

1. 리소그래피 기술 분류

리소그래피기술은 반도체 생산뿐만 아니라 나노기술 연구에서 설계된 미세회로나 패턴을 실리콘 또는 원하는 소재 표면에 옮겨 그리는 핵심적인 공정기술이다. 특히 나노기술을 대표하는 반도체산업의 발전은 리소그래피 기술의 발전과 함께하고 있다. 리소그래피기술은 표 1과 같이 직접그리기 방식과 간접그리기 방식으로 구분할 수 있다.

직접그리기 방식은 집속된 광원이 소재 표면에 설계된 미세패턴을 직접 그리는 방식으로 전자빔 리소그래피가 있다. 간접그리기 방식은 광원과 소재 표면사이에 설계된 패턴이 그려져 있는 마스크(mask)가 있는 방식이다. 따라서 노광장비 및 나노임프린트 등과 같은 간접그리기

표 1. 리소그래피기술 방식 및 특징

방식	특징	장비기술
직접그리기 방식	집속된 광원이 소재 표면에 설계된 미세패턴을 직접 그리는 방식	전자빔 리소그래피, 이온빔 리소그래피, 레이저빔 리소그래피
간접그리기 방식	광원이 설계된 패턴 그려져 있는 마스크(mask)에 빛을 비춰 소재 표면에 패턴을 옮기는 방식	노광장비 나노임프린트
	설계된 패턴이 있는 모판으로 소재표면에 패턴을 물리적으로 옮기는 방식	

특집 ■ 리소그래피

Electron Beam Lithography

김호섭*

방식의 리소그래피는 직접그리기 방식의 리소그래피 기술로 만들어진 마스크를 사용해야만 된다.

전자빔 리소그래피는 전자빔으로 웨이퍼 표면에 미세한 회로 패턴을 직접 그리는 방식을 대표하는 기술로서 sub 10 nm 크기의 선폭을 정교하게 그릴 수 있는 장비이다 [1]. 전자빔 리소그래피는 집속된 전자빔을 스캔하여 패턴을 그리기 때문에 생산속도가 낮은 단점을 가지고 있어 반도체 산업의 소자생산에 직접 사용되지 못하고 있으나 그림 1과 같이 새로운 미세 패턴 구조의 소자 및 기초 연구의 핵심장비로 활용되고 [2] 있을 뿐만 아니

라 노광장비의 포토마스크를 제작하는 필수 장비로 사용되고 있다 [3]. 미국 및 유럽 등에서는 sub 10 nm 반도체 소자 생산을 위한 차세대 리소그래피 기술로서 전자빔 리소그래피에 대한 연구를 계속하고 있다.

2. 전자빔 리소그래피 구조 및 작동

전자빔을 이용한 리소그래피 연구는 1960년대 초부터 영국 캠브리지대학에서 주사 전자현미경 (Scanning

* 선문대학교 나노과학과/정보디스플레이학과

Electron Beam Lithography

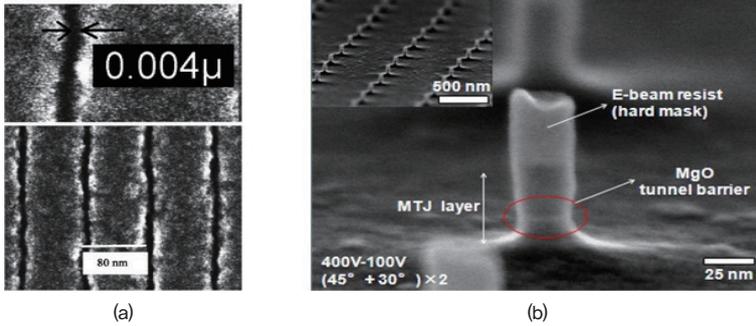


그림 1. 30 keV의 빔에너지와 sub-pA 전자빔으로 PMMAdp 그려진 4 nm 패턴 [1], (b) 80 kV 전자빔 리소그래피로 sub-30 nm 크기의 패턴에 제작된 magnetic tunnel junction (MTJ) 소자 [2].

