

## 전자 렌즈 Aperture 구조에 따른 마이크로칼럼의 전자빔 특성

최상국<sup>†</sup>

전자통신연구원

Ⓣ 305-350 대전광역시 유성구 가정동 161번지 한국전자통신연구원

이천희

청주대학교 전자공학과

Ⓣ 360-764, 충북 청주시 상당구 내덕동 36번지

(2005년 5월 31일 받음, 2005년 7월 28일 수정본 받음)

마이크로칼럼에 사용되는 전자렌즈는 MEMS 공정으로 정밀하게 가공되어 기존의 전자칼럼에 비하여 광학수차를 최소화 할 수 있으며, 이는 전자칼럼의 성능 향상에 주요한 요소로 작용한다. 따라서 반도체 공정 방식(습식식각과 건식식각)에 의해 형성되는 렌즈 구조에 따른 전자 광학계 연구는 중요한 의미가 있다. 마이크로칼럼을 구성하고 있는 전자방출원, 소스렌즈, 디플렉터, 포커스렌즈(Einzel lens) 중에서 전자빔의 특성에 가장 큰 영향을 주는 것은 소스렌즈이다. 본 연구에서는 소스렌즈의 extractor와 limiting aperture의 구조에 따른 전자빔 특성을 조사하였다.

주제어 : Microcolumn, Electrostatic lens, Electron beam.

### I. 서 론

1990년 초반에 IBM T. J. Watson 연구소에서 처음으로 개발한 마이크로칼럼은 그림 1과 같이 전자방출원, 소스렌즈, 디플렉터, 포커스렌즈(Einzel 렌즈)로 구성되어 있으며, 전체 길이가 10 mm 이하의 초소형 전자칼럼이다. 마이크로칼럼은 길이가 짧은 칼럼 내에서 이동하는 전자들 간의 scattering을 최소화되는 특징이 있다. 또한, 전자렌즈는 MEMS 공정으로 정교하게 제작된 1~100  $\mu\text{m}$  크기의 aperture로 구성되어 있다. 이들을 광학축 기준으로 1~2  $\mu\text{m}$  이내로 정렬하면 전자 칼럼의 광학수차가 최소화되어 전자 칼럼의 성능을 향상시킬 수 있다. IBM은 마이크로칼럼을 1 keV의 저에너지로 구동시켜 1 nA 이상의 beam current와 10 nm 이하의 분해능을 얻었다.<sup>[1-4]</sup>

또 다른 마이크로칼럼의 주요 특징은 소형구조의 전자칼럼을 이용한 멀티 전자빔 구조 적용이 가능하다는 것이다. 멀티 전자칼럼은 현재 사용되고 있는 전자빔 장비, 예를 들어 CD-SEM, wafer-inspection, electron beam lithography 등에서 단점으로 지적되고 있는 낮은 생산성을 향상시킬 수 있다.

마이크로칼럼의 주요 부품은 소스렌즈와 포커스렌즈이며, 재질은 실리콘을 사용한다. 기존의 대형 전자칼럼은 금속판을 사용하여 기계적 가공을 통하여 전자가 통과하는 수 백  $\mu\text{m}$  크기의 aperture로 제작된다. 하지만 마이크로칼럼은 필요에

따라 수  $\mu\text{m}$  정도의 aperture를 제작해야 하기 때문에 aperture의 정교한 가공이 요구된다. 이러한 문제는 반도체 MEMS 공정을 도입함으로써 해결하였다.

지금까지 마이크로칼럼에서 사용되는 전자렌즈 aperture는 건식 식각으로 제작된 것을 사용하여 제작되었다. 하지만 습식 공정으로 전자렌즈를 제작하면 제작이 용이하고 제작비용이 절감되는 효과가 있다. 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 습식 공정으로 제작되어 렌즈 홀 단면에 경사를 가진 구조의 렌즈가 전자빔에 미치는 영향과 습식 식각 렌즈의 적용 가능성을 2-D와 3-D 구조의 전자렌즈 분석이 가능한 전자광학 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 조사하였다.<sup>[5]</sup>

