

저 전압 초소형 전자칼럼의 주사면적 크기 및 전류영상 특성 연구

이치무라 노리유키 · 김영철 · 김호섭

선문대학교 신소재과학과

☎ 336-708 충남 아산시 탕정면 갈산리 100

장원권[†]

한서대학교 컴퓨터응용물리학과

☎ 356-706 충남 서산시 해미면 대곡리 360

(2008년 7월 28일 받음, 2008년 8월 29일 수정본 받음, 2008년 8월 29일 게재 확정)

정전기장 편향기를 사용하는 저전압 초소형 전자칼럼에서 전자빔 집속 적정조건에 대해 조사하였다. 일정한 전자 방출 팁 전압조건에서 소스렌즈를 이용하여 전자빔을 집속할 경우 아인젤 렌즈를 이용할 경우보다 주사면적은 컷으나 전류영상의 선명도는 낮게 측정되었다. 3차원 전산시뮬 결과 소스렌즈를 사용하여 전자빔을 집속할 경우 전자빔의 초점크기와 편향이 아인젤 렌즈를 이용하여 집속할 경우보다 큰 것으로 조사되었다.

주제어: microcolumn, current image, visibility

I 서 론

10여 년 전 IBM에서 최초로 개발된 초소형 전자칼럼(microcolumn)은 기존의 전자칼럼에 비해 매우 작고, 비교적 낮은 전압에서 작동이 가능하며, 시스템 구성에 비용이 적게 드는 장점이 있다.^[1,2]

전자빔 리소그래피와 같은 기존의 전자빔 기술 영역뿐 아니라 휴대용 SEM(scanning electron microscope)으로 구성이 가능하기 때문에 응용 분야도 점차 증가하고 있다.^[3,4] 비록 하나의 초소형 전자빔 시스템이 갖는 주사면적은 그리 넓지 않지만 여러 개의 초소형 전자빔 시스템을 연결한 멀티 전자빔 시스템으로 구성할 경우 마스크 없이 비교적 낮은 전압에서 전자빔 리소그래피가 가능하며 오히려 작업 면적에 제한이 거의 없다. 단위 시간당 리소그래피 작업량도 기존의 전자빔 칼럼을 이용할 경우보다 증가하며 사각지대 없는 양질의 생산성을 가질 수 있다.

그림 1은 초소형 전자칼럼의 구조를 나타낸 것으로 전자 방출원(electron emitter)으로부터 방출된 전자빔을 모아주는 소스렌즈(source lens), 편향기(deflector)와 대상물의 바로 앞에서 전자빔을 집속하는 아인젤 렌즈(Einzel lens)로 구성된다. 대상물의 전도성에 따라 전도전류 영상을 얻거나 후방산란 전자에 의한 전류 영상을 얻게 되는데 주어진 조건에서 가능한 넓은 주사면적과 최적의 전류 영상을 얻는 것은 전자현미경의 기능에 매우 중요하다. 전자 방출원으로는 주로 텅스텐 팁(tip)이 사용되며, 소스렌즈와 아인젤 렌즈는 각각 3장의 실리콘 membrane에 파이프렉스 절연체로 구분된 적층을 이루며 광학적으로 정밀하게 조립되어있다. 렌즈를 구성하는

두께가 2 μm인 실리콘 membrane의 중앙에는 직경이 수~수백 μm 정도의 원형 개구(aperture)가 형성되어 전자를 집속 제어하게 되어있다.^[5,6] 전자빔의 집속은 소스렌즈나 아인젤 렌즈를 사용하여 모두 가능하며, 그림 1에서 전자빔의 집속을 소스렌즈에서 할 경우와 아인젤 렌즈에서 할 경우를 광학적 도해로 나타내었다. 선명한 전류영상과 넓은 주사면적은 초소형 전자칼럼의 전자현미경 성능이나 전자빔 리소그래피 작업성능에 매우 중요한 요소이므로 이를 제어할 수 있는 조건을 검색하는 일은 매우 중요하다.

