제작한 연구가 진행되고 있다. 국내에서는 종래 MEMS 를 기반으로 하는 연구에 집중했으며, 3 차원 입체형상의 나노급 미세형상가공기술 분야에서는 많은 연구가 진행되지 못한 실정이며, 또한, 나노급 미세형상 측정기술은 주로 SPM 및 AFM 을 이용한 측정기술을 개발하고 있다.

Table 2 Comparison of different methods in E-beam lithography^{1, 13}

	E-beam Projection Lithography			Multi Column
	SCALPEL (eLith: Applied Material, ASML, etc.)	PREVAIL (IBM, Nikon)	LEEPL (LEEPL)	
System Concept				
Magnification	4:1	4:1	1:1	Direct
Throughput	25 ea. (12"/hr)	> 20 ea. (12"/hr)	40 ea. (12"/hr)	
Resolution	35 nm	< 100 nm	50 ~ 100 nm	< 100 nm

6. 결론

참고문헌

전자빔을 이용한 가공기술은 나노급의 형상을 가공할 수 있는 여러 가지 방법 중의 하나이다. 전자빔 가공 장비의 경우 고 분해능을 갖지만 상대적으로 생산성이 낮은 단점이 있어 마스크의 사용, 소형 멀티 칼럼을 사용하는 등 이를 극복하려는 시도가 활발하다. 가공응용에서는 센서, 광학소자 등 다양한 응용을 위해 나노급의 3 차원 형상 가공에 대한 연구가 활발하며 극소형 디바이스 제작에 폭넓게 활용될 것으로 전망된다.

이를 위해서는 좀 더 구체적인 가공공정기술 즉, 전자빔과 재료와의 상호 반응 메커니즘, 전자빔 거동 제어, 전자빔용 레지스트 개발, 초 박막화의 활용, 전·후처리 공정 등 새로운 가공공정에 대한 연구가 필요하며 새로운 개념의 전자빔 가공기 개발과 더불어 가공공정 기술 개발에 대한 연구가 지속적으로 진행될 수 있도록 관련 산업분야 연구자의 노력과 국가차원의 관심 및 지원이 필요하다.

후 기

본 연구는 산업자원부 차세대신기술개발사업 "고효율 에너지빔 응용 초미세 부품 제조용 In-line 시스템 개발"의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

1. Madou, M. J., "Fundamentals of microfabrication," 2nd Ed., CRC press, pp. 53-57, 2001.
2. 이재중, 장원석, "나노스케일 3D 형상 패터닝 기술," 물리학과 첨단기술, 제 13 권 10 호, pp.14-19, 2004.
3. Kim, S. T., Yang D. S., Park, H. W. and Kim, T. H., "Technology of semiconductor industry and development of photoresist," Polymer Science and Technology, Vol. 16, No. 1, 2005.
4. Weimann, T., Geyer, W., Hinze, P., Stadler, V., Eck, W. and Götzhöuser, A., "Nanoscale patterning of self-assembled monolayers by e-beam lithography," Microelectronic Engineering, Vol. 57-58, pp. 903-907, 2001.
5. Wang, X., Hu, W., Ramasubramaniam, R., Bernstein, G. H., Snider, G. and Lieberman, M., "Formation, Characterization, and Sub-50-nm Patterning of Organosilane Monolayers with Embedded Disulfide Bonds: An Engineered Self-Assembled Monolayer Resist for Electron-Beam Lithography," Langmuir, Vol. 19, pp. 9748-9758, 2003.
6. Lee, J. J., "Development of key technologies for nanoscale shape fabrication-Research report," KOCl, 2006.
7. Boyd, E. J. and Blaikie, R. J., "Three dimensional

- HSQ structures formed using multiple low energy electron beam lithography,” *Microelectronic Engineering*, Vol. 83, pp. 767-770, 2006.
8. Ishii, Y. and Taniguchi, J., “Fabrication of three-dimensional nanoimprint mold using inorganic resist in low accelerating voltage electron beam lithography,” *Microelectronic engineering*, Vol. 84, pp. 912-915, 2007.
 9. KISTI, “Nanotechnology policy brief,” KISTI, No. 4, pp. 1-36, 2007.
 10. Kim, H. S., Kim, Y. C., Kim, D. W., Ahn, S. J., Jang, Y., Kim, H. W., Seong, D. J., Park, K. W., Park, S. S. And Kim, B. J., “Low energy electron beam microcolumn lithography,” *Microelectronic Engineering*, Vol. 83, pp. 962-967, 2006.
 11. Spallas, J. P., Silver, C. S., Muray, L. P., Wells, T. and El-Gomati, M., “A manufacturable miniature electron beam column,” *Microelectronic Engineering*, Vol. 83, pp. 984-989, 2006.
 12. <http://www.mapperlithography.com/>
 13. 김기범, 이호신, “전자빔을 이용한 나노 패터닝 기술,” *기술동향분석 보고서*, KISTI, 2003.