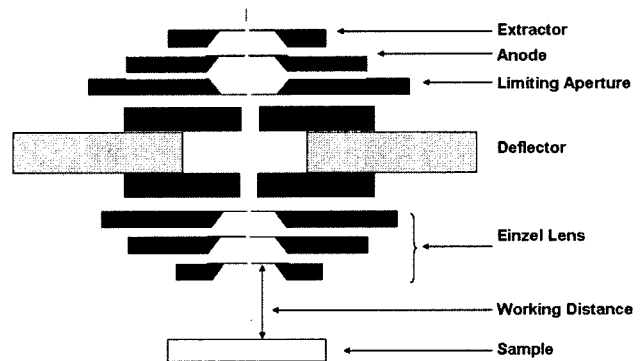


그림 1. 마이크로칼럼 구조

<sup>†</sup>E-mail: csk@etri.re.kr

## II. 렌즈 제작

전자렌즈의 기본 구조를 보면, 그림 2와 같이  $10 \times 10$  mm 크기의 silicon chip 중앙에 두께가 수  $\mu\text{m}$  정도의 얇은 membrane 을 제작하고, 그 안에 수~수백  $\mu\text{m}$ 의 원형 또는 사각형 aperture가 가공된다. 렌즈의 aperture는 비저항이 낮은 실리콘을 photo-lithography, 식각 등과 같은 반도체 공정을 이용하여 정교하게 제작된다.

전자렌즈의 식각을 위한 반도체공정은 건식 식각과 습식 식각 방법으로 구분된다. 일반적으로 습식 식각 방법은 공정 비용이 저렴하지만 정밀한 공정에는 제한을 받는다. 반면에 건식 식각 방법은 정밀한 제어가 가능하지만 공정 단가가 높다는 문제점을 가지고 있다.

전자렌즈제작에 적용 가능한 습식 식각 방법은 KOH 또는 TMAH 용액을 활용한 Si 비등방 식각으로, 실리콘의 결정방향에 따라 식각되는 비율과 식각 형태가 다르게 나타난다. 습식 식각 방법으로 식각하여 제작한 membrane의 경사면의 각도는 기판 면에 대하여  $54.7^\circ$ 를 이룬다. 이 경우 습식 식각 방법을 사용하였음에도 불구하고 membrane이 정밀한 구조를 이루는 것은 사전에 기판 표면에  $2 \sim 3 \mu\text{m}$  깊이로 boron을 고농도로 doping함으로써 etch stop 층을 형성하였기 때문이다. 그러나, 고농도의 boron doping은 깊이에 제한이 있어

두꺼운 membrane 혹은 두꺼운 렌즈 제작에는 적용하기 어렵다. 건식 식각으로 제작된 렌즈 홀은 수직으로 식각이 가능하여 이 방법을 이용 할 경우 렌즈 두께는 수십  $\mu\text{m}$  이상도 가능하다.

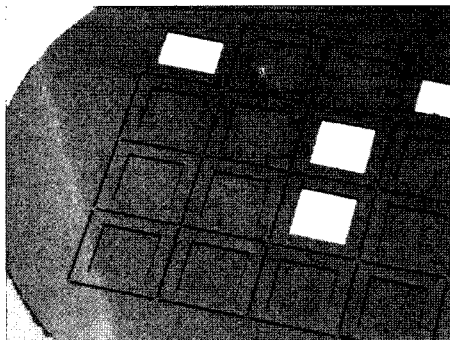
## III. 전자빔 특성

마이크로칼럼 구조에서 소스렌즈는 전자방출원에서 전자를 유도하는 extractor, 전자를 가속시키는 accelerator, 전자를 걸러주는 limiting aperture 렌즈로 구성되어 있다. 소스렌즈는 전자빔의 특성에 가장 큰 영향을 주는 부분이다. 따라서 본 연구에서는 소스렌즈를 구성하고 있는 각 렌즈의 구조에 따른 전자빔의 특성을 조사하였다. 소스렌즈의 구성 요소 중 accelerator는 extractor와 limiting aperture에 비해 홀의 크기가 매우 크기 때문에 빔의 특성에 직접적인 영향을 주지 않을 것으로 예상됨으로 본 연구의 조사 대상에서 제외하였다. 즉, extractor 와 limiting aperture의 습식 식각 및 건식 식각에 따른 렌즈 구조 변화에 따른 전자빔의 특성을 연구하였다.