Electron Microscope: SEM)을 기반으로 patterning의 가능성에 대한 연구로 시작되었다. 전자빔 리소그래피가 생산현장에서 쓰이게 된 것은 1970년대 후반에 미국 벨 연구소에서 개발되어 ETEC 장비회사 (현재는 Applied materials 사에 흡수되었음)에서 상용화를 시작하고 부터였다. 당시에는 저 해상력과 낮은 생산성에도 불구하고 다품종 소량 생산품에 전자빔 리소그래피를 사용한 것이다.

전자빔 리소그래피장비의 기본 구조는 주사전자현미경의 구조를 기반으로 하고 있다. SEM은 시료 표면의 나노미터급 정보를 얻을 수 있는 장비이며, 전자빔 리소그래피는 시료 표면에 나노미터급 패턴을 직접 그리는 장비이다. 그림 2는 전자빔 리소그래피 장비의 기본 구조를 보여주고 있다 [4]. 전자빔 리소그래피 장비는 전자빔을 방출하는 전자방출원 장치(electron gun), 전자

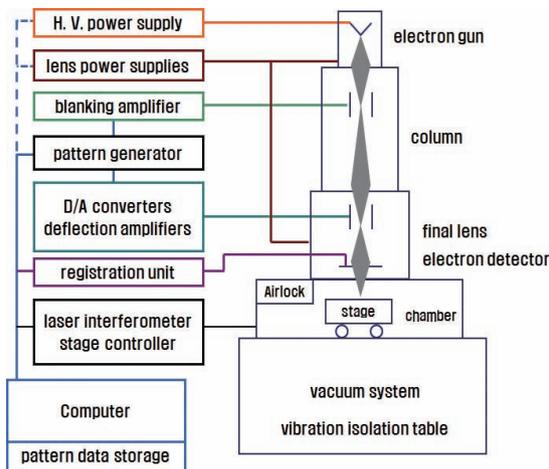


그림 2. 전자빔 리소그래피장비의 기본 구성도

렌즈 장치, 전자빔을 스캔하는 디플렉터장치(deflectors), 검출부 장치(detectors) 미세한 패턴을 resist 위에 정교하게 그리기 위하여 전자빔 제어를 위한 beam blanking, pattern generator, 정확한 위치제어를 위한 스테이지 등으로 이루어져 있다.

전자빔 리소그래피의 구동방법을 요약하면 다음과 같다. CAD에 의하여 설계된 미세 pattern data는

시스템에서 고유 format으로 변환시켜 pattern generator를 통하여 전자빔을 on/off 하는 beam blanking, 전자빔을 편향하는 deflector, 정밀하게 스테이지 위치를 제어하는 laser interferometer 등에 정보를 제공하여 시료 표면에 설계된 패턴을 전자빔으로 그리게 된다.

일반적으로 시료에 집속된 전자빔은 프로브 빔으로 통칭되고 있으며, 프로브 빔의 직경은 10 nm 이하가 가능하여 sub 10 nm 패턴이 가능한 것이다. 원형의 프로브 빔은 가우시안 분포를 가지고 있어서 가우시안 빔으로 불리고 있다. 가우시안 빔으로 패턴을 그리는 방법으로는 raster scan 방식과 vector scan 방식이 있다 (그림 3). raster scan 방식은 디플렉터가 시료표면 위를 연속적으로 스캔하게 하면서 패턴이 없는 부분은 beam blanker로 전자빔이 시료에 도달하지 않게 하고 (beam off) 패턴이 있는 부분에서는 전자빔이 시료에 도달 (beam on)하게 하는 방식이다. vector scan 방식은 패턴 모양에 따라 전자빔이 이동하게 디플렉터를 구동하는 방식으로 패턴 설계가 적은 경우 빠르게 패턴을 그릴 수 있는 장점을 가지고 있다.

