

Monte Carlo 수치해석법을 이용한 저 에너지 초소형 마이크로칼럼에 사용되는 전자렌즈의 모양에 따른 전자빔 특성 연구

김영철¹, 김호섭¹, 김대욱¹, 안승준^{1*}

Research on the electron-beam characteristics according to the shape of electron lenses in low-energy microcolumn using Monte Carlo numerical analysis

Young-Chul Kim¹, Ho-Seob Kim¹, Dae-Wook Kim¹ and Seung-Joon Ahn^{1*}

요 약 마이크로칼럼에 사용되는 전자렌즈는 MEMS 공정으로 정밀하게 가공되어 기존의 전자칼럼에 비하여 광학수차를 최소화 할 수 있으며, 이는 전자칼럼의 성능 향상에 주요한 요소로 작용한다. 습식 식각과 건식 식각에 의해 형성되는 전자렌즈의 모양과 배열조합에 따른 전자 광학계 연구는 중요한 의미가 있다. 마이크로칼럼은 전자방출원, source 렌즈, deflector, focus 렌즈(Einzel 렌즈)로 구성되는데, 전자빔의 특성에 가장 큰 영향을 주는 source 렌즈의 구성 요소 중 extractor와 limiting aperture의 모양에 따른 전자빔 특성을 조사하여 마이크로칼럼 제작에 있어서 최적화된 전자렌즈 조합을 도출하였다.

Abstract Due to the modern MEMS technologies, the electron lenses that are used in the microcolumn can have much smaller optical aberrations compared with conventional electron lenses for the bulky electron columns. Since the electron lens system have great effect on the performance of the microcolumn, it is important to study the dependence of image quality on the configuration of the electronic imaging system, among which the source-lens part is most sensitive. In this work, we investigated the electron beam characteristics according to the shapes of extractor and limiting aperture that are elements of the source-lens part. By analyzing the data obtained, we proposed the optimum configuration of the electron lens system.

Key Words : Microcolumn, MEMS, Electron-Beam Characteristics, The Shape of Electron Lenses, Low Energy Electron-Beam

1. 서 론

1990년대 초에 IBM T. J. Watson 연구소에서 처음으로 개발한 마이크로칼럼은 그림 1과 같이 전자방출원, source 렌즈, deflector, focus 렌즈(Einzel 렌즈)로 구성되어 있으며, 전체 길이가 10 mm 이하의 초소형 전자칼럼이다. 마이크로칼럼은 길이가 짧아 column 내에서 운동하는 전자들 간의 산란을 최소화시키는 특징이 있다. 또한, 전자렌즈는 micro-electro-mechanical systems(MEMS) 공정[1, 2]으로 정교하게 제작된 $1 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ 크기의

aperture로 구성되고, 이들은 광학축 기준으로 $1 \mu\text{m} \sim 2 \mu\text{m}$ 이내로 정렬하여 전자칼럼의 광학수차를 최소화할 수 있어서 전자칼럼의 성능을 향상시킬 수 있다. IBM은 마이크로칼럼을 1 keV의 저에너지로 구동시켜 1 nA 이상의 빔 전류와 10 nm 이하의 분해능을 얻었다[3, 4].

또 다른 마이크로칼럼의 주요 특징은 소형 구조의 전자칼럼을 이용한 멀티(multi) 전자빔 구조[5]가 가능하다는 것이다. 멀티 전자칼럼은 현재 전자빔 장비, 예를 들어 CD-SEM, wafer-inspection, 전자빔 리소그래피 등에서 단점으로 지적되고 있는 생산성을 향상시킬 수 있다.

마이크로칼럼의 주요 부품은 전자렌즈와 focus 렌즈이

¹선문대학교 자연과학대학 신소재과학과
*교신저자: 안승준(sjan@sunmoon.ac.kr)

며, 재질은 반도체인 실리콘을 사용한다. 기존의 대형 전자칼럼은 금속판을 사용하여 기계적 가공을 통하여 전자가 통과하는 수 백 μm 크기의 aperture로 제작된다. 하지만 마이크로칼럼은 필요에 따라 수 μm 정도의 aperture를 제작해야 하기 때문에 홀의 정교한 가공이 요구된다. 이러한 문제는 반도체를 MEMS 공정으로 제작함으로써 해결하였다.