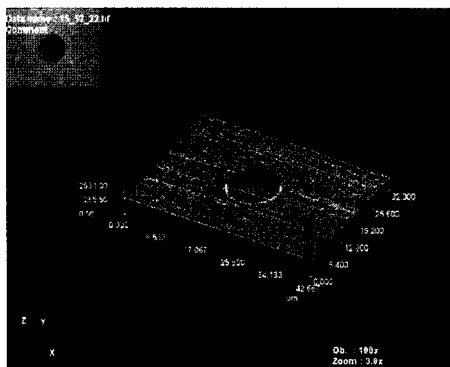
렌즈의 구조가 미치는 영향만을 보기 위하여 모든 경우에 전자방출원, extractor에 인가한 전압은 각각,  $-1$  keV와  $+500$  V이고 focusing 전압은  $-700$  V로 고정하였다. 또한 extractor의 홀 반경은  $2.5 \mu\text{m}$ , accelerator의 반경은  $50 \mu\text{m}$ , 그리고 limiting aperture의 반경은  $1.25 \mu\text{m}$ 를 사용하였다. Limiting aperture의 반경을 매우 작게 선택한 이유는 limiting aperture 홀 크기가 빔의 spot size에 가장 큰 영향을 주는데, limiting aperture의 반경  $1.25 \mu\text{m}$ 일 때 대략  $\sim 10$  nm의 spot size를 얻을 수 있기 때문이다. Limiting aperture의 반경이 커짐에 따라 빔의 spot size는 급격히 증가한다.

그림 3은 2-D simulation으로 얻은 마이크로칼럼 내부에서의 포텐셜과 빔의 궤적, 그리고 extractor와 limiting aperture의 구조이다. 그림 3 (a)는 칼럼 내부의 포텐셜 모양과 포텐셜의 영향으로 결정되는 전자의 궤적을 계산한 것이다. 그림의 아래 원점 부근에 전자를 방출하는 전자방출원 (또는 팁)이 자리하고 있고, 전자방출원으로부터 extractor, accelerator, limiting aperture가 차례로 놓여있다. 전자빔은 limiting aperture에 의해 걸러진 후 포커스렌즈에 도달한다. 빔이 볼록하게 모아지는 위치에 포커스렌즈가 위치하고 있다. 포커스 렌즈는 광학에서의 볼록 렌즈와 같은 역할을 한다. 그림 3 (b)와 (c)는 extractor를 습식 식각에 의해 제작된 렌즈 모양과 그 주변의 등전위선을 나타낸다. 식각된 렌즈를 설치하는 방향에 따라 등전위선의 모양 및 간격이 달라지고 이로부터 전자빔의 특성이 달라진다. 이를 확인하기 위하여 (b)와 (c)를 각각 조사하였는데, (c)의 경우 (b)의 경우 보다 등전위선의 곡률이 다소 큰 것을 그림에서 확인 할 수 있다.

그림 3 (d)와 (e)는 limiting aperture를 습식 식각한 모양을 보여주고 있는데, 이 경우 extractor와는 다르게 주변에 등전위선을 볼 수 없는 것은 limiting aperture에는 전압을 인가하지 않고 ground 처리하기 때문에 주변의 전압은 모두  $0$  V로



(a)  $10 \times 10$  mm 박막 Wafer.



(b) 직경이  $10 \mu\text{m}$ 인 Hole 3D 사진.

그림 2. 전자렌즈 구조.