본 연구에서는 전자 방출 팁의 인가전압, 소스렌즈와 아인젤 렌즈의 제어 조건에 따른 전류영상의 선명도(visibility)와

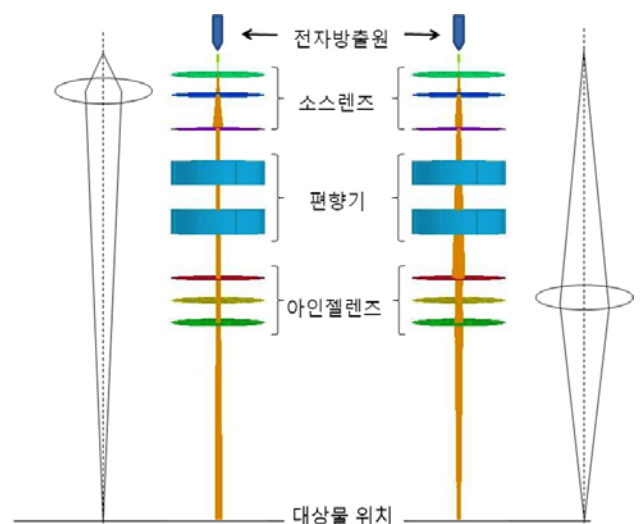


그림 1. 초소형 전자칼럼의 구조 (a) 소스렌즈로 전자빔을 집속할 경우, (b) 아인젤 렌즈로 전자빔을 집속할 경우.

[†]E-mail: jwk@hanseo.ac.kr

주사면적(scan field size)의 상관관계를 조사하여 이론적인 계산 값과 비교하였으며 멀티 전자빔 시스템으로 형성할 수 있는 적정조건을 제시하였다.

II. 전자빔 주사면적

전자빔의 제어는 전자 방출 팁의 전압, 소스렌즈 및 집속 렌즈의 제어조건, 편향기의 제어조건을 모두 고려해야 한다. 주어진 조건에서 보다 넓은 주사면적과 선명도를 확보하는 것이 중요하므로 각각의 렌즈에서의 제어조건에 의한 주사 면적을 예측하고 이에 따른 실측 주사면적과 선명도를 조사할 필요가 있다.

그림 2는 전자 방출원으로부터 방출된 전자빔이 소스렌즈를 지난 후 편향기에 의해 편향되는 정도를 나타낸 것이다. 편향기의 폭과 길이가 각각 d , L , 편향기로부터 대상물까지의 거리가 D , 편향기에 인가되는 전압을 V_{def} , 전자방출 팁의 전압을 V_{tip} 이라 하면, 전자방출 팁에서 나오는 전자의 진행 방향 속도 v 는 전자의 질량을 m_e 라 할 때

$$v = \sqrt{\frac{2eV_{tip}}{m_e}} \quad (1)$$

이며, 전자빔이 편향기를 지나는 동안 진행방향에 대해 수직인 방향으로의 가속도 a 는

$$a = \frac{eE}{m_e} = \frac{eV_{def}}{m_e d} \quad (2)$$

가 된다. L 을 통과하는 동안 전자빔은 진행방향의 수직으로 가속도 a 로 가속도 운동, 편향기를 벗어난 후 D 를 지나는 동안에는 속도 v 로 등속운동하므로 전자빔의 주사 폭 y 는

$$y = \frac{LV_{def}}{2dV_{tip}} \left(\frac{L}{2} + D \right) \quad (3)$$

와 같이 주어진다. 즉, 팁전압 V_{tip} 과 편향기 폭 d 에는 반비례하지만 편향기의 인가 전압 V_{def} 와 편향기의 길이 L 및 대상

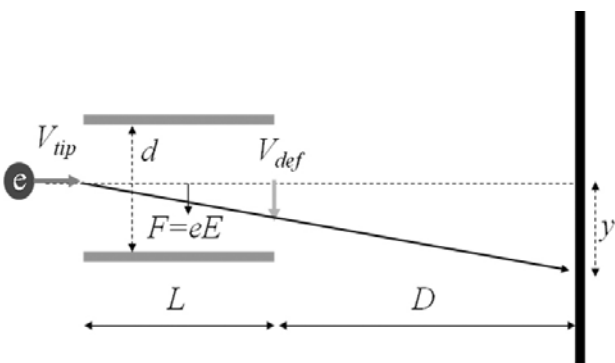


그림 2. 초소형 전자칼럼의 편향기에 의한 전자빔의 굴절 주사 폭.

