

초소형 전자 칼럼 설계를 위한 전자 방출원 연구

김영철[†] · 김대욱 · 안승준 · 김호섭

선문대학교 신소재과학과, 차세대반도체기술연구소

Ⓣ 330-150 충남 아산시 탕정면 갈산리 100

장원권

한서대학교, 컴퓨터응용물리학과

Ⓣ 356-706 충남 서산시 해미면 대곡리 360

(2002년 5월 23일 받음, 2002년 6월 26일 수정본 받음)

저전압(~1 kV)에서 구동되어 수 nA의 전류를 얻을 수 있는 초소형 전자 칼럼(microcolumn) 설계를 위한 프로브(probe) 빔의 직경이 최소가 되는 전자 광학계의 조건을 조사하였다. 프로브 빔의 최소 직경은 전자 방출원의 특성에 의존하는데, 동일 조건의 광학계에 대하여 thermal field emitter(TFE)인 경우 ~20 nm인 반면 cold field emitter(CFE)인 경우 ~10 nm인 것으로 조사되었다.

주제어 : micro column, electron beam, electron emitter.

I. 서 론

현재 레이저는 많은 분야의 광원으로 사용되고 있다. 광원에 따른 분해능은 광원의 파장에 비례하기 때문에 분해능을 향상시키기 위하여 짧은 파장의 레이저가 연구되어왔다. 특히, 노광장비 분야에서 분해능은 가장 중요한 변수로서, 분해능을 향상시키기 위하여 고압 수은등(i-line; 365 nm), 엑시머 레이저, 그리고 불소 다이머 레이저를 이용하기에 이르렀다. 이들 광원의 분해능 한계를 극복하기 위하여 차세대 노광원으로 x-ray, EUV(Extreme Ultra-Violet), 그리고 전자빔이 주목받고 있다.

전자빔 노광 장비는 높은 분해능을 가지며, 일반적으로 광학 노광 장비에서 사용되는 빛을 대신하여 전자빔을 사용하여 마스크 없이 직접 실리콘에 노광하는 방식이다. 하지만 단일 전자빔을 사용한 노광 기술은 생산성이 매우 낮아 크게 주목받지 못하였으나, 최근 멀티빔 개념의 전자빔 기술이 연구됨으로써 전자빔 기술이 새롭게 주목받기에 이르렀다.

본 연구에서는 초소형 전자 칼럼을 설계하기 위하여 전자 방출원의 특성과 semiconvergent angle에 따른 프로브 빔의 최소 조건을 조사하였다. 기존의 전자 칼럼은 그 크기가 1 m 정도인데 반해 최근 연구되고 있는 초소형 전자 칼럼은 3~5 mm정도로 저전압에서 큰 전류를 얻을 수 있도록 설계되었으며, 구조가 간단하여 전자 광학 수차를 최소화 할 수 있어 성능을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 크기가 작아 멀티 칼럼을 형성할 수 있어 생산성을 획기적으로 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

II. 초소형 칼럼 구조

초소형 전자 칼럼은 전자 방출원, 빔 구경조리개(aperture), 렌즈 부분으로 나눌 수 있다. 전자 방출원의 재료는 주로 텅스텐이 이용되며 안정된 전자빔을 얻기 위하여 끝이 뾰족한 것보다는 반경이 수 십 nm인 팁(tip)이 이용된다. 또한 안정된 전자빔을 얻을 뿐만 아니라 팁의 수명을 길게 하기에 위하여 원통형의 길쭉한 모양의 팁을 이용한다.^[1,2]

그림 1(a)는 초소형 전자 칼럼의 구조를 보여 주고, 그림 1(b)는 초소형 전자 칼럼의 광학적 도식을 보여 준다. 그림 1에서와 같이 팁에서 방출된 전자빔의 세기는 가우스 분포를 보이고 semiconvergent angle α_0 로 퍼지는데, 프로브 빔의 직경을 줄이고 빔을 잘 제어할 수 있도록 구경조리개를 이용하여 semiconvergent angle α_0 안에 포함된 전자만 통과시킨다. α_0 를 실효 semiconvergent angle이라 하는데, 이는 구경조리개를 통과한 빛은 대부분 시료에 도달하기 때문이다. 구경조리개를 통과하는 전류는 팁에서 방출된 전류의 1/10000 정도인데, 이것은 구경조리개의 반경이 대략 수 nm로 매우 작기 때문이다. 구경조리개에 의하여 걸러진 전자들은 좁은 공간의 전자 칼럼을 통과하면서 전자들끼리 충돌이 발생하는데 이로 말미암아 에너지 broadening이 발생하게 된다.