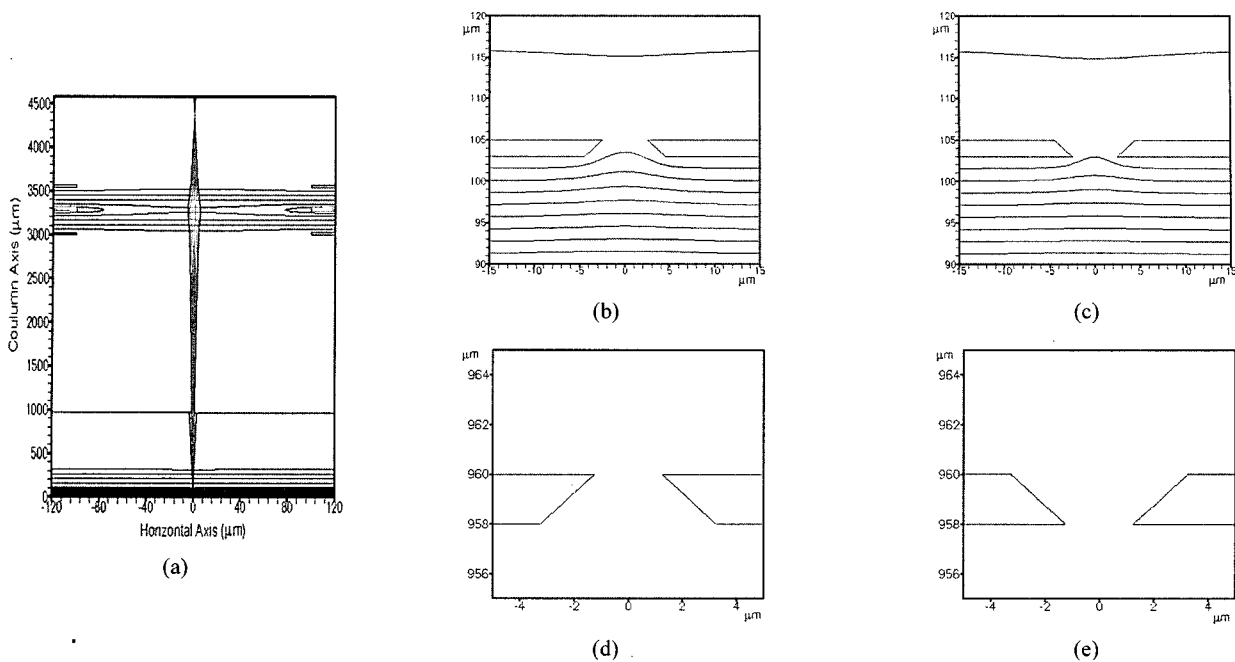


그림 3. (a) 모든 부분에 건식 식각으로 제작된 렌즈를 사용하여 계산한 마이크로칼럼 전영역의 등전위선. Extractor와 limiting aperture의 두께는 모두 2 μm이고, 직경은 각각 5 μm와 2.5 μm이다. (b)와 (c) extractor를 습식 식각으로 제작된 렌즈 모양과 주변의 등전위선. 렌즈의 두께는 2 μm이고, 홀의 좁은 쪽 직경은 5 μm이고 이로 넓은 쪽의 직경은 54.7°로 식각 되어 직경이 약 8 μm이다. (d)와 (e) limiting aperture를 습식 식각으로 제작된 렌즈 모양. 렌즈의 두께는 2 μm이고, 홀의 좁은 쪽 직경은 2.5 μm이고 이로 넓은 쪽은 54.7°로 식각 되어 직경이 약 5 μm이다.

전위차가 없기 때문에 등전위선을 볼 수 없다. 이는 extractor에는 보통 0 V를 인가할 수도 있지만 (+) 전압을 인가하여 전자 방출원으로부터 많은 전자를 방출하도록 하여 높은 전류를 얻는데 사용되는 반면 limiting aperture는 단지 전자를 걸러주는 역할을 하기 때문에 전압을 인가하지 않는 것이 일반적이기 때문이다.