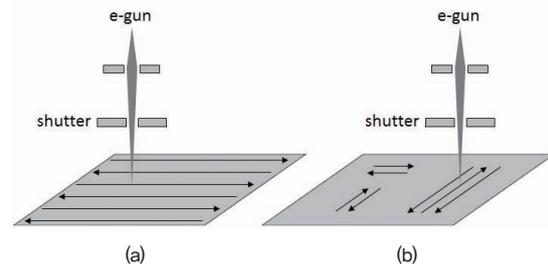
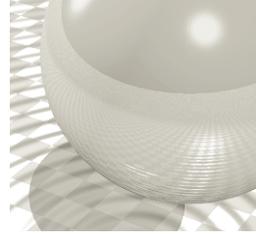


그림 3. (a) raster scan, (b) vector scan



3. 전자광학 (Electron Optics)과 주요 부품

전자광학은 전자방출원에서 방출된 전자를 전기장 렌즈 또는 자기장 렌즈로 전자를 집속·제어 하는 것으로 전자현미경, 전자빔 리소그래피, CRT 등의 핵심기술로 사용되고 있다. 전자의 파장은 $\lambda = 1.23/\sqrt{E}$ [nm], E(eV)는 전자에 인가된 에너지로서 표현되고 있다. 따라서 전자빔 장비의 광학적 분해능 (resolution : $0.61 \frac{\lambda}{N.A.}$)은 광학적 수차를 고려하지 않는 경우에서 저에너지 전자빔으로도 높은 분해능을 얻을 수 있다. 예를 들어, 100 eV의 전자빔 파장은 $\lambda = 0.123$ nm 로서 N.A. (numerical aperture)를 1.2 로 가정하면, 광학적 분해능은 0.25 nm 이다. 따라서 전자빔은 장 파장의 photon이 가지고 있는 분해능의 한계를 극복한 광원으로 사용되고 있는 것이다.

일반적으로 전자방출원, 전자렌즈와 광학계 부품들에 의하여 광학수차가 발생하게 되며 이러한 광학수차를 고려하여 그림 4와 같이 시료에 도달하는 프로브 빔의 크기가 결정되게 된다.

전자빔 리소그래피 장비의 광학계 핵심부품에 대하여 요약하면 다음과 같다.

가. Electron sources

전자빔방출원은 표 2와 같이 열전자방출원(Thermal emission), 전계전자방출원 (Cold field emission), 열전계전자방출원 (Thermal field emission) 등으로 분류하고 있다.

열전자방출원은 텅스텐 필라멘트를 높은 온도로 가열하여 발생하는 전자를 이용하는 방식으로 초기 전자현미경과 전자빔 리소그래피에서 사용되었으나, 낮은 brightness와 높은 energy spread에 의한 색수차의 증

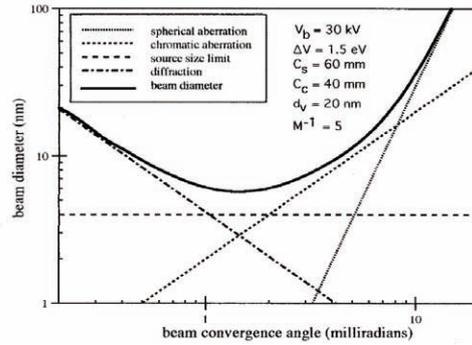


그림 4. 광학수차, 소스크기, diffraction 등을 고려한 전자빔 수렴각(beam convergence angle)에 따른 빔의 크기 [4]