물까지의 거리 D 에는 비례하는 것을 알 수 있다.

그림 3은 전자빔이 편향기를 통과한 후 대상물에 주사될 때 주사 폭 y 를 전자방출 팁의 인가전압의 변화에 대해 나타낸 것이다. 이론적인 계산 값은 식 (3)을 이용하여 계산한 것으로 편향기의 폭과 길이는 각각 $2000 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$ 이고, 전자빔이 편향기를 벗어난 후 대상물까지의 거리는 $8650 \mu\text{m}$ 이며, 편향기에 인가된 스캔 전압은 100V 이었다.

실험 결과는 소스렌즈를 이용하여 전자빔을 집속하였을 경우와 전자빔이 편향기를 통과한 후 아인젤 렌즈에 의해 집속되었을 경우를 나타낸 것이다. 이론적인 계산결과와 비교하였을 때 소스렌즈에서 전자빔을 집속한 실험결과는 이론적인 계산결과보다 주사 폭이 크게 측정되었으며, 아인젤 렌즈에서 전자빔을 집속하였을 때는 이론적인 계산결과보다 주사 폭이 적게 측정되었다. 이것은 전자빔을 집속하는 소스렌즈가 전자빔을 주사해주는 편향기보다 전자 방출원에 가깝기 때문이다. 즉, 소스렌즈에서 집속된 전자빔은 편향기를 지나면서 대상물에 주사되기 때문에 편향기와 대상물 사이에 있는 아인젤 렌즈가 개구(aperture stop)의 역할을 하게 되므로 실제로 대상물에 주사되어 얻은 전류영상의 크기는 이론적인 계산 결과보다 작다. 반면 아인젤 렌즈를 이용하여 전자빔을 집속할 경우 편향기에서 주사해준 전자빔이 아인젤 렌즈를 지날 때 아인젤 렌즈 자신이 전자빔의 폭을 결정하는 입사동(entrance pupil)의 역할을 하게 된다. 그러므로 소스렌즈로 전자빔을 집속할 경우는 대상물의 전류영상의 최대크기가 아인젤 렌즈의 크기로 제한되지만 아인젤 렌즈로 전자빔을 집속할 경우는 입사동의 역할을 하는 아인젤 렌즈를 통과한 전자빔을 집속하게 되므로 전류영상의 크기는 아인젤 렌즈의 크기보다 작게 된다. 그림 3은 소스렌즈로 전자빔을 집속할 경우 아인젤 렌즈에 의해 제한된 전류영상의 크기를 고려하지 않은 주사 크기를 나타낸 것으로 전자 방출원의 전압에 상관없이 아인젤 렌즈로 집속할 경우와 실험값보다 모두 크게 나타났다.

그림 4는 마이크로 칼럼을 그림 1(a)와 같이 소스렌즈로

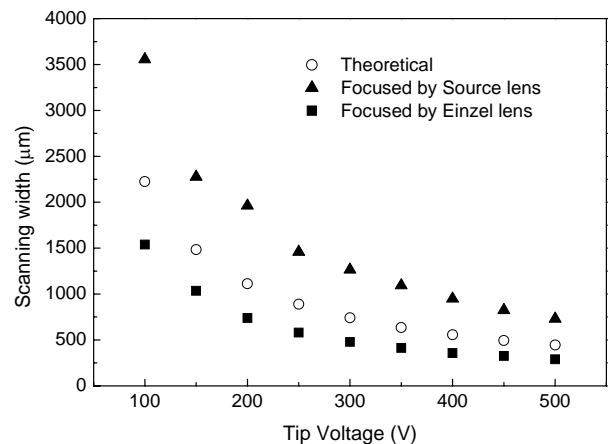


그림 3. 단일 편향기를 사용하였을 때 전자 방출원 인가전압에 따른 전자빔의 주사 폭.

