

논문 20-6-1

초소형 전자칼럼의 대면적 주사 적정조건

The Optimal Condition for Scanning Large Area with a Micro-electron-column

박성순¹, 김호섭¹, 장원권^{2,a}
(Sung Soon Park¹, Ho Seob Kim¹, and Won Kweon Jang^{2,a})

Abstract

In large area scanning with a micro-electron-column, the operating condition for the best resolution was investigated in factors of working distance and field of view. The resolution of a test sample was dependent on electron beam energy and scanning field size. The best resolution with single deflector was obtained at 300 V and 30 mm in the electron emitting tip voltage and a working distance, respectively. The scanning area at that condition was 13.9×13.9 mm², linearly increased with the working distance. Double deflector was employed for larger scanning size without increasing working distance, but showed only 1.7 times larger than that of single deflector, and the resolution was inverse proportional to the scanning size.

Key Words : Micro-electron column, Resolution, Field of view, Scanning size

1. 서론

약 10년 전 처음으로 소개된 초소형 전자칼럼(micro-electron-column)의 제작기술은 전자빔 리소그래피와 같은 기존의 전자빔 기술의 영역 뿐 아니라 멀티전자빔 기술, 미니 패키징, 휴대용 SEM과 같은 소형이기 때문에 가능한 산업분야의 핵심기술이 되었다[1-4]. 그림 1은 초소형 전자칼럼의 일반적인 구조와 작동원리를 나타낸 것으로 크게 전자방출원(emitter)과 전자칼럼으로 구성된다. 전자방출원에서 방출된 전자빔은 전자방출렌즈(source lens), 스캔장치(deflector), 및 전자빔을 대상물에 집속하는 아인젤렌즈(Einzel lens)를 거쳐 대상물에 투사된다[5,6]. 전자방출원은 텅스텐 팁(tip)을 사용하며, 각각의 전자 렌즈는 광학적 제어를 통해 적층 구조로 정밀하게 조립된다. 기존의 전자칼럼의 길이를 1/10이하로 줄인 초소형 전자

칼럼은 2 μm의 두께의 실리콘 membrane에 직경이 수~수십 μm의 원형 개구를 형성하여 제작한 것이며, 3장의 실리콘 membrane이 절연체인 파이렉스를 사이에 두고 적층으로 정밀하게 조립되었다[7].

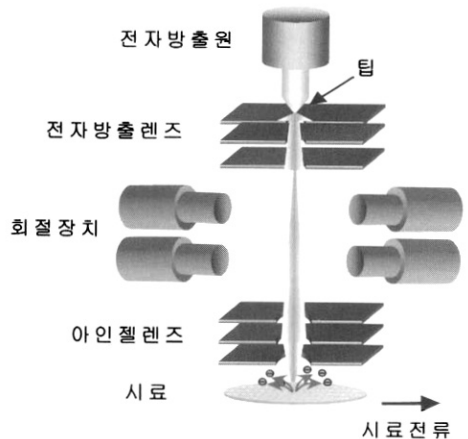


그림 1. 초소형 전자빔의 구조와 측정 장치.
Fig. 1. Structure and measurement of a micro-electron column.

1. 선문대학교 신소재과학과, 차세대반도체연주소
2. 한서대학교 컴퓨터응용물리학과
(충남 서산시 해미면 대곡리 360)

a. Corresponding Author : jwk@hanseo.ac.kr
접수일자 : 2007. 2. 6
1차 심사 : 2007. 4. 30
심사완료 : 2007. 5. 14

본 연구에서는 LCD 패널과 같은 대면적의 대상물을 주사할 필요가 있을 경우 최대 주사면적 크기(scan field size)와 선명도의 상관관계를 조사하여 실제 산업 현장에서 사용이 가능한 주사형 검사장치로서의 기능과 최대 선명도를 보이는 적정 동작조건을 조사하였다.

주사면적을 크게 하기 위해 전자빔을 대상물에 집속하는 아인켈렌즈를 제거한 상태에서 전자빔의 에너지와 스캔 장치의 전압을 변화시키며 최대 주사면적과 영상의 선명도의 적정성을 판단하였다. 또한 작업거리(working distance)를 크게 할 경우 커지는 주사면적과 선명도의 관계 및 단일 스캔장치를 이용하였을 경우와 이중 스캔장치를 이용하였을 경우의 최대 주사면적과 선명도의 변화를 조사하였다.