본 연구에서는 전자빔의 특성에 가장 큰 영향을 주는 source 렌즈의 구성 요소 중 extractor와 limiting aperture의 모양에 따른 전자빔 특성을 조사하여 마이크로칼럼 제작에 있어서 최적화된 전자렌즈 조합을 평가하였다.

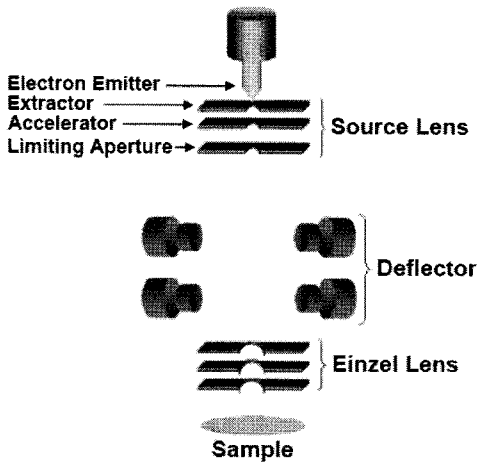


그림 1. IBM T.J. Watson 연구소에서 개발한 마이크로칼럼의 구조.

2. 전자렌즈의 구조 및 제작방법

전자렌즈의 기본 구조는 그림 2와 같이 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 크기의 실리콘 웨이퍼의 중앙에 두께가 수 μm 정도의 얇은 membrane[6]을 제작하고, 그 안에 수 $\mu\text{m} \sim$ 수백 μm 의 원형 또는 사각형 aperture를 가공하여 제작된다. 렌즈의 aperture는 비저항이 낮은 실리콘 membrane의 다층 박막에 photo-리소그래피, 식각 등과 같은 반도체 공정을 이용하여 정교하게 제작된다. 일반적으로 전자렌즈의 제작에 사용되는 반도체 MEMS 공정은 전자렌즈의 membrane을 형성한 후에 aperture를 제작하는 방법과 aperture를 제작한 다음 membrane을 형성하는 두 가지 방법을 사용하고 있다. Aperture의 균일도 및 aperture 형성 과정에서의 안정성 측면에서는 후자가 보다 효과적이다[7].

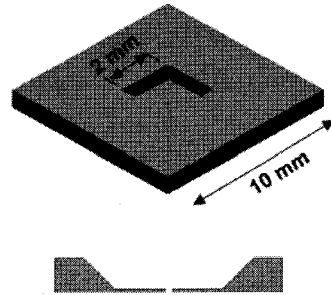


그림 2. 반도체 공정을 이용하여 두께가 수 μm 정도의 얇은 membrane에 제작된 전자렌즈.

전자렌즈의 식각을 위한 반도체 공정은 건식 식각과정과 습식 식각과정이 있다. 일반적으로 습식 식각과정은 공정 비용이 저렴한 특징을 가지고 있으나 식각 패턴의 유형에 제한을 받는다. 반면에 건식 식각공정은 식각하고자 하는 패턴의 형태를 자유롭게 할 수 있으며, 식각되는 깊이 등을 조절할 수 있는 특징을 가지고 있으나 공정 시설비가 많이 들어 공정원가가 높은 문제점이 있다. 또한 습식 식각과정은 일반적으로 건식 식각과정에 비해 등방성(isotropic)의 식각이 이루어진다. 습식 식각의 이러한 특징은 $2 \mu\text{m}$ 이하의 형상을 정의하는 데는 부적합하다 (그림 3 참조).

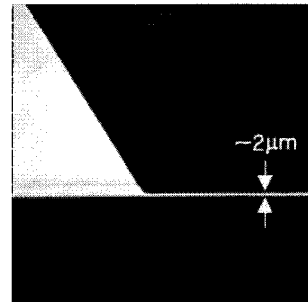


그림 3. 습식 식각에 의한 실리콘 membrane의

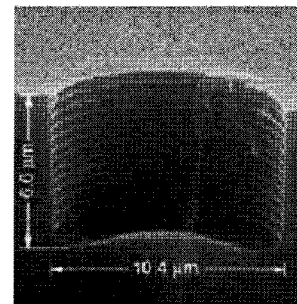


그림 4. 건식 식각으로 제작된 전자렌즈의 홀 단면. 식각 패턴.