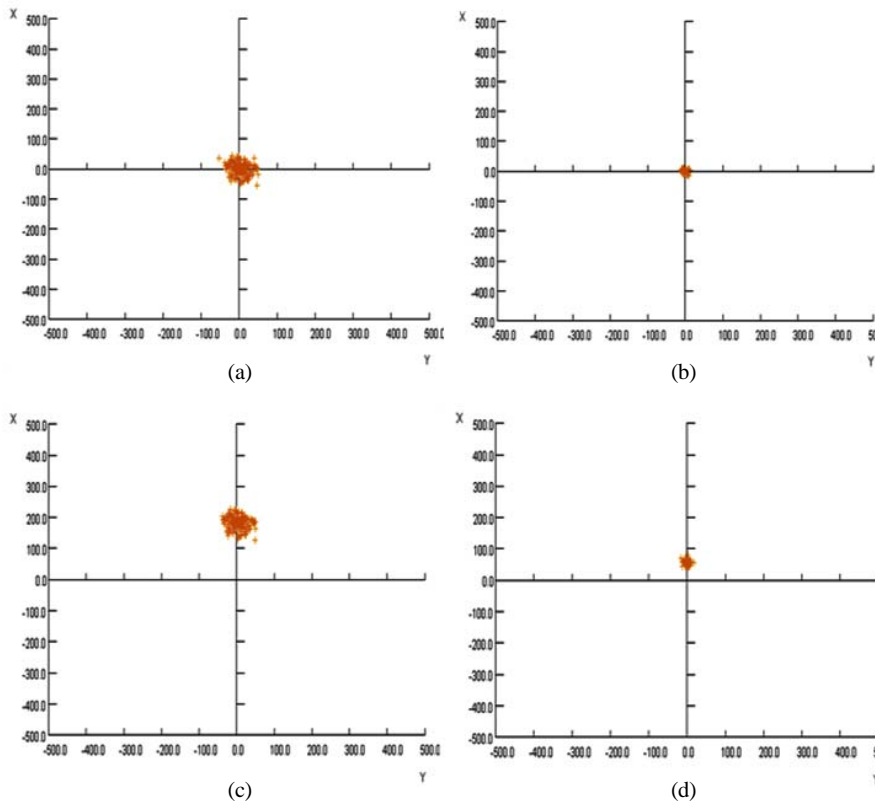


그림 4. 3D 전산시뮬레이션으로 계산된 초점 평면에서의 편향전자빔의 단면 (a) 소스렌즈로 집속($V_{def} = 0V$), (b) 아인젤 렌즈로 집속 ($V_{def} = 0V$), (c) 소스렌즈로 집속 ($V_{def} = 10V$), (d) 아인젤 렌즈로 집속 ($V_{def} = 10V$).

전자빔을 집속할 경우와 그림 1(b)와 같이 아인젤 렌즈를 이용하여 집속할 경우에 대해 모델링하여 3-D 전산 시뮬레이션으로 얻은 초점 평면에서의 전자빔 단면으로 전자빔의 진행방향을 z축으로 하고 xy평면 상에서 본 것이다. 그림 4의 (a)와 4(c)는 소스 렌즈로 전자빔을 집속하여 얻은 것이고 (b)와 (d)는 아인젤 렌즈로 전자빔을 집속하여 얻은 결과로 모두 전자 방출원으로부터 같은 거리에 대상물을 두고 각각의 렌즈로 초점을 조절하였을 때의 결과를 나타낸 것으로 전자빔의 집속을 위하여 소스렌즈에는 -267 V, 아인젤 렌즈에는 357 V가 인가되었다. 그림 4(a)와 4(b)는 편향기의 전압을 인가하지 않았을 때이며, 그림 4(c)와 그림 4(d)는 편향기에 전압을 10V 인가하였을 때이다. 소스렌즈로 집속하였을 경우가 아인젤 렌즈로 전자빔을 집속하였을 경우보다 초점 평면에서 전자빔 허리의 크기가 크며, 편향기에 의해 편향된 정도도 크게 나타났다.

이것은 소스렌즈가 아인젤 렌즈보다 대상물로부터 먼 곳에 있기 위치하여 working distance(렌즈 끝에서 샘플까지의 거리)가 크기 때문에 전자빔 허리 크기는 초점거리에 비례하기 때문이다. 또한 전자빔 단면이 완전한 원형이 되지 못하고 찌그러진 모양을 하고 있는데, 이것은 편향기에 의해 전자빔이 편향될 때 전자빔의 일부가 각 전극에 의해 차단되기 때문이다.