2. 시료 및 실험장치

선명도를 유지하면서 주사면적을 크게 하기 위해서는 전자방출원 팁의 인가전압, 조사 대상물로부터 전자칼럼까지의 작업거리, 스캔장치의 수 등을 고려하여야 한다. 전자방출원 팁의 전압을 높일 경우 분해능은 증가하지만 주사 면적은 좁아지고 상의 왜곡이 불안정하게 변한다. 반면, 전자 칼럼과 주사 대상물 사이의 작업거리를 크게 하면 주사 면적은 증가하지만 상의 왜곡이 심화되고 선명도가 떨어진다. 또한 편향각을 크게 하기 위해 스캔장치를 추가하면 주사면적은 증가하지만 시스템의 크기가 크고 복잡해지며, 제작비가 증가하는 단점이 있다. 일반적으로 주사 면적을 증가시킬 경우 대상물의 중앙 부분에서는 선명도가 유지되지만 외곽 부분은 렌즈 수차로 인해 상의 왜곡(distortion)이 크게 발생한다. 이를 극복하기 위해 기존의 전자 칼럼은 최대한 근접하게 배열을 하여도 전자 칼럼 자체의 부피 때문에 주사 면이 겹치는 부분에서 상의 왜곡이 여전히 발생하게 되며, 장비가 크고 복잡하게 되는 문제가 있다. 이처럼 상의 왜곡은 기존의 전자칼럼이 가지고 있는 근본적인 문제이지만 초소형 전자 칼럼을 이용할 경우 좁은 간격으로 전자 칼럼을 나열할 수 있어 상의 왜곡을 최소화하는 것이 가능해진다. 즉, 초소형 전자칼럼을 이용할 경우 전자 칼럼 사이의 거리가 기껏해야 80 mm 정도로 배열이 가능하므로 대면적의 대상물을 스캔하는데 있어서 외곽 부분에서의 상의 왜곡을 거의 없앨 수 있게 된다. 또한, 전자빔의 주사거리를 기존의 전자칼럼을 이용할 경우

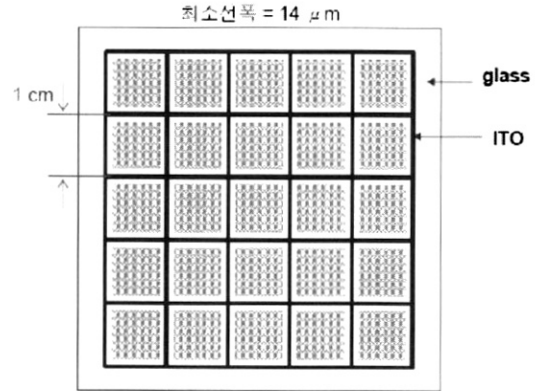


그림 2. 시료의 모습.
Fig. 2. Test sample.

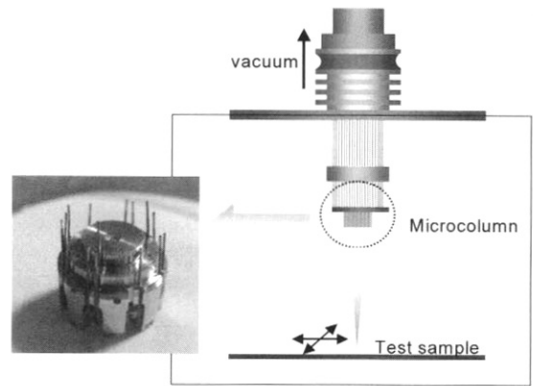


그림 3. 전자칼럼과 주사 장비 구조도.
Fig. 3. Scanning experimental setup with a micro-electron column.

보다 대폭 줄임으로 장비의 크기를 매우 작고 단순하게 하면서 주사 대상물의 크기를 대면적화하는데 제한이 없는 장점이 있다.