가 등으로 고분해능의 한계를 가지고 있다. 상온 (300 K)에서 사용하는 전계전자방출원은 높은 brightness 효율과 낮은 에너지 분포를 가지고 있어서 고분해능을 가능한 장점이 있으나 전자방출을 위하여 높은 전계 (electric field)가 필요하고 안정적인 전자방출을 위하여 초고진공에서 사용되어야 하는 단점이 있다. 이러한 문제점을 보완하여 개발된 방출원이 열전계전자방출원이다. 열전계전자방출원은 열전자방출원보다 낮은 온도에서 작동이 가능하고 전자방출을 위하여 전계전자방출원보다 일함수가 낮아져 낮은 전계에서 구동되고 높은 진공도에서 안정적으로 작동되며 높은 효율을 가지고 있어서 최근의 전자빔 리소그래피에서 많이 사용되고 있다. 그림 5는 LaB₆와 thermal field emitter 구조 및 팁 끝으로부터 방출된 전자 궤적을 보여주고 있다. LaB₆에서 방출된 열전자는 wehnelt 과 anode사이에서 교차점 (crossover)이 발생되며 이 지점의 전자빔 지름 (약 10 μm)을 전자빔원 (real source)으로 설정하여 전자광학계를 설계한다. 반면에 thermal field emitter경우는 전자는 예리한 팁 끝의 높은 전계에서 터널링효과에 의하여 방출된다. 이러한 전계방출형은 전자가 방출되는 지점에서 팁의 내부로 따라가서 가상의 전자빔원 (virtual

표 2. 전자방출원의 종류 및 특징

Source type		Temp. (K)	Brightness (A/cm ² /rad)	Source size	Energy spread (eV)	Vacuum (Torr)
Thermal emission	W-filament	2700	10 ⁵	25 μm	2 ~ 3	10 ⁻⁶
	LaB ₆	1600	10 ⁶	10 μm	2 ~ 3	10 ⁻⁶
Thermal field emission		1800	10 ⁹	< 20 nm	0.9	10 ⁻⁹
Cold field emission		300	10 ⁸	< 5 nm	0.24	10 ⁻¹⁰

Electron Beam Lithography

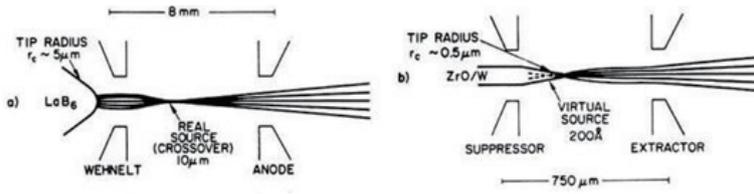


그림 5. LaB₆와 thermal field emitter 구조 및 방출된 전자의 궤적

source)이 정해지기 때문에 전자빔원 크기는 5 nm 이하의 매우 작으면서 터널링 효과로 방출되는 전자에너지의 분포 (energy spread)가 1 eV 이하로 작은 값을 가지고 있어서 고배율의 전자광학계가 가능하다.

나. Electron lenses

전자렌즈는 자기장렌즈와 전기장렌즈로 구분되며, 전자빔은 전자렌즈에서 발생하는 전기장 또는 자기장에 의하여 집속된다. 전자렌즈는 광학렌즈와 동일한 성질을 가지고 있지만, 전자렌즈는 발산하는 성질은 없고 집속하는 성질을 가지고 있다. 그림 6은 자기장렌즈와 전기장 렌즈의 구조를 보여주고 있다. 전자렌즈의 구조설계 및 제작 정밀도 정도는 구면수차에 많은 영향을 주고 있다 [5].