III. 전자방출 전압에 따른 주사면적과 선명도

전자빔의 주사면적은 전자방출 팁의 인가전압, 편향기의 인가전압 및 공간적인 변수에 의해서 결정된다. 그림 5와 그림 6은 그림 3에 나타낸 것과 같이 전자빔을 대상물에 집속하기 위해 전자 방출원과 편향기의 사이에 있는 소스렌즈를 사용할 경우와 대상물의 바로 앞에 있는 아인젤 렌즈를 사용할 경우 얻을 수 있는 전류영상의 차이에 대하여 조사한 결과를 나타낸 것이다.

그림 5는 전자빔을 대상물인 구리격자에 집속하기 위해 소스렌즈를 사용할 경우 얻은 전류영상으로 전자방출원의 팁 전압을 변화시키며 측정된 것이다. 전자빔을 주사하기 위한 두 개의 편향기 중 대상물에 가까운 편향기만을 사용하였으며, 소스렌즈에 인가된 전류는 0.5 μA 로 고정하였다. (3)식에서 알 수 있는 바와 같이 전자방출 팁 전압 V_{tip} 의 증가에 따라 주사 폭은 감소하였으며, 전류 영상은 선명해졌다. 같은 조건에서 전자방출 팁의 전압 변화에 의한 변화를 비교하기 위하여 편향기의 V_{def} 전압은 100 V로 일정하게 하였다. 그림 5에서 대상물의 전류영상이 둥글게 나타난 것은 전자빔이 소스렌즈에서 집속된 후 편향기를 지나면서 직경이 200 μm 인 아인젤 렌즈의 개구에 의해 제한되었기 때문이다. 계산결과 아인젤 렌즈에 의해 제한된 전자빔의 주사 폭은 656 μm 로 소스렌즈에 인가된 전압이 -500 V일 경우의 주사

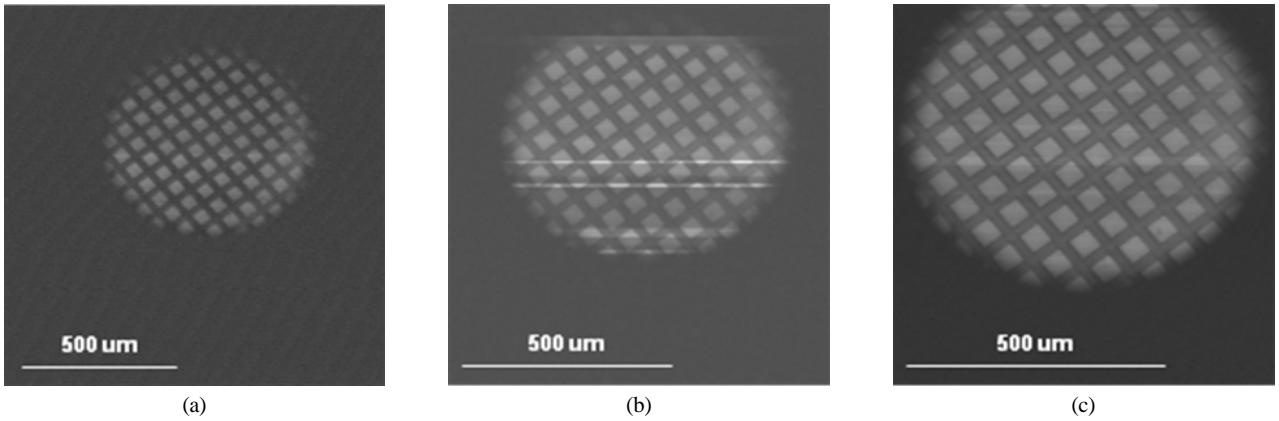


그림 5. 소스렌즈로 전자빔을 집속하였을 때 전자방출원의 전압 변화에 따른 전류영상. 소스렌즈의 전압이 (a) -300V, (b) -400V, (c) -500V일 때.