우선 정확한 분석을 위한 시료를 제작하였다. 그림 2에서 알 수 있듯이 시료는 유리 위에 투명전극(ITO)를 형상화(patterning)한 것으로 사각 유리 위에 투명전극을 코팅하고 그 위에 광 노출 공정을 거쳐 제작하였다. 제작된 시료를 SEM으로 측정된 결과 최소 선폭은 14 μm 이었다.

그림 3은 본 실험에 사용한 전자칼럼과 시료시험 장치의 내부구조도를 보여주고 있다. 일반적으로 전자칼럼을 제작할 때 전자방출원, 전자방출렌즈, 두층으로 구성된 이중 스캔장치, 그리고 전자빔을 대상물에 집속하는 아인켈렌즈로 조립하여

완성된다. 하지만 이번 실험에서는 주사면적을 극대화하기 위하여 대상물에 전자빔을 집속하는 아인펠렌즈를 제거하였으며, 세 층으로 이루어진 전자방출렌즈를 집속렌즈(focusing lens)로 활용하였다. 왜냐하면, 아인펠렌즈를 사용할 경우 분해능은 우수하나 스캔장치가 아인펠렌즈 위에 위치하므로 넓은 영역의 주사가 불가능하다. 그러므로 아인펠렌즈를 제거한 상태에서 전자방출렌즈만을 이용하여 집속된 전자빔을 이용하여 시료의 형상을 얻었다. 그림 3에서와 같이 초소형 전자 칼럼과 시료는 전자칼럼의 안정적인 작동을 위해 초고진공 상태를 유지할 수 있는 이온 펌프가 장착된 진공 중에서 실험을 진행하였다. 전자 칼럼과 시료사이의 작업거리를 변화시키기 위하여 전자 빔 축 방향으로 이동대(translator)를 장착하였다.

3. 전류 형상화 실험

준비된 시료의 전류형상화는 전자 빔 주사에 의해 투명전극을 통해 발생하는 시료의 전류 값을 직접 계기로 측정하여 얻은 전류 신호 값의 변화를 형상화 하였다. 시료로부터 얻은 전류 값을 그대로 형상화하는 방법은 추가로 다른 고가의 측정장비를 필요로 하지 않으면서 간단하게 할 수 있다는 장점이 있을 뿐만 아니라, 전자빔에 다른 외부 에너지를 전가되지 않은 상태에서 전자빔의 편향을 비교적 안정적으로 재현할 수 있었다. BSE나 SE와 같은 측정 장비를 사용하면 시각적인 선명도를 더욱 향상시킬 수 있지만 본 연구에서는 전자빔의 전자방출원에 인가되는 인가전압, 주사 면적 및 선명도 등의 상관관계를 조사하기 위하여 추가의 측정 장비를 사용하지 않고 단순하게 시료로부터 얻은 전류 값만으로 형상화하며 분석하였다.

스캔장치는 두 층으로 이루어졌으나, 스캔장치의 개수에 의한 주사 면적과 선명도의 관계를 확인하기 위하여 처음에는 아래쪽 스캔장치만을 사용하였다. 하나의 스캔장치만을 이용하여 전자빔을 대상물에 집속하였을 때 전자방출렌즈의 집속전압을 변화시키며 선명도가 가장 좋을 때의 조건을 구하였다. 실험조건은 텅스텐 재질의 전자방출 팁에 인가하는 전압을 증가시키며 실험을 수행하였다.