구경조리개를 통과한 전자들은 편향판을 지나게 되고 이곳에서 편향 수차가 생긴다. 편향 수차는 다른 수차들에 비하여 비교적 작기 때문에 종종 계산에서 제외되곤 한다. 전자들은 마지막으로 아인즐(einzel) 렌즈를 통과하게 된다. 아인즐 렌즈는 광학에서 빛을 모아주는 볼록렌즈 역할을 하게 된다. 따라서 렌즈를 통과한 전자빔은 semiconvergent angle, α_1 의 범위 내에서 샘플에 도달한다. 렌즈에서 전자빔을 모으는 과정에서 광학에서와 마찬가지로 색수차와 구면 수차가 발생되고,

[†]E-mail: yckim@sunmoon.ac.kr

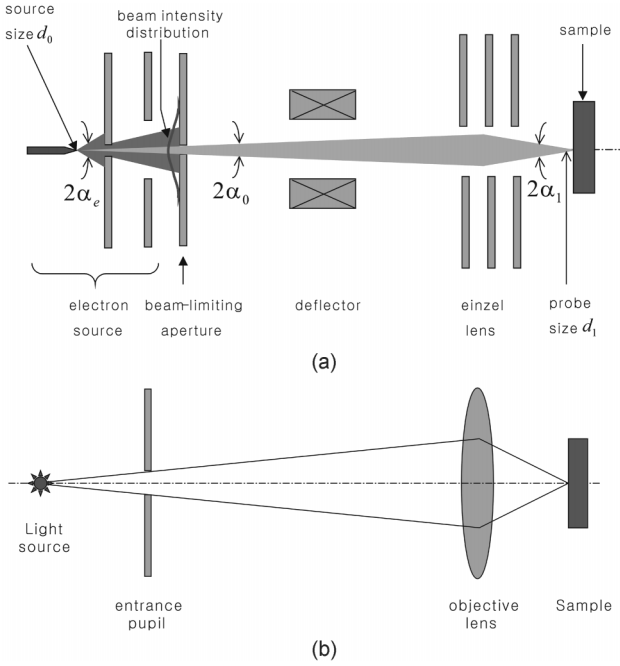


그림 1. (a) 초소형 전자 칼럼 구조. (b) 초소형 전자 칼럼의 광학적 도식.

전자 렌즈들의 배열이 나란하지 않는 데서 오는 코마(coma)를 갖는다.

따라서 초소형 칼럼을 설계함에 있어서 색수차를 최소화하고, 렌즈에 의한 각 수축에 따른 프로브 빔의 직경을 최소화 하는 것이 큰 관건이다. 본 논문에서는 색수차는 이미 발표된 논문^[3-5]의 데이터를 이용하여 semiconvergent angle에 따른 프로브 빔의 최적 조건을 조사하였다.

III. 전자 광학

전자빔을 이용하여 정밀한 공정을 수행하기 위하여 프로브 빔의 직경을 최대한 줄여야 한다. 그러나 여러 가지 요인에 의하여 프로브 빔의 직경을 줄이는 데는 한계가 있다. 가장 큰 요인으로 수차를 들 수 있고, 그 밖에 전자들 간에 충돌, 편향판에 의한 편향, 그리고 회절 등이 있다. 수차에는 색수차, 구면 수차, 그리고 코마(coma)가 있다. 색수차와 구면 수차는 렌즈에서 발생하며 프로브 빔의 특성을 개선하기 위하여 해결해야 할 가장 큰 문제 중의 하나이다.