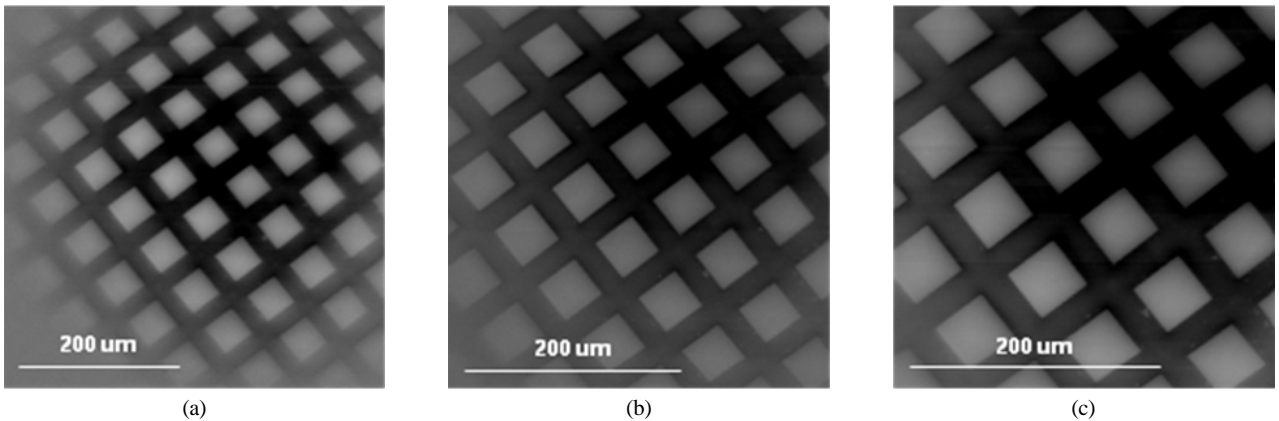


그림 6. 아인젤 렌즈로 전자빔을 집속하였을 때 전자방출원의 전압 변화에 따른 전류영상. 아인젤 렌즈의 전압이 (a) -300V, (b) -400V, (c) -500V일 때.

폭과 거의 일치하였다.

그림 6은 전자빔을 구리격자 대상물에 집속하기 위해 소스 렌즈 대신 아인젤 렌즈를 사용하였을 경우의 전류영상이다. 그림 5의 결과와 비교를 위하여 전자빔의 주사를 위한 편향기는 대상물에 가까운 것만을 사용하였으며, 전자방출 팁 전압을 -300~500 V로 변화시켜가며 얻은 전류영상이다. 그림 5와의 비교에서 전류영상이 더욱 선명한 것을 알 수 있는데 이것은 대상물로부터의 거리가 가까운 아인젤 렌즈를 사용하여 집속할 경우 초점거리가 짧기 때문이다. 전자방출 팁 전압이 -500 V일 경우 대상물에 전자빔을 집속하기 위해 아인젤 렌즈에 인가되는 전압은 599 V로 같은 조건에서 전자빔을 집속하기 위해 소스렌즈에 인가되었던 -430 V보다 컸다. 즉, 전자빔을 대상물에 집속할 때 전자빔을 집속하기 위한 초점거리가 소스렌즈를 사용할 경우가 아인젤 렌즈를 사용할 경우보다 크므로 아인젤 렌즈를 사용하여 전자빔을 집속할 경우의 인가전압이 소스렌즈를 사용하여 집속할 때 렌즈에 인가한 전압보다 크게 되는 것이다. 전자빔의 주사 반경 r , 초점거리 f 와 빔 허리 ω 사이에는

$$\omega = \frac{f}{2r} \tag{5}$$

의 관계가 있으므로 집속되는 전자빔 크기가 더욱 작아지게 되어 전류밀도는 증가하게 된다. 또한 식 (3)에서와 같이 전자방출 팁 전압 V_{tip} 이 증가함에 따라 편향기에 의해 편향되는 정도가 감소하므로 주사면적은 감소하지만 대상물에 주사되는 전자빔의 밀도는 증가하게 된다. 이와 같은 이유로 아인젤 렌즈를 사용하여 전자빔을 집속할 경우 집속된 전자빔의 밀도는 소스렌즈를 사용하여 집속할 경우보다 크게 된다. 그 결과 소스렌즈를 사용할 경우보다 아인젤 렌즈를 사용할 전류영상의 선명도가 크게 된다.