비등방적으로 식각되는 건식 식각은 또한 상대적으로 레지스트를 제거하는 공정과 습식 식각 시 사용되는 매우 유해한 산용액과 용매의 처리공정을 하지 않는 이점을 가지고 있다. 그림 4는 건식 식각으로 제작된 렌즈 홀의 단면도로서 수직하게 식각된 모양을 보여 주고 있다. 전자렌즈의 제작방법이 건식 식각이나 습식 식각이나에 따라 렌즈의 모양이 다르게 된다. 따라서 본 연구에서는 전자렌즈 제작과정에서 발생한 형태 의존성(렌즈 홀 단면의 경사) 및 aperture의 모양(홀 또는 사각형)에 따른 전자빔 특성을 비교·분석하여 적절한 전자렌즈의 조합을 선택하는데 편리한 평가 도구로서 사용하고자 하였다.

3. 전자렌즈의 모양에 따른 전자빔 특성

Source 렌즈는 전자방출원에서 전자를 유도하는 extractor, 전자를 가속시키는 accelerator, 전자를 걸러주는 limiting aperture로 구성되어 있으며 마이크로칼럼의 전자빔 특성에 가장 큰 영향을 주는 부분이다. 본 연구에서는 source 렌즈를 구성하고 있는 각 렌즈의 구조에 따른 마이크로칼럼의 전자빔 특성을 조사하였다. Source 렌즈의 구성 요소 중 accelerator는 extractor와 limiting aperture에 비해 홀의 크기가 매우 크기 때문에 전자빔의 특성에 직접적인 영향을 주지 않을 것으로 예상됨으로 본 연구의 조사 대상에서 제외하였다.

본 연구에서 전자방출원과 extractor에 인가한 전압은 각각, -1 keV 와 $+500 \text{ V}$ 이고 focusing 전압은 -700 V 이다. 전자렌즈의 모양에 대한 의존성을 알아보기 위하여 제안한 모든 모델에 같은 전압을 인가하였으며 extractor의 홀 반경은 $5 \mu\text{m}$, accelerator의 반경은 $50 \mu\text{m}$, 그리고 limiting aperture의 반경은 $1.25 \mu\text{m}$ 를 사용하였다. Limiting aperture의 반경을 매우 작게 선택한 이유는 limiting aperture의 홀 크기가 전자빔의 spot size에 가장 큰 영향을 주는데, limiting aperture의 반경 $1.25 \mu\text{m}$ 일 때 대략 10 nm 의 spot 크기를 얻을 수 있기 때문이다. 그림 5는 마이크로칼럼 내부에서의 potential과 potential 영향으로 결정되는 전자빔의 궤적을 2차원(2-D) 수치해석을 이용하여 계산한 것이다. 그림의 아래 원점 부근에 전자방출원이 자리하고 있고, 전자방출원으로부터 extractor, accelerator, limiting aperture가 차례로 놓여있다. 전자빔은 limiting aperture($1000 \mu\text{m}$ 근처)에 의해 걸러진 후 focus 렌즈에 도달한다. 전자빔이 불룩하게 모아지는 위치($3300 \mu\text{m} \sim 3500 \mu\text{m}$)에 focus 렌즈가 위치하고 있다. Focus 렌즈는 광학에서 볼록 렌즈와 같은 역할을 한다.

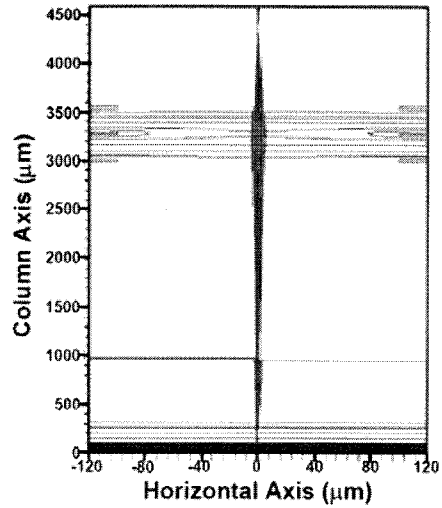


그림 5. 2-D 수치해석에 의한 마이크로칼럼 내부에서의 potential과 전자빔 궤적

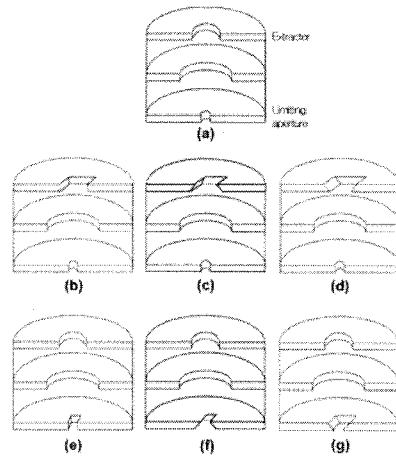


그림 6. 전자빔 특성 평가를 위한 전자렌즈의 형태 의존성과 aperture의 모양에 따른 전자렌즈의 모델.