전자빔의 전자들은 안정화된 조건에서 방출되었다 하더라도 전자 에너지 값의 미세한 변화로 인하여 색수차가 발생된다. 색수차에 의하여 전자빔의 직경이 커지는데, 이는 $d_c = C_c \alpha_1 \Delta V/V$ 로 표현된다. 여기서 C_c 는 색수차 계수이고 섭동(perturbation)이론을 이용하여 계산된다.^[6] ΔV 는 전자들의 에너지 broadening, ΔV 로 초소형 칼럼에 구동 전압 1 kV에서 ΔV 는 대략 1 V이내이다. α_1 은 샘플에서 semiconvergent angle이다. 이는 구경조리개에서의 semiconvergent angle α_0 와 $\alpha_0 = M\alpha_1$ 관계에 있다. 여기서 M 은 칼럼 배율로 1보다 작은 값이다. 구면수차에 의한 빔의 직경은 $d_s = 0.25C_s \alpha_1^3$ 으로 표현되

고, C_s 는 구면수차 계수이다.^[7] 이 밖에 전자빔의 직경을 결정하는 요소로 방출원의 전자 방출 영역 크기 d_0 에 의한 빔 직경은 Md_0 이고 회절에 의한 빔의 크기 $d_d = 1.5/\alpha_1 \sqrt{V}$ 이다.

위에서 언급한 여러 요소에 의하여 결정되는 빔의 직경은 결함 함수(defect function)로부터 얻을 수 있다. 결함 함수는 양의 함수로 정의되고 시스템의 매개변수에 따라 최소화되어야 한다. 결함 함수 ψ 는 여러 요소들에 의해 결정된 빔의 직경의 제곱이다. 이 결함 함수 ψ 빔의 직경을 결정하는 m 개의 요소들이 있을 때

$$\psi = \sum_i^m g_i^2 d_i^2 \quad (1)$$

가 된다. 여기서 d_i 는 각 요소들에 결정하는 빔의 직경이고, g_i 는 각 요소들의 무게함수이다. 무게함수 값이 크면 그에 해당하는 요소가 최종 빔의 크기에 큰 영향을 미치는 것을 의미하고 무게함수 값이 작으면 그에 해당하는 요소가 큰 영향을 주지 못하는 것을 의미한다. 무게 함수가 0이면 전혀 영향을 주지 못하는 것을 의미한다. 따라서 위에서 언급한 요소들에 의한 최종 빔의 직경 d_1 은

$$d_1^2 = (Md_0)^2 + d_d^2 + d_s^2 + d_c^2 \quad (2)$$

이다. 위 식을 α_1 의 함수로 풀어쓰면

$$d_1^2 = (Md_0)^2 + \frac{1.5^2}{\alpha_1^2 V} + (0.25C_s \alpha_1^3)^2 + \left(C_c \alpha_1 \frac{\Delta V}{V}\right)^2 \quad (3)$$

이다. 여기에 전자들의 충돌에 의한 전자빔의 직경 d_t 는 전자들의 수, 즉 전류에 비례하고, semiconvergent angle에 반비례한다, 즉 $d_t = 1.6 \times 10^{-6} (I_1/\alpha_1^2)^{2/3}$ 이다. 여기서 I_1 은 구경조리개를 빠져 나오는 총 전류로 전자 팁과 추출 전압(extractor voltage)과 구경조리개에 의해 결정된다. 전자 충돌 효과를 포함하는 최종 전자빔의 직경을 다시 쓰면

$$\begin{aligned} d_1^2 &= (Md_0)^2 + d_d^2 + d_s^2 + d_c^2 + d_t^2 \\ &= (Md_0)^2 + \frac{1.5^2}{\alpha_1^2 V} + (0.25C_s \alpha_1^3)^2 \\ &\quad + \left(C_c \alpha_1 \frac{\Delta V}{V}\right)^2 + (1.6 \times 10^{-6})^2 \left(\frac{I_1}{\alpha_1^2}\right)^{4/3} \end{aligned} \quad (4)$$