전자빔의 에너지가 150 eV일 경우 전자방출렌즈를 이용하여 전자빔을 집속하고, 스캔장치에서 전자빔을 스캔시켜 주사하며 시료의 전류 형상을

얻었다. 전자방출원의 전류는 약 300 nA이었으며, 전자방출렌즈의 집속 전압은 -63 V에서 안정적인 시료의 전류 값이 측정되었으므로 이 조건에서 실험을 수행하였다. 이때 시료로부터 측정된 전류 값은 약 0.1 nA이하이었고, 전자방출렌즈와 시료사이의 작업거리는 30 mm이었다. 이 후 시료에 장착된 이동대를 작동시켜 전자칼럼을 시료의 반대방향으로 이동시켜 작업거리를 80 mm까지 증가시키면서 시료의 전류형상을 얻었으며 이를 그림 4에 나타내었다. 작업거리가 40 mm를 넘어가면서 시각적 선명도가 현저하게 떨어지기 시작하는 것을 알 수 있었다. 이는 집속전압을 고정한 상태에서 초점거리가 맞지 않기 때문이므로 이를 극복하기 위해 전자방출원의 전압을 올리고 전자방출렌즈의 집속전압을 조절하였으나 주사면적이 좁아지고 렌즈수차에 의한 왜곡이 증가하며 전체적인 선명도가 감소하였다. 또한 전자방출원의 전압과 전자집속렌즈의 인가전압을 내리면서 조절할 경우 렌즈의 수차가 심화되며 선명도가 현저히 감소하였다. 작업거리를 30 mm 이하로 할 경우는 중앙 부분과 모서리 부분의 전류 값의 차이가 커지면서 불안정한 전류형상을 나타내었는데 이것은 초점을 맞추기 위해 전자방출렌즈의 집속전압을 높일 경우 초점의 직경이 작아지면서 중앙 부분은 더욱 뚜렷한 형상을 보이나 중앙 부분과 외각 부분의 전류 구배(gradient)가 커지기 때문이다. 작업거리에 따른 주사면적은 작업거리가 30 mm일 때 $13.9 \times 13.9 \text{ mm}^2$ 에서 작업거리가 80 mm일 때 $33.6 \times 33.6 \text{ mm}^2$ 까지 정사각형 모양의 주사 면에서 한 번 길이의 증가에 비례하여 선형으로 증가하였으나 전자방출원의 인가전압과 전자방출렌즈의 집속전압을 조절하여도 선명도는 작업거리의 증가에 따라 현저하게 낮아지는 것이 관찰되었다.

전자빔 에너지를 점차 증가시키면서 같은 조건에서 실험을 반복하였다. 즉, 전자 방출 팁에 가해지는 인가 에너지를 변화시키면서 주사면적과 선명도의 변화를 측정하였는데 전자방출원에 가해지는 에너지가 300 eV일 때 가장 좋은 전류 형상을 얻을 수 있었으며, 이 때 전자방출원의 전류는 60 nA이었으며, 전자방출렌즈의 집속 전압은 -209 V에서 안정적이었다. 전자방출원에 가해지는 전압이 더욱 증가할 경우 이를 제어하기 위해 전자방출렌즈의 집속전압을 더욱 크게 하여야 하므로 안정적인 전류형상화가 어려웠다. 이것은 전자방출렌즈와 스캔장치에서의 전자빔의 안정적인 조절이 어렵고 결국 상의 왜곡이 두드러지는 것으로 판단된다.

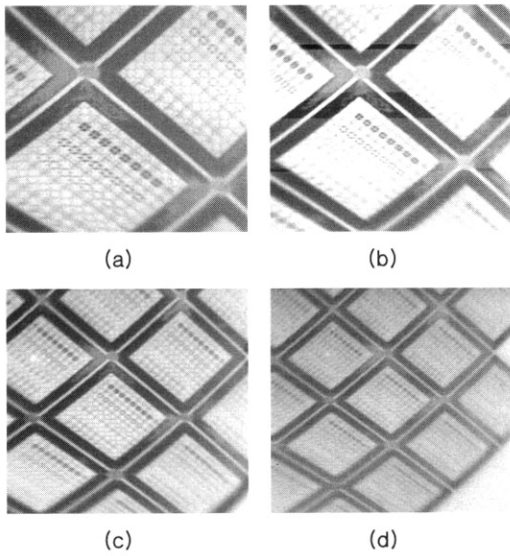


그림 4. 작업거리 변화에 따른 시료로부터의 전류 형상.(팁에너지; 150 eV, 전자방출전류;300 nA, 전자방출렌즈의 집속전압;-63 V) (a) 30 mm, (b) 40 mm, (c) 60 mm, (d) 80 mm

Fig. 4. Current images of test sample with working distance.(tip energy; 150 eV, electron emitting current; 300 nA, Focusing voltage of electron emitting lens; -63 V) (a) 30 mm, (b) 40 mm, (c) 60 mm, (d) 80 mm