그림 6은 전자렌즈 제작과정에서 발생한 형태 의존성과 aperture의 모양에 따른 전자빔 특성을 평가하기 위한 적절한 전자렌즈 조합의 모델을 도해한 것이다. 그림 6의 모델에 대하여 각각 수치해석 하여 마이크로칼럼 내부의 potential과 전자방출원에서 방출된 전자의 궤적을 계산하였으며, 이로부터 전자빔의 특성을 분석하였다. 전자빔의 working distance(Einzel lens 끝에서 전자빔 spot이 맺히는 점까지의 거리)와 전자빔의 spot 크기에 대한 분석 결과를 표 1에 정리하였으며 수치해석 도구에 대한 신뢰도를 평가하기 위하여 앞서서 제시한 습식 식각방법으로

extractor를 제작하여 (c) 조합과 (d) 조합에 대한 전자빔 spot 크기를 측정한 결과 13.0 μm , 8.3 μm 로서 수치해석 결과와 거의 일치함을 알 수 있었다.

표 1. 마이크로칼럼의 분해능에 대한 3차원(3-D) 수치해석 결과

구분(조합)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
Beam Spot Size(nm)	9.6	13.3	12.8	8.0	13.5	10.5	10.4
Working Distance(μm)	1626	1629	1627	1627	1624	1627	1627

본 연구에서는 모든 모델에 동일한 focusing 전압을 인가한 결과 모든 경우에 대하여 거의 비슷한 working distance의 값을 얻었다. 이 결과는 working distance는 Einzel 렌즈에 인가된 focusing 전압에 의해서 주도적으로 결정되기[8] 때문에 충분히 예측할 수 있었으며 렌즈의 모양은 working distance에는 거의 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다.

Working distance와는 달리 전자빔 spot 크기는 렌즈의 모양에 따라 상당한 의존성을 보이고 있다. 그림 6의 aperture 모양에 따른 전자렌즈 모델을 참조하면 (a) 조합과 비교하여, 사각형 모양으로 건식 식각된 렌즈를 사용하는 경우 spot 크기는 크게 증가하였다. Extractor를 사각형 모양으로 건식 식각된 (b) 조합의 렌즈를 사용하는 경우 spot 크기가 38.5 % 증가하였고, limiting aperture를 사각형 모양으로 건식 식각한 (e) 조합의 렌즈를 사용한 경우 spot 크기가 40.6 % 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 분해능을 높이기 위해서는 전자빔 spot 크기가 작아야 하기 때문에 extractor 또는 limiting aperture를 사각형으로 건식 식각된 렌즈의 조합은 적합하지 않다는 것을 알 수 있다.

반면에 습식 식각된 limiting aperture를 사용한 (f) 조합과 (g) 조합의 경우 spot 크기가 (a) 조합과 비교하여 각각 9.4 %와 8.3 % 증가하였다. 이 두 경우는 비교적 비슷한 결과를 얻었는데, 이는 limiting aperture는 일반적으로 전압을 인가하지 않기 때문에(전자빔을 걸러주는 역할을 하기 때문에) limiting aperture의 주변은 등전위(모두 0 V)가 되어 전자빔의 특성에 큰 영향을 주지 않게 된다.

그러나 extractor의 경우에는 렌즈의 모양에 따른 전자빔의 특성 변화가 크게 일어나는데 이것은 extractor가 전자방출원과 가장 가까운 곳에 위치하고 있어서 extractor 주변의 potential 변화가 크기 때문이다. 뿐만 아니라 extractor는 경우에 따라서 + 전압을 인가하기도 하는데 (본 연구에서는 7 가지 모델, 모든 경우에 +500 V를 인가), 이는 전자방출원에서 방출되는 전류를 높일 수 있기 때문이다. 따라서 extractor의 모양 변화는 주변의 potential 분포에 영향을 주고, potential의 변화는 extractor를 통과하는 전자의 궤적에 영향을 주게 되어 전자빔의 특성을 변화시키게 된다.