그림 2는 주어진 전류에 대하여 식 (4)를 이용하여 semiconvergent angle에 따른 빔 직경을 그린 것이다. semiconvergent angle α_1 이 점점 커짐에 따라 빔 직경은 감소하다 다시 증가하는 경향을 보인다. 이것은 카메라에서 초점을 맞추는 것과 같은 원리이다. 즉, 샘플의 위치가 결정된 상태에서 semiconvergent angle을 증가시키면 점점 빔 직경이 줄어들어 빔의 최소 직경을 갖게 되며 초점이 잘 맞은 것으로 볼 수 있으며, 그 이상으로 semiconvergent angle을 증가시키면 오히려 빔 직경이 증가한다. 빔의 직경을 최소로 하는 semiconvergent angle은 빔의 전류에 대한 함수로서 이를 이용하여 빔의 최소 직경을 구할 수 있다. 그림 2에서 곡선은 식 (3)의 최종 전자빔의 직

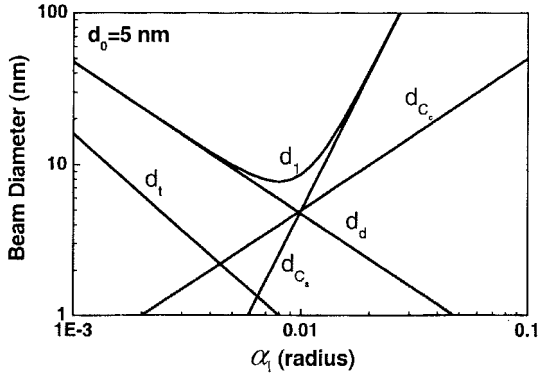


그림 2. semiconvergent angle에 따른 빔 직경.

경이고 직선들은 빔의 직경에 영향을 주는 요소들에 의하여 결정된 빔의 직경이다.

이제 전자빔 직경의 최적 조건에 대하여 알아보자. 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 주어진 전류에 대하여 전자빔의 직경이 최소가 되게 하는 semiconvergent angle α_1 을 구하기 위하여 식 (4)의 d_1 을 α_1 으로 미분하면

$$\frac{d}{dt}d_1 = \frac{-\frac{9}{2V\alpha_1^3} + \frac{3}{8}C_s^2\alpha_1^5 + 2C_c^2\left(-\frac{\Delta V}{V}\right)^2\alpha_1 - \frac{8}{3}(1.6 \times 10^{-6})^2 I_1^{4/3}\alpha_1^{-10/3}}{2\sqrt{(Md_0)^2 + \frac{1.5^2}{\alpha_1^2 V} + (0.25C_s\alpha_1^3)^2 + \left(C_c\alpha_1\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + (1.6 \times 10^{-6})^2\left(\frac{I_1}{\alpha_1^2}\right)^{4/3}}}$$

(5)

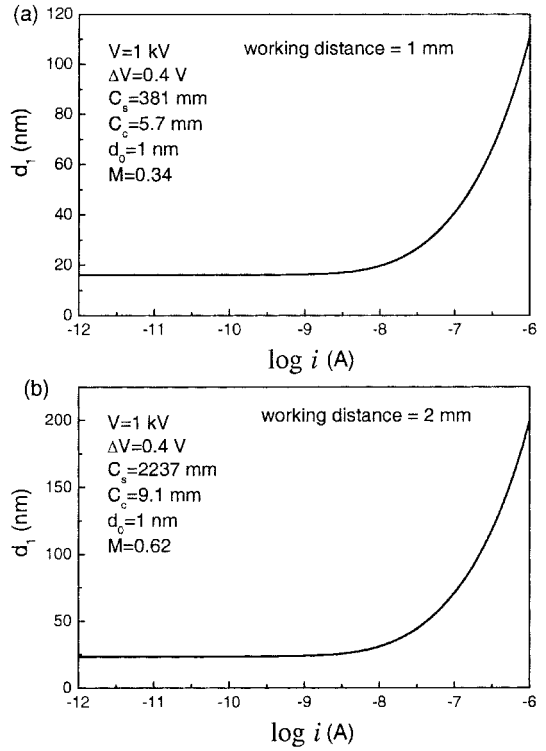


그림 4. TFE인 경우 working distance가 1 mm일 때 (a), working distance가 2 mm일 때 (b) 전류에 따른 전자빔의 최소 직경.