소스렌즈로 전자빔을 집속할 경우 아인젤 렌즈는 단순히 주사 대상물을 향하는 전자빔의 일부를 제한하는 개구(aperture)의 역할을 하게 되지만, 아인젤 렌즈로 전자빔을 집속할 경우 아인젤 렌즈는 입사하는 전자빔의 일부를 사전에 제한하는 입사동의 역할을 하게 된다. 즉, 소스렌즈보다 대상물에 가까이 위치한 아인젤 렌즈로 전자빔을 집속할 경우의 개구각(angle of aperture)은 소스렌즈로 전자빔을 집속할 경우보

다 작아지므로 초점심도(depth of focus)가 깊어지게 된다. 그러므로 아인젤 렌즈를 이용하여 전자빔을 집속할 경우 전류영상의 선명도가 소스렌즈를 사용할 경우보다 크게 나타난다.

IV. 결 론

초소형 전자빔을 이용하여 선명도가 큰 전류영상을 얻기 위한 주사조건을 조사하였다. 편향기를 이용한 주사면적의 계산결과를 실험결과와 비교하였으며 이에 대한 분석을 하였다. 소스렌즈로 전자빔을 집속하였을 경우의 실험결과가 이론적인 계산결과보다 크게 측정되었으며, 아인젤 렌즈를 이용하여 전자빔을 집속하였을 경우는 이론적인 계산결과보다 주사 폭이 적게 측정되었다. 또한 선명도는 전자빔의 집속을 위해 아인젤 렌즈를 사용하였을 때가 소스렌즈를 사용하였을 때보다 크게 측정되었는데 이것은 주사 면적 감소 때문에 전류밀도가 증가한 결과로 사료된다. 균일한 전자빔의 형성 및 선명도가 유지된 적정 주사면적의 확보는 전사 리소그래피(projection lithography) 등의 응용을 가능하도록 하므로 이에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] T. H. P. Chang, D. P. Kern, and L. P. Muray, *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. B10, pp. 2743-2748, 1992.
- [2] 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, *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. B14, pp. 3792-3796, 1996.
- [3] S. Kleindiek, H. S. Kim, E. Kratschmer, and T. H. P. Chang, *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. B13, pp. 2653-2356, 1995.
- [4] E. Kratschmer, H. S. Kim, M. G. R. Thomson, K. Y. Lee, S. A. Rishton, M. L. Yu, and T. H. P. Chang, *J. Vac. Sci. & Technol.*, B13, pp. 2498-2507, 1995.
- [5] 박종선, 장원권, 김호섭, “마이크로 전자렌즈의 광학적 정렬과 조립”, *한국광학회지*, vol. 17, pp. 216-220, 2006.
- [6] 박성순, 김호섭, 장원권, “초소형 전자칼럼의 시야각 및 분해능 적정조건”, *전기전자재료학회논문지*, vol. 20, pp. 481-486, 2007.

Characteristic Studies for Scan-Field Size and Visibility of Current Image in a Low Voltage Micro-Column

Ichimura Noriyuki, Young Chul Kim, and Ho Seob Kim

Department of Physics and Advanced Materials Science, CNST, Sunmoon University, 100 Galsan-ri, Tangjung-myun, Asan, Chungnam 336-708, Korea

Won Kweon Jang[†]

Department of Applied Physics, Hanseo University, 360 Daegok-ri, Haemi-myun, Seosan, Chungnam 356-706, Korea

[†]*E-mail: jwk@hanseo.ac.kr*

(Received July 28, 2008; Revised manuscript August 29, 2008; Accepted August 29, 2008)

The optimal condition for focusing an electron beam was investigated employing an electrostatic deflector in a low voltage micro-column. At fixed voltage of the electron emission tip, the focusing electron beam with source lens showed a larger scan field size and poorer visibility than those with an Einzel lens. Theoretical 3-D simulation indicated that a focusing electron beam with a source lens should have a larger spot size and deflection than those of a focusing Einzel lens.

OCIS codes: (110.0180) Microscopy; (110.3960) Microlithography; (230.3990) Microstructure devices.