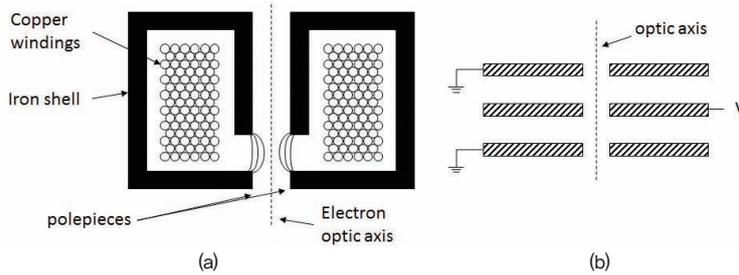


그림 6. (a) 자기장렌즈와 (b) 전기장렌즈 구조

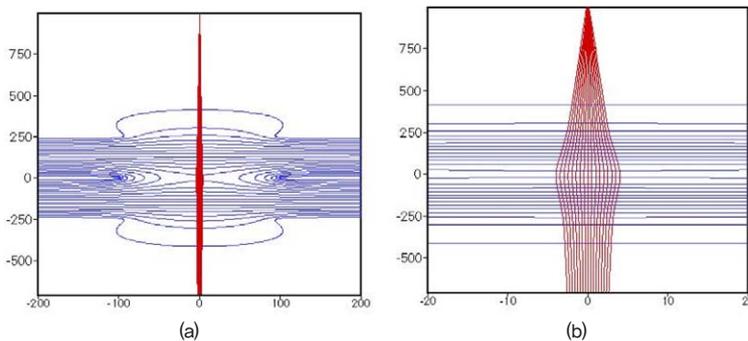


그림 7. 전기장렌즈의 (a) 전계분포와 (b) 렌즈 중앙에서 전자빔의 궤적 [6]

일반적으로 전자장렌즈 구조가 자기장렌즈구조보다 광학수차를 가지고 있어 기존의 전자빔 장비에서 자기장렌즈를 많이 사용하고 있다. 그러나 정교한 가공과 공정으로 제작된 전기장렌즈의 광학수차를 최소화 할 수 있어 최근에는 활용이 많

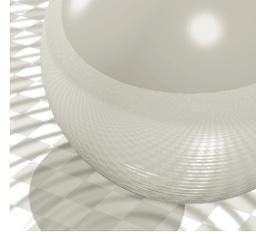
이 되고 있다 [그림 7].

다. Electron beam deflection

디플렉터는 전자빔이 시료의 표면에서 상하좌우로 스캔하는 기능을 가지고 있다. 디플렉터는 전자렌즈처럼 자기장방식과 전기장방식으로 구분되고 있다. 그림 8은 자기장방식과 전기장방식을 보여주고 있다. 자기장방식의 디플렉터는 코일에 흐르는 전류의 변화에 따라 발생하는 자기장의 변화로 전자빔을 스캔한다. 전기장방식은 전극판의 양단에 연속적으로 전압을 증가시키고 감소시키는 방법으로 전자빔의 위치를 변화시킨다. 스캔되는 전자빔이 광학축으로부터 멀리 벗어나면 추가적인 광학수차가 발생하게 된다. 일반적으로 자기장 디플렉터가 전기장 디플렉터보다 이미지 왜곡 현상이 적게 발생한다.

라. Stigmator

이상적인 전자빔은 원형모양으로 집속되어야 되지만, 일반적으로 좌우 비대칭의 원형모양을 가지게 된다. 이러한 비대칭 전자빔을 원형에 가깝게 보정하기 위하여 stigmator를 사용한다. 그림 8(b)는 자기장방식의 stigmator로서 구조는 디플렉터와 유사구조를 가지고 있으나 상하 또는 좌우에 동일한 자기장을 갖게 한다. 또한 stigmator는 광학축에서 벗어난 전자렌즈간의 빔을 정렬하는 데도 사용되고 있다. 전기장방식의 stigmator는 전기장방식의 디플렉터 구조와 동일한 구조를 가지고 있다.



마. Beam blanker

빔 블랭커 (beam blanker)는 전자빔이 시료에 도달하는 것을 제어하는 기능 (beam on and off)을 가지고 있다. 일반적으로 두 개의 전극 판구조로 되어 있으며, 전자빔은 두 전극 판 사이를 통과한다. 한쪽의 전극 판에 빠르게 전압을 인가하며 전자빔이 아퍼쳐 홀을 벗어나게 되어 전자빔이 시료에 도달하지 못하게 된다 [7].