습식 식각된 extractor의 (c) 조합과 (d) 조합은 전자빔의 spot 크기에 있어서 서로 상반된 결과를 보이는데, 각각 33.3 % 증가, 16.7 % 감소하는 것으로 나타났다. 그 원인을 알아보기 위하여 extractor 부근에서 potential과 전기장의 세기를 계산하였다. 그림 7은 (c)와 (d) 조합을 가진 전자렌즈의 extractor 부근에서의 potential과 전기장의 세기를 보여준 것으로 그림 내의 점선은 extractor의 위치를 나타낸다. Potential은 (c) 조합이 (d) 조합보다 약간 높게 나타나는데, 이는 뾰족한 부분이 전자방출원에 가까이 있어서 potential 변화가 상대적으로 높기 때문이다. 마찬가지로 extractor 앞부분에서는 (c) 조합의 전기장 세기가 크다가 extractor 부근에서 역전되는 것을 알 수 있다. 이것은 (c) 조합의 경우 extractor의 정점을 지나면

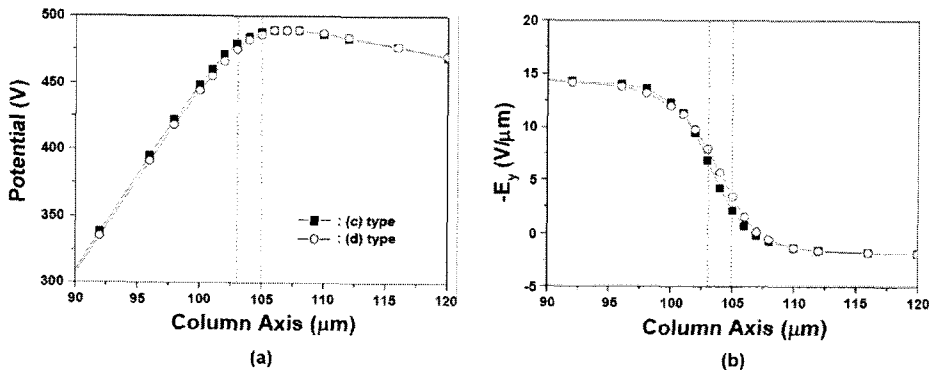


그림 7. (c)와 (d) 조합을 가진 전자렌즈의 extractor 부근에서의 (a) potential과 (b) 전기장의 세기.

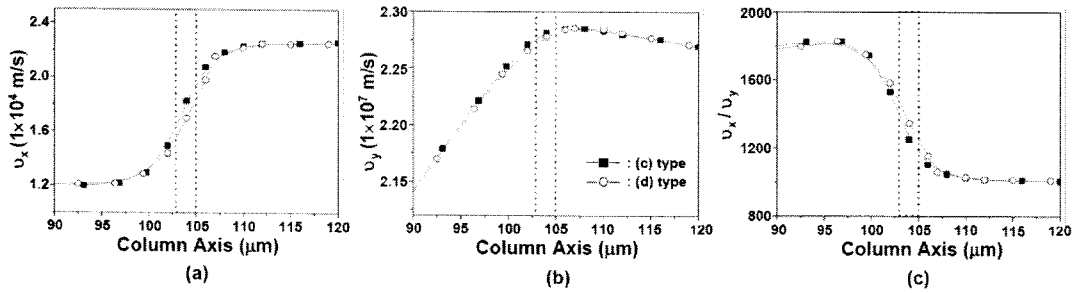


그림 8. (c)와 (d) 조합을 가진 전자렌즈의 extractor 부근에서의 전자 속력

서 potential의 변화가 약해지지만, (d) 조합인 경우 뾰족한 정점이 전자방출원으로부터 먼 곳에 있어서 전압의 변화가 지속되는 것으로 해석된다.