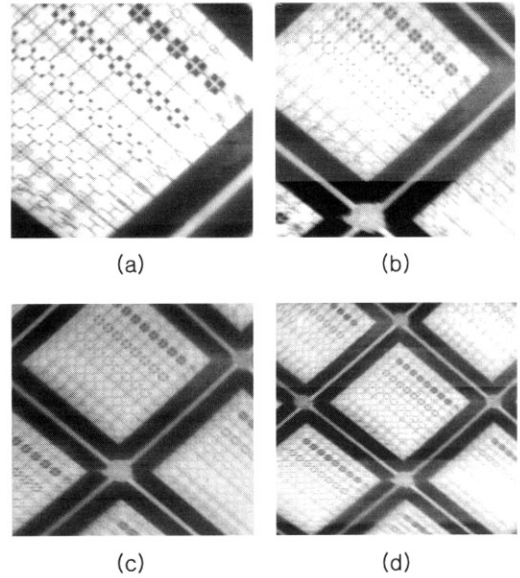


그림 5. 작업거리 변화에 따른 시료로부터의 전류 형상.(팁에너지; 300 eV, 전자방출전류;60 nA, 전자방출렌즈의 집속전압;-209 V) (a) 30 mm, (b) 50 mm, (c) 70 mm, (d) 100 mm

Fig. 5. Current images of test sample with working distance.(tip energy; 300 eV, electron emitting current; 60 nA, Focusing voltage of electron emitting lens; -209 V) (a) 30 mm, (b) 50 mm, (c) 70 mm, (d) 100 mm

그림 5는 이 때 시료로부터 측정되는 전류 형상을 나타낸 것으로 작업거리를 30 mm부터 100 mm까지 변화시켜가며 측정한 결과이다. 시료로부터 읽은 전류 값은 작업거리가 30 mm일 때 1 nA 정도였으며, 작업거리가 증가함에 따라 다소 감소하였다. 작업거리가 30 mm일 때 가장 좋은 선명도의 전류 형상을 얻을 수 있었으며 40 mm이상에서 급격하게 선명도가 떨어지는 것이 확인되었다. 작업거리에 따른 주사면적은 작업거리가 30 mm일 때 $7.2 \times 7.2 \text{ mm}^2$ 로 같은 작업거리에서 전자방출원의 인가전압이 150 V일 때의 $13.9 \times 13.9 \text{ mm}^2$ 의 거의 절반 수준이었다. 작업거리가 100 mm일 때는 $19.9 \times 19.9 \text{ mm}^2$ 로 작업거리의 증가에 따라 정사각형 모양의 주사 면에서 한 변 길이의 증가에 비례하여 선형으로 증가하였으므로 주사면적의 크기는 대략 전자 방출 팁에 인가되는 에너지에 비례하는 것을 알 수 있었다.

그림 6은 선명도를 비교하기 위해 전자방출 팁의 인가전압이 300 V, 150 V일 때 작업거리가 각각 30 mm와 100 mm일 때의 전류 형상을 단순 확대한 것이다. 최대 주사면적을 나타낸 그림 4와 그림 5의 결과와 달리 모두 양호한 선명도를 보이고 있음을 알 수 있다. 그러므로 전자방출 팁의 전압을 60 V로 매우 낮은 상태에서 그림 5와 같은 전자방출원의 전류 및 집속전압 조건에서 최대 주사면적 전류 형상과 확대한 형상을 비교하였다. 그림 7은 작업거리는 70 mm 일 때 최대주사면적 ($95.0 \times 95.0 \text{ mm}^2$)에 대한 전류형상과 단순 확대하여 본 전류형상을 나타낸 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 최소 선폭은 14 μm 로 전자방출 팁의 전압을 높이고 작업거리를 조절할 경우 1 μm 이하의 선폭에 대해서 선명한 선명도를 가지고 있음을 알 수 있었다.