바. 기타 부품

전자빔 리소그래피에서 시료에 도달하는 전자빔의 양은 전자빔 패턴의 시간을 결정하는 요소이며 정확한 전자빔량을 측정하기 위한 패러데이 컵이 있다. 또한 전자빔 focusing, deflection calibration, alignment mark detection 등을 위한 solid state detector가 있다.

4. 멀티전자빔 리소그래피기술

멀티전자빔 리소그래피 연구는 1990년대 초 IBM Watson 연구소에서 멀티빔 개념을 제시하면서 연구가 시작되었다 [8 - 10]. 멀티 전자빔방식은 현재 사용하는 단일 전자빔 리소그래피의 낮은 생산성을 해결할 수 있는 방안으로 ‘단일컬럼-멀티빔방식’ [11-13]과 ‘멀티컬럼-멀티빔방식’ [14-16]으로 구분할 수 있다.

단일컬럼-멀티빔방식은 그림 9 (a)와 같이 하나의 전자방출원에서 나오는 전자빔을 단일 칼럼구조에서 다수의 전자빔으로 분기하여 멀티빔을 만들어 제어하는 방식이며, 멀티컬럼-멀티빔방식은 그림 9 (b)와 같이 전자방출원과 전자칼럼이 구별되는 전자칼럼이 다수로 배열하여 되는 방식이다. 멀티빔방식의 공통적인 특징은 전자빔의 숫자에 비례하는 패터닝 속도가 증가하는 것뿐만 아니라 5 keV이하의 저에너지를

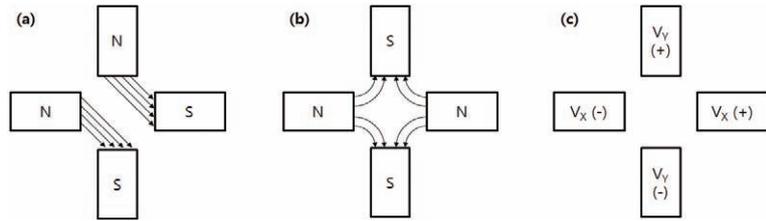


그림 8. (a) 자기정방식의 디플렉터 구조, (b)자기정방식의 stigmator구조, (c) 전기정방식의 디플렉터 구조

사용하여 resist와 높은 반응 속도, 낮은 소비전력 등을 가지고 있다.

단일컬럼-멀티빔은 단일 전자방출원에서 방출된 전자빔을 전자칼럼 내부에서 다수의 전자빔으로 분할한 방식이다. 이러한 방식은 분할되는 전자빔 숫자가 증가함에 따라 전자방출원에서 충분한 전자가 방출되어야 한다. 현재 유럽 국가를 중심으로 국제적인 컨소시엄을 구성하여 웨이퍼용 멀티빔 리소그래피 개발 [11-12]과 mask writer 개발 [13]이 진행되고 있다.

‘멀티컬럼-멀티빔방식’은 전자빔원의 구조를 획기적으로 축소한 초소형 전자빔원 기술을 활용하는 것이다 [11]. 초소형 전자빔원 기술은 전자방출원, 전자렌즈 및 전자빔조정 모듈등의 크기를 MEMS 공정을 사용하여 초소형화한 기술이다 [17-19]. 기존의 전자광학을 바탕으로 전자빔 칼럼구조를 기존의 것보다 획기적으로 소형화 (1/100 이하의 크기)함으로써 광학 수차를 극소화시켰으며, 전자총으로 field emission source 또는 thermal field emission source를 사용하여 고배율의 분해능을 얻을 수 있다. 초소형 전자빔기술로 제작된 전자칼럼은 성능이 우수하면서도 전체크기가 3 - 5 mm 정도로 매우 작아서 주어진 좁은 공간에서 직렬 또는 병렬로 배열하여 멀티전자빔을 구성할 수 있다. 즉, 초소형 전자빔을 $m \times n$ 병렬형으로 배치하여 활용함으로써 throughput