그림 4는 렌즈 모양에 따라 전자빔의 특성을 조사하기 위하여 채택한 3-D simulation 모델이다. 그림 5는 시뮬레이션을 통하여 렌즈 모양에 대한 빔의 특성 연구하기 위하여 고려된 각 모델을 나타낸다. 그림 5 A는 extractor와 limiting aperture가 모두 원형으로 건식 식각된 것이고, B는 사각형 모양의 건식 식각된 것으로 shape beam을 얻고자 할 때 주로 이용된다. C와 D는 사각형 모양으로 습식 식각된 것이다. E는 limiting aperture가 사각형 모양으로 건식 식각된 것이고, F와 G는 사각형 모양으로 습식 식각된 것이다. 각 7가지 모델에 대하여 simulation하여 모델 내부에 포텐셜과 전자 방출원에서 방출된 전자의 궤적을 계산하였으며, 이로부터 빔의 특성을 분석하였다. 전자빔의 working distance(Einzel lens 끝에서 샘플까지의 거리, 그림 1 참조)와 spot size에 대한 분석 결과는 표 1에 정리되어 있다.

Working distance는 모든 경우의 거의 같은 결과로 나타났다. Working distance는 Einzel lens에 인가된 focusing 전압에 의해서 결정되는데,<sup>[3,4]</sup> 본 연구에서는 모든 경우에 같은

focusing 전압을 인가하였다. 이로부터 렌즈의 구조는 working distance에는 거의 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다. Working distance와는 달리 빔 spot size는 렌즈의 모양에 따라 변화를 보여주고 있다. 일반적으로 사용되는 모양인 A-타입과 비교하여, 사각형 모양으로 건식 식각된 렌즈를 사용하는 경우 spot size는 크게 증가하였다. Extractor로 사각형 모양으로 건식 식각된 렌즈(B-타입) 사용하는 경우 spot

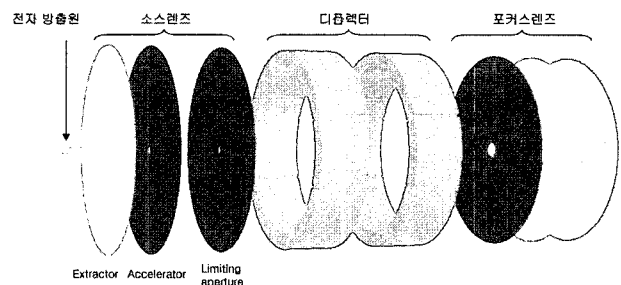


그림 4. 시뮬레이션 모델.

표 1. 전자칼럼의 분해능에 대한 3-dimensional 시뮬레이션 결과

구분	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

size가 증가하였고, limiting aperture를 사각형 모양으로 건식 식각한 렌즈를(F-타입) 사용한 경우도 spot size가 증가하는 것으로 나타났다.

습식 공정으로 제작된 렌즈 구조를 사용할 경우, 습식 식각된 limiting aperture(F-타입과 G-타입)은 spot size가 모두 증가하는 것을 보이고 있다. 이것은 limiting aperture 주변의 전압은 거의 0 V로 전위차가 없기 때문에 F-와 G-타입의 구분될 만한 변화가 없고 전자빔의 특성에 큰 영향을 주지 않는 것으로 생각된다.

반면 extractor 경우는 모양에 따라 빔의 특성 변화가 큰 것으로 나타났다. 이는 전자 방출원과 가장 가까운 곳에 위치하고 있어서 extractor 주변에 전압 변화가 심하기 때문이다. 뿐만 아니라 extractor 자체에도 경우에 따라서 (+) 전압을 인가하는데(본 연구에서는 모든 경우에 extractor에 +500 V인가), 이는 방출원에서 방출되는 전류를 높일 수 있기 때문이다. 따라서 extractor의 모양 변화는 주변의 포텐셜 분포에 영

향을 주고, 포텐셜의 변화는 이곳을 통과하는 전자의 궤적에 영향을 주므로 이는 전자빔의 특성을 변화시킨다. 습식 식각된 extractor의 C-타입과 D-타입은 빔의 spot size에 있어서 서로 상반된 결과를 초래하는데, 각각 33.3% 증가, 16.7% 감소하는 것으로 나타났다. 그 원인을 알아보기 위하여 extractor 부근에서의 포텐셜과 전기장 세기를 계산하였다. 그림 6(a)와 (b)는 각각 포텐셜과 전기장 세기를 각각 보여준다. 그림 내의 점선은 extractor의 위치를 나타낸다. 포텐셜은 C-타입이 D-타입 보다 약간 높게 나타나는데 이는 뾰족한 부분이 전자 방출원에 가까이 있기 때문에 포텐셜 변화가 상대적으로 높기 때문이다. 마찬가지로 extractor 앞부분에서는 C-타입의 전기장의 세기가 크다가 extractor 위치에서는 역전되는 것을 알 수 있다. 이는 C-타입의 경우 전자빔이 extractor의 정점을 지나면서 포텐셜의 변화가 약해지지만 D-타입인 경우 뾰족한 정점이 전자 방출원으로부터 먼 곳에 있어서 전압 변화가 지속되는 것으로 해석된다.