그림 8은 y 축 방향 및 x 축 방향에 대한 전자의 속력을 나타낸 것이다. y 축 방향 및 x 축 방향 모두 전자의 속력은 (c) 조합이 (d) 조합보다 다소 큰 값을 갖는다. 이는 뾰족한 정점이 전자방출원으로부터 보다 가까이 있기 때문에 전기장의 세기가 강해 전자의 속력에 영향을 미치기 때문이다. y 축 방향 및 x 축 방향에 대한 전자의 속력 비, v_y/v_x (그림 8(c) 참조)는 그림 7 (b)의 전기장 분포와 유사하다. 즉 전자방출원에는 - 전압이 인가되고, extractor에는 + 전압이 인가되기 때문에 전자방출원에서 방출된 전자는 extractor에 도달할 때 까지 가속된다.

(c) 조합의 경우 전자방출원과 extractor와의 간격이 (d) 조합보다 상대적으로 가깝기 때문에 가속이 커서 속력이 빠르게 증가한다. Extractor를 통과한 전자는 감속되는데, 이는 accelerator와 limiting aperture를 ground 처리하였기 때문이다. 따라서 (c) 조합의 경우 렌즈의 뾰족한 정점을 지나면서 전자가 감속되기 시작하기 때문에 뾰족한 정점이 뒤에 있는 (d) 조합의 경우와 속력이 뒤집히는 결과를 초래한다. 그러므로 (c) 조합이 (d) 조합보다 축방향으로의 전기장의 세기가 강해서 전자빔의 속력이 커지고 휘어지는 각도가 작아지기 때문에 (d) 조합의 전자빔 분해능이 가장 우수할 것으로 예측할 수 있으며 수치해석 결과와도 잘 일치함을 알 수 있었다.

자빔의 특성이 변하게 된다. 본 연구에서는 건식 식각과 습식 식각에 의해 전자렌즈의 제작 과정에서 발생하는 전자렌즈의 모양과 여러 가지 렌즈조합이 전자빔에 미치는 영향을 조사하였다. 특히 전자빔에 큰 영향을 주는 extractor와 limiting aperture에 대하여 원형과 사각형 모양과 이들의 7 가지 조합에 따른 전자빔의 working distance와 spot 크기를 3-D 수치해석에 의해 계산하였다.

Working distance는 모든 경우에 있어서 거의 변화가 없었으며 Einzel 렌즈의 focusing 전압과 각 전자렌즈에 인가된 전압에만 의존하고, 전자렌즈의 모양에는 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있었다. 반면 전자빔의 spot 크기는 모양 및 배열조합에 따라 비교적 큰 영향을 받는 것으로 평가되었다. 건식 식각에 의한 사각형 모양의 전자렌즈를 사용하는 경우(b)와 (e) 조합 spot 크기가 대체로 커서 원형의 수직인 전자렌즈(a) 조합보다 40 % 정도 증가하여 분해능이 저하되는 것을 알 수 있었다. 또한 습식 식각하여 뾰족해진 전자렌즈를 extractor로 사용할 경우 전자렌즈의 배열조합(c)와 (d) 조합에 따라 전자빔의 특성에 영향을 주는데, 이것은 전자방출원과 extractor 사이의 기하학적 구조가 배열조합에 따라 달라져 주변의 potential이 변하기 때문이다.

본 연구에서 전자렌즈의 제작 과정에 따른 모양과 배열조합에 따라 전자빔의 특성이 달라짐을 알 수 있었으며 7 가지 배열조합 중에서 (d) 조합의 전자렌즈 배열을 채택할 경우 대략 8 nm의 분해능을 구현할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

마이크로칼럼은 크기가 매우 작기 때문에 마이크로칼럼에 사용되는 전자렌즈는 반도체 MEMS 공정에 의해 정교하게 제작된다. 실리콘 웨이퍼를 식각하여 전자렌즈를 제작하는데, 식각 방법과 전자렌즈의 배열에 따라 전

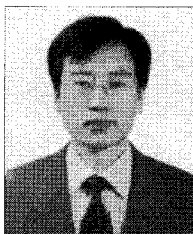
참고문헌

- [1] A. Singh, R. Mukherjee, K. Turner, S. Shaw, "MEMS implementation of axial and follower end forces", J. Sound and Vibration, Vol. 286, pp. 637-644, 2005. 2.
- [2] C. DaVia, J. Hasi, C. Kenney, A. Kok, S. Parker, "3D silicon detector-status and applications", Nuclear

Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 549, pp. 122-125, 2005. 5.