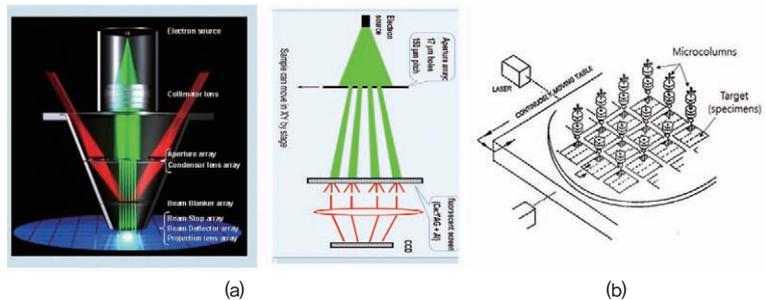


그림 9. 멀티전자빔 리소그래피기술 (a) 단일컬럼-멀티빔방식 (b) 멀티컬럼-멀티빔방식

Electron Beam Lithography

을 $m \times n$ 배로 높일 수 있다.

또한 ‘멀티컬럼-멀티빔방식’은 초소형 전자 광학계 설계기술과 웨이퍼 스케일 구조의 반도체 공정기술이 융합된 기술로서 바이오, 디스플레이 등의 다양한 산업 분야에 응용이 가능할 뿐만 아니라 소형구조, 높은 확장성, 저비용 대량생산 등이 가능하여 나노시대를 견인할 의 성장엔진 기술로 발전할 것으로 기대하고 있다.

참고문헌

[1] S.-W. Yasin, D. G. Hasko, H. Ahmed, "Fabrication of 5 nm width lines in poly(methylmethacrylate) resist using a water: isopropyl alcohol developer and ultrasonically-assisted" *Appl. Phys. Lett.* 78 (18), pp. 2760-2762 (2001).

[2] S. Chun, D. Kim, J. Kwon, B. Kim, S. Choi, S.-B. Lee, "Multi-step ion beam etching of sub-30 nm magnetic tunnel junctions for reducing leakage and MgO barrier damage" *J. of Appl. Phys.* 111, 07C722 (2012).

[3] D. R. Medeiros, A. Aviram, C. R. Guarnieri, W.-S. Huang, R. Kwong, C. K. Magg, A. P. Mahorowala, W. M. Moreau, K. E. Pettilo, M. Angelopoulos, "Recent progress in electron-beam resists for advanced mask-making", *IBM Journal of Research and Development*, 45 (5), 639-650 (2001).

[4] Mark A. McCord and Michael J. Rooks. "Electron beam lithography", In P. Rai Choudhury, editor, *Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication*, volume 1, chapter 2. SPIE Optical Engineering Press, London, (1997).

[5] P. W. Hawkes and E. Kasper, "Principles of electron optics, Volume 1", Academic press, London, 1989.

[6] 김호섭, 김대욱, 김영철, 최상국, 김대용, "초소형 전자렌즈의 전자 광학적 분석", *한국광학회지*, 14 (2), 194-199 (2003).

[7] D. S. Alles and M. G. R. Thomson. "The evolution of electron-beam pattern generators for integrated circuit masks at AT&T bell laboratories". In Norman G. Einspruch and R. K Watts, editors, *Lithography for VLSI*, volume 16 of *VLSI Electronics*, chapter 3, pages 57102, Academic Press, Orlando, 1987.

[8] T. H. P. Chang, D. P. Kern and L. P. Muray, "Microminiaturization of Electron-Optical Systems." *J. Vac. Sci. Technol.* B8 (6): 1698-1705 (1990).

[9] T. H. P. Chang, D. P. Kern and L. P. Muray, "Arrayed Miniature Electron-Beam Columns for High Throughput Sub-100 nm Lithography." *J. Vac. Sci. Technol.* B 10(6), 2743-2748 (1992).

[10] E. Kratschmer, H. S. Kim, M. G. R. Thomson, K. Y. Lee, S. A. Rishton, M. L. Yu, S. Zolgharnain, B. W. Hussey, T. H. P. Chang, "Experimental evaluation of a 20x20 mm footprint microcolumn", *J. Vac. Sci. Technol.* B 14(6): 3792-3796 (1996).