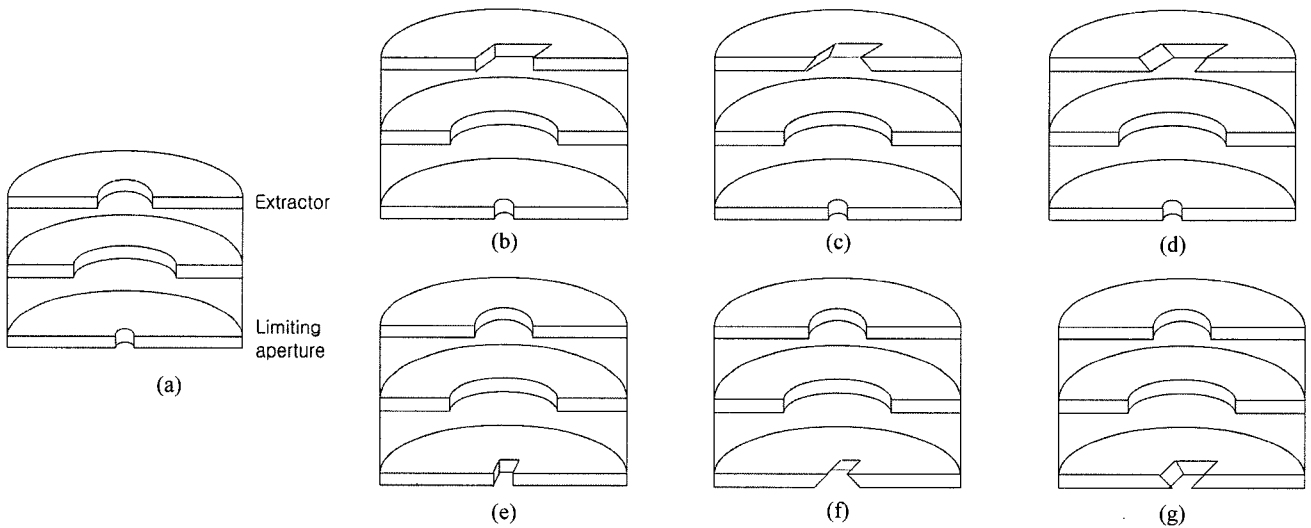


그림 5. 전자빔 특성을 조사하기 위한 렌즈 모양.

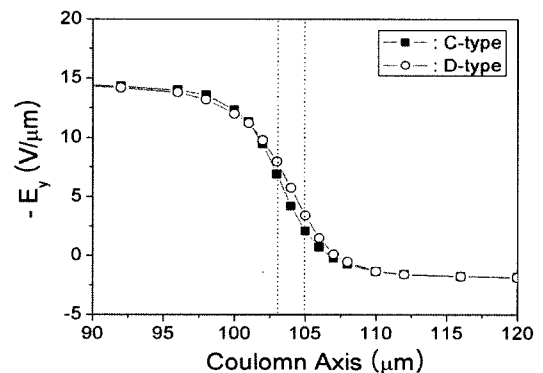
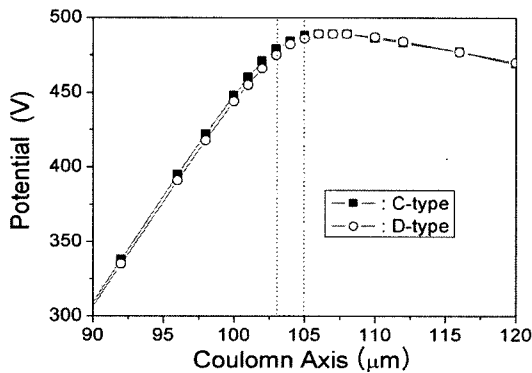


그림 6. Extractor 부근에서의 포텐셜과 전기장 세기 분포.