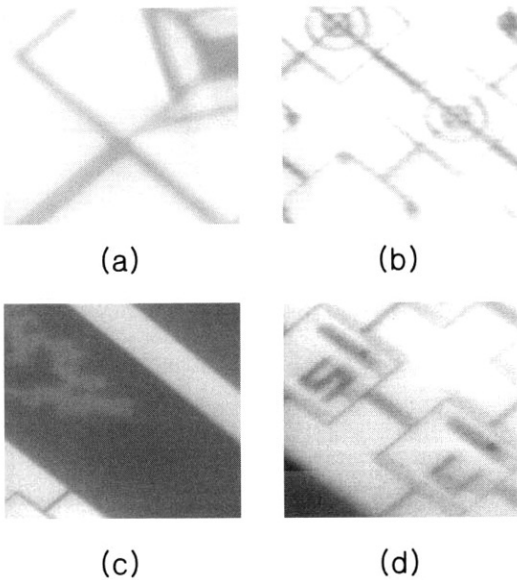


그림 6. 전자방출 팁 전압과 작업거리에 따른 선명도 비교. (a) 300 V, 30 mm, (b) 300 V, 100 mm, (c) 150 V, 30 mm, (d) 150 V, 100 mm
 Fig. 6. Comparison of resolution with working distance and electron emitting voltage. (a) 300 V, 30 mm, (b) 300 V, 100 mm, (c) 150 V, 30 mm, (d) 150 V, 100 mm

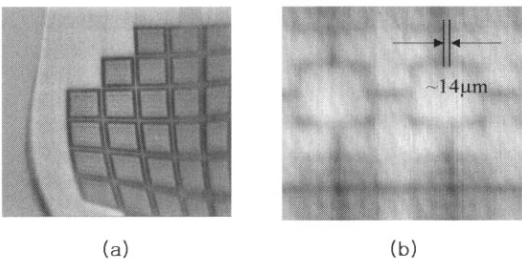


그림 7. 전자방출 팁의 전압이 60 V 일 때 (a) 최대주사면적에 대한 전류형상, (b) 단순 확대 전류형상.
 Fig. 7. When the electron emitting voltage was 60 V, (a) current image for the maximum scan field size, (b) simply expanded current image.

주사면적을 확대하기 위해서 작업거리를 늘리는 방법 외에 스캔장치를 하나 더 사용하여 전자 빔의 편향각을 크게 하는 방법이 가능하다. 본 실험

에서는 두 개의 스캔 장치를 이용하였을 때 주사면적의 확대에 따른 선명도의 변화정도를 알아보았다. 전자방출원의 인가전압이 300 V일 때 그림 5의 실험조건과 같은 상태에서 두 번째 스캔장치를 작동하였다. 두 스캔장치의 간격은 약 1 mm 이었고, 주사면적의 확대는 1.7배정도로 스캔장치의 수에 비례하여 증가하지는 않았으며 선명도 역시 주사면적에 비례하여 감소하는 것이 확인되었다.

4. 결과 및 토의

그림 4와 그림5의 실험결과는 전자방출원의 인가전압을 150 V와 300 V로 하였을 때 전자방출렌즈의 집속전압을 가장 좋은 선명도를 보이는 조건으로 고정하고 작업거리를 변화시켜가며 시료에 대한 전류형상화를 한 결과이다. 전자방출원의 인가전압을 증가시킬 경우 전자에너지가 증가하여 전자 빔의 속도가 증가하게 되므로 이를 조절하기 위해 전자방출렌즈의 집속전압을 높일 경우 시료의 중앙부분과 모서리 부분에서 전류 값의 구배가 나타나게 된다. 그러나 낮은 전자방출원의 인가전압에서는 전자에너지가 작으므로 전자방출렌즈의 집속전압이 비교적 낮은 조건에서 전류형상을 얻을 수 있었다. 그러나 비교적 선명도(visibility)가 낮아져 전체적으로 흐린 형상을 얻게 되는 경향이 있다. 그러므로 선명도를 증가시키기 위해 전자방출원의 인가전압을 높이고 이를 제어하기 위해 전자방출렌즈의 집속전압을 함께 증가시키며 실험한 결과 그림 5에서와 같이 전자 빔 에너지가 300 eV 이고 전자방출렌즈의 집속전압이 -209 V일 때 가장 좋은 전류 형상을 얻을 수 있었다. 작업거리는 30 mm일 때 가장 좋은 것으로 나타났는데 이것은 작업거리가 커질 경우 주사면적이 증가하여 단위면적당 측정 전류 값이 감소하여 선명도가 떨어지게 된다. 그림 6의 (a), (b)의 결과와 (c), (d)의 결과는 각각 같은 전자방출원의 인가전압에서 작업거리를 30 mm와 100 mm로 하였을 때의 결과를 비교한 것이다. 모두 양호한 선명도를 보였다. 전체 주사면적을 비교한 그림 4, 5의 결과에서는 선명도의 차이를 분명하게 보여주지만 국소적인 부분을 비교한 그림 6에서는 시료의 선폭이 14 μm로 비교적 크기 때문에 낮은 전류 값에 대해서도 비슷한 정도의 형상을 이룬 것으로 사료된다. 이에 대한 실험을 확대하여 그림 7과 같이 전자방출원의 인가전압을 60 V로 낮추고 전류 형상을 측정된 결과