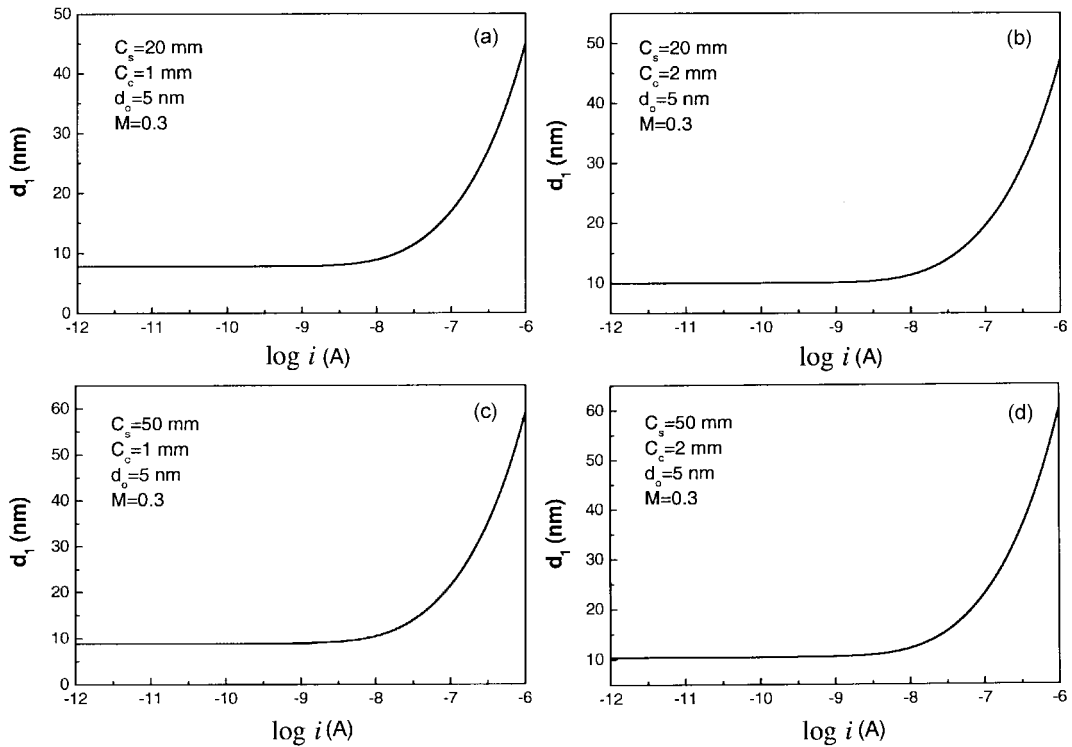


그림 3. CFE인 경우 working distance가 1 mm일 때 전류에 따른 전자빔의 최소 직경. $d_0 = 5 \text{ nm}$ $M = 0.3$ 이고 (a) $C_s = 20 \text{ mm}$, $C_c = 1 \text{ mm}$ (b) $C_s = 20 \text{ mm}$, $C_c = 2 \text{ mm}$ (c) $C_s = 50 \text{ mm}$, $C_c = 1 \text{ mm}$ (d) $C_s = 50 \text{ mm}$, $C_c = 2 \text{ mm}$.

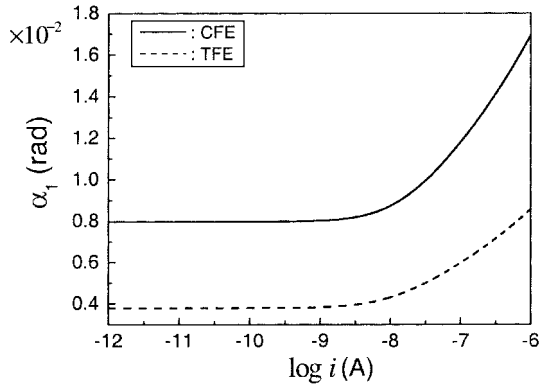


그림 5. 전자빔의 직경이 최소일 때의 전류에 따른 semiconvergent angle α_1 .

이 된다. $\frac{d}{dt} d_1=0$ 을 만족시키는 α_1 을 구하고 이 값을 식 (4) 에 대입하여 계산된 d_1 은 주어진 전류에 대하여 전자빔의 최소 직경이 된다. 이렇게 얻어진 전자빔의 최소 직경은 팁의 종류에 따라 큰 차이를 보인다.