[11] E. Slot, M. J. Wieland, G. de Boer, P. Kruit, G. F. ten Berge, A. M. C. Houkes, R. Jager, T. van de Peut, J. J. M. Peijster, S. W. H. K.

Steenbrink, T. F. Teepe, A. H. V. van Veen, B. J. Kampherbeek, "MAPPER: High throughput maskless lithography", *Emerging Lithographic Technologies XII*, edited by Frank M. Schellenberg, *Proc. of SPIE Vol. 6921, 69211P*, (2008).

[12] D. Rio, C. Constanancias, M. Martin, B. Icard, J. van Nieuwstadt, J. Vijverberg and L. Pain, "5 kV multielectron beam lithography: MAPPER tool and resist process characterization", *J. Vac. Sci. Technol.* B 28, C6C14 (2010).

[13] E. Platzgummer, C. Klein, H. Loeschner, "Electron multibeam technology for mask and wafer writing at 0.1nm address grid", *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS* 12(3), p. 031108 (2013).

[14] T. H. P. Chang, M. G. R. Thomson, E. Kratschmer, H. S. Kim, M. L. Yu, K. Y. Lee, S. A. Rishton, B. W. Hussey, S. Zolgharnain, "Electron-beam microcolumns for lithography and related applications.", *J. Vac. Sci. Technol.* B14 (6): 3774-3781 (1996).

[15] T.H.P. Chang, M. Mankos, K. Y. Lee, L. P. Muray, "Multiple electron-beam lithography" *Microelectronic Engineering* 57-8, 117-135 (2001).

[16] H. S. Kim, Y. C. Kim, D.-W. Kim, S. J. Ahn, Y. Jang, H. W. Kim, D. J. Seong, K. W. Park, S. S. Park, B. J. Kim, "Low energy electron beam microcolumn lithography" *Microelectronic Engineering* 83(4-9), 962-967 (2005).

[17] H. S. Kim, D.-W. Kim, S. J. Ahn, S. S. Park, M.-H. Seol, Y. C. Kim, S. -K. Choi, and D. -Y. Kim, "Multi-beam microcolumns based on arrayed SCM and WCM." *Journal of the Korean Physical Society* 45(5), 1214-1217 (2004).

[18] H. -S. Kim, D. -W. Kim, S. Ahn, Y. C. Kim, J. Cho, S. -K. Choi, D. -Y. Kim, "Arrayed microcolumn operation with a water-scale Einzel lens." *Microelectronic Engineering* 78-79: 55-61 (2005).

[19] O. K. Suwal, A. Sharma, D. W. Kim, H. S. Kim, T. S. Oh and Y. B. Lee, "Influence of Einzel Lens Structure on the Performance of a Microcolumn Fabricated through MEMS Technology", *Advanced Materials Research*, 694, 1001-1007 (2013).

약 력

김호섭



- 2000년 2월 - 현재
선문대학교 차세대반도체기술연구소 연구소장
- 2000년 2월 - 현재
선문대학교 차세대디스플레이기술연구센터 센터장
- 2010년 3월 - 현재
선문대학교 대학원 나노과학과 주임교수
- 1999년 3월 - 현재
선문대학교 정보디스플레이학과 교수
- 1997년 11월 ~ 1999년 2월
미국 Elect Systems Inc Sr. Engineer
- 1992년 5월 ~ 1997년 10월
미국 IBM T. J. Watson Research Center 연구원
- 1987년 1월 - 1992년 5월
미국 미조리주립대학교 물리학과 Research Staff
- 1980년 3월 - 1992년 5월
미국 미조리주립대학교 물리학과 이학박사
- 1985년 8월 - 1986년 12월
미국 미조리주립대학교 물리학과 이학석사
- 1980년 3월 - 1984년 2월
인하대학교 물리학과 학사