전류 형상의 왜곡이 비교적 높은 전자방출원의 인가전압의 경우에 비해 심해지는 것이 관측되었다. 이것은 전자방출원의 전압이 300 V보다 낮아질수록 선명도가 감소하고 주사면적이 증가하며 상의 왜곡이 심화되는 것을 나타낸다. 반대로 전자방출원의 전압이 300 V이상일 경우는 전자방출렌즈에서의 제어가 충분치 않아 전류형상의 구배가 발생하였다. 주사면적도 작업거리가 30 mm보다 커지면 선명도가 감소하고 작아지면 구배가 증가하는 것이 관측되었다.

5. 결 론

대면적을 나노크기의 분해능으로 주사할 필요가 있는 경우 기존의 전자칼럼을 이용하는 것은 장비의 크기가 크고 번거로워 여러 가지 제약이 따른다. 초소형 전자칼럼은 작동시 적정조건에서 주사면적의 확대에 따른 상의 왜곡을 최소화하고 주사대상의 면적에 거의 구애받지 않고 적용할 수 있으므로 LCD와 같은 대면적 검사장비 등에 응용될 수 있다. 본 논문에서는 시료와 초소형 전자칼럼을 직접 제작하고 전자방출원의 인가전압과 작업거리 및 스캔 장치의 수에 따른 선명도와 주사면적의 변화에 관하여 조사하여 대면적 주사 적정조건을 구하였다. 주사면적은 단순히 전자방출원에 인가하는 전압에 비례하였으나 시야각은 스캔장치의 수에 단순 비례하지 않았다. 또한 본 논문에서는 시료로부터 얻은 전류 값을 직접 영상화하였으며 추가의 영상화 장비를 이용하지 않은 상태에서 높은 선명도를 얻을 수 있었다. 본 연구결과를 바탕으로 보다 정밀한 측정 장비와 시료로부터 얻은 신호의 샘플링 처리를 한다면 보다 미세한 영상을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] E. Kratschmer, H. S. Kim, M. G. R. Thomson, K. Y. Lee, S. A. Rishton, M. L. Yu, S. Zolgharnain, B. W. Hussey, and T. H. P. Chang, "Experimental evaluation of a 20×20 mm footprint microcolumn", J. Vac. Sci. & Technol., Vol. B14, No. 6, p. 3792, 1996.
- [2] T. H. P. Chang, M. G. R. Thomson, E. Kraschmer, H. S. Kim, M. L. Yu, K. Y. Lee, S. A. Rishton, B. W. Hussey, and S. Zolgharnain, "Electron-beam microcolumns for lithography and related applications", J. Vac. Sci. & Technol., Vol. B14, p. 3774, 1996.
- [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., Vol. B12, p. 3503, 1994.
- [4] C. Stebler, T. Pfefer, U. Stauffer, and N. F. de Rooji, "Microfabricated double layer octupoles for microcolumn applications", Microelectronic Eng., Vol. 46, p. 401, 1999.
- [5] M. G. R. Thomson and T. H. P. Chang, "Compression of field-emission angular distribution using a cathode shield", J. Vac. Sci. & Technol., Vol. B13, p. 2445, 1995.
- [6] 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., Vol. B13, p. 2498, 1995.
- [7] 박종선, 장원권, 김호섭, "마이크로 전자렌즈의 광학적 정렬과 조립", 한국광학회지, 17권, 4호, p. 216, 2006.