#### IV. 결 론

식각에는 습식 식각과 건식 식각으로 구분되는데 식각 방법에 따라 전자렌즈의 모양이 달라진다. 습식 식각으로 제작된 전자렌즈는 54.7°의 뾰족한 모양이고 건식 식각으로 제작된 전자렌즈는 직각을 이룬다. 본 연구에서는 두 가지 모양이 전자빔에 미치는 영향을 조사하였다. 특히 전자빔에 큰 영향을 주는 extractor와 limiting aperture에 대하여 두 가지 전자렌즈 모양에 따른 전자빔의 working distance와 spot size를 3-D simulator를 이용하여 계산하였다.

Working distance는 Einzel 렌즈에 인가된 focusing 전압 및 각 전자렌즈에 인가된 전압에만 의존하고, 전자렌즈의 모양에는 영향을 받지 않는 것으로 확인되었다. 반면 전자빔의 spot size는 모양 및 장착 방향에 따라 비교적 큰 영향을 받는 것으로 조사되었다. 건식 식각에 의하여 사각 모양의 수직인 전자렌즈를 사용하는 경우(B-와 E-타입) spot size는 분해능에 영향을 주는 것으로 확인되었으며 원형의 수직인 전자렌즈를 사용한 경우 보다 spot size는 40% 정도 증가하였다. 이는 칼럼의 광축으로부터 모서리 부분이 원형에 비해 비대칭일 뿐만 아니라 aperture 크기가 증가하는 효과를 주기 때문인 것으로 해석된다.

또한 extractor를 습식 식각하여 뾰족해진 전자렌즈를 장착하는 방향에 따라(즉 C-와 D-타입) 빔의 spot size에 영향을 주는 것으로 확인되었다. 이는 extractor는 전자방출원과 가까워서 extractor 주변의 전압 변화가 심한 곳이기 때문이다. 즉, 뾰족한 부분이 전자방출원 방향으로 설치된 경우와 반대

방향으로 설치 경우의 등전위선의 간격과 모양이 다소 차이가 생기고 이로부터 전기장의 세기가 달라져서, 전자가 이 영역을 통과할 때 받는 영향이 달라진다. C-타입이 D-타입보다 축 방향으로의 전기장의 세기가 강해서 전자빔의 속력이 커지고 휘어지는 각도가 작다. 전자빔의 분해능에 D-타입이 좋은 것을 확인하였다.

#### 참고문헌

- [1] 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, no. 6, pp. 3503-3507, 1994.
- [2] 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, no. 6, pp. 2498-2503, 1995.
- [3] 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," *Japanese J. of Appl. Phys.* Vol. 43, 6B, pp. 3986-3989, 2004.
- [4] 김호섭, 김대욱, 김영철, 최상국, 김대용, "초소형 전자렌즈의 전자 광학적 분석", 한국광학회지, Vol. 14, no. 2, pp. 194-199, 2003.
- [5] OPERA, *Vector Fields Ltd.*, Oxford, England.

### Electron Beam Properties of Microcolumn Based on the Structure of Electrostatic Lens Apertures

Sang Kuk Choi<sup>†</sup>

161 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon. 305-350 Korea

Cheon-Hee Yi

Electronic Engineering Dept. Chong Ju University, 36, Naedok-Dong, Choung-Ju City, Korea

<sup>†</sup>E-mail: csk@etri.re.kr

(Received May 31, 2005, Revised manuscript July 28, 2005)

Micro lens precisely fabricated by MEMS process, is a key component of the Microcolumn, Since, miniaturization can reduce aberrations, microcolumn is expected to have better performance than conventional columns. Depending on the fabrication techniques, the sectional view of micro lens has different shape. In the paper, the effect of the sectional shape of extractor lens and limiting aperture on the focusing property of microcolumns have been studied.

OCIS Codes : 110.3960, 220.3740.