- [3] E. Kratschmer, H.S. Kim, M.G.R. Thomson, K.Y. Lee, S.A. Rishton, M.L. Yu, and T.H.P. Chang, "Sub-40 nm resolution 1 keV scanning tunneling microscope field-emission microcolumn", J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 12, Issue 6, pp. 3503-3507, 1994.
- [4] E. Kratschmer, H.S. Kim, M.G.R. Thomson, K.Y. Lee, S.A. Rishton, M.L. Yu, and T.H.P. Chang, "An electron-beam microcolumn with improved resolution, beam current, and stability", J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 13, Issue 6, pp. 2498-2503, 1995.
- [5] L.P. Muray, K.Y. Lee, J.P. Spallas, M. Mankos, Y. Hsu, M.R. Gmur, H.S. Gross, C.B. Stebler, and T.H.P. Chang, "Experimental evaluation of arrayed microcolumn lithography", Microelectronic Engineering, Vol. 53, pp. 271-277, 2000.
- [6] R. Iosub, C. Moldovan, M. Modreanu, "Silicon membrane fabrication by wet anisotropic etching", Sensors and Actuators A, Vol. 99, pp. 104-111, 2002.
- [7] S.S. Park, D.W. Kim, S.J. Ahn, Y.C. Kim, S.K. Choi, D.Y. Kim, and H.S. Kim, "High-Beam-Current Microcolumns with Large Apertures", Jap. J. of Appl. Phys., Vol. 43, 6B, pp. 3986-3989, 2004.
- [8] 김호섭, 김대욱, 김영철, 최상국, 김대용, "초소형 전자 렌즈의 전자 광학적 분석", 한국광학회지, Vol. 14, Issue 2, pp. 194-199, 2003.

김영철(Young-Chul Kim) [정회원]



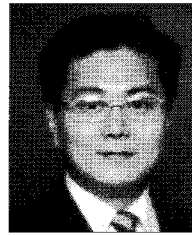
- 1991년 2월 인하대학교 물리학과(이학사)
- 1993년 2월 인하대학교 물리학과(이학석사)
- 2000년 8월 인하대학교 물리학과(이학박사)
- 2001년 8월 충북대학교 박사후 연구원

- 2002년 2월 한국표준과학연구원 위촉연구원
- 현재 2003년 9월~현재 선문대학교 신소재과학과 강의 교수

<관심분야>

icrocolumn, 전자빔 기술, 디스플레이광학, 빛의 얽힘성, 빛의 비고전성

김호섭(Ho-Seob Kim) [정회원]



- 1984년 2월 인하대학교 물리학과(이학사)
- 1986년 12월 미국 미조리주립대학교 물리학과(이학석사)
- 1992년 5월 미국 미조리주립대학교 물리학과(이학박사)
- 1996년 10월 IBM Watson Research Center 연구원

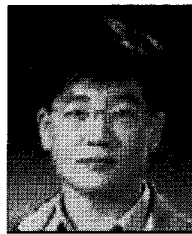
- 1999년 2월 Etec System, Inc 전자빔 리소그래피 설계/제작 팀장

- 현재 1999년 3월~현재 선문대학교 신소재과학과 교수

<관심분야>

전자빔 리소그래피, Microcolumn, Multi microcolumn, 전자빔 기술, 반도체 장비

김대욱(Dae-Wook Kim) [정회원]



- 1984년 2월 서울대학교 전자공학과 (공학사)
- 1988년 2월 서울대학교 물리학과 (이학석사)
- 1992년 2월 서울대학교 물리학과 (이학박사)
- 1993년 3월 선문대학교 물리학과 전임강사

- 1999년 4월 ~ 현재 : 선문대학교 신소재과학과 교수

<관심분야>

반도체 공정 및 micro-fabrication, Laser Spectroscopy, 반도체 저차원 구조

안승준(Seung-Joon Ahn) [정회원]



- 1985년 2월 : 경북대학교 자연과학대학 물리학과(이학사)
- 1989년 2월 : 한국과학기술원 물리학과(이학석사)
- 1993년 2월 : 한국과학기술원 물리학과(이학박사)
- 1989년 2월~1997년 2월 : 삼성 전자 반도체연구소 선임연구원

- 1993년 3월~현재 : 선문대학교 자연과학대학 신소재과학과 부교수

<관심분야>

반도체 공정 및 장비기술, 레이저 annealing, 레이저 미세가공, 전자빔 기술, 접지기술