그림 3은 CFE인 경우, 여러 수차 값에 대한 전자빔의 최소 직경을 보여 준다. 그림 3으로부터 전자빔의 직경은 구면수차 계수 C_s 보다 색수차 계수 C_c 에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이것은 $\frac{d}{dt} d_1=0$ 을 만족시키는 α_1 이 10^{-3} 정도이므로 α_1^6 에 비례하는 구면수차는 α_1^2 에 비례하는 색수차 보다 전자빔의 직경에 미치는 영향이 작기 때문이다. CFE인 경우 전자빔의 직경이 최적 조건에서 10 nm 이하(그림 3)인 반면 TFE인 경우 전자빔의 직경이 최적 조건에서 대략 20 nm(그림 4)임을 알 수 있다. 이는 저전압에서 구동하는 경우 전자빔의 세기를 크게 하기 위하여 팁의 온도를 상승 시켰기 때문에 열적 효과가 전자빔의 특성을 떨어뜨리는 것을 의미한다.

d_1 을 최소가 되게 하는 semiconvergent angle α_1 은 그림 5 에서와 같이 주어진 전류에 의존할 뿐만이 아니라 방출원의 종류에도 의존함을 볼 수 있다. 즉 그림 5에서 TFE인 경우 $i \leq 1$ nA 에서 최적 semiconvergent angle 은 $< 0.4 \times 10^{-2}$ radian 인 반면 CFE인 경우 $\approx 0.8 \times 10^{-2}$ radian이다. TFE의 빔직경이 CFE의 빔직경 보다 큰 반면 그에 해당하는 semiconvergent angle 은 CFE 경우 더 큰 값을 갖는다. 왜냐하면 주어진 working distance에 대하여 TFE의 최소 빔직경이 CFE의 최소 빔직경 보다 크기 때문에 object lens에서 작은 semiconvergent angle을 갖게 된다.

IV. 결론과 논의

초소형 칼럼의 전자빔의 최소 직경 조건을 조사하였다. 두

가지 전자빔 방출원 CFE와 TFE의 전자빔 최소 직경은 각각 ~ 10 nm와 ~ 20 nm이다. 또한 빔의 직경은 1 nA이하의 전류에서 안정된 값을 갖는다. 전류의 세기가 더 커지면 전자빔의 직경은 점차 증가하였다. 따라서 전자빔의 직경을 최소화하기 위하여 전류를 1 nA 이하로 유지하여야 한다. 이 값은 샘플에서의 전류이기 때문에 전자 방출원에서의 총 전류 값은 대략 10000배 정도이므로 샘플에서 1 nA의 전류를 유지하는 것은 어렵지 않다. 따라서 전자빔의 최적 조건을 얻기 위하여 수차를 최소로 할 수 있는 전자 칼럼을 설계해야 한다. 이를 위하여 전자 칼럼 구조에 따른 수차에 대한 연구가 진행될 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(R01-2000-00035)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] H. S. Kim, M. L. Yu, U. Stauffer, L. P. Muray, D. P. Kern, and T. H. P. Chang, "Oxygen processed field emission tips for microcolumn applications," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 11, no. 6, pp. 2327-2331, 1993.
- [2] M. L. Yu, B. W. Hussey, H. S. Kim, and T. H. P. Chang, "Emission characteristics of ultrasharp cold field emitters," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 12, no. 6, pp. 3431-3435, 1994.
- [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, no. 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, no. 6, pp. 2498-2503, 1995.
- [5] M. G. R. Thomson and T. H. P. Chang, "Lens and deflector design for microcolumns," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 13, no. 6, pp. 2445-2449, 1995.
- [6] P. W. Hawkers and E. Kasper, *Principles of Electron Optics* (ACADEMIC PRESS, San Diego, USA, 1989), Chapter 26, vol. 1.
- [7] P. W. Hawkers and E. Kasper, *Principles of Electron Optics* (ACADEMIC PRESS, San Diego, USA, 1989), Chapter 24, vol. 1.

Studies of electron emitters for a miniaturized electron column design

Youngchul Kim[†], Dae-Wook Kim, Seung Joon Ahn, and Ho Seob Kim

*Dept. of Physics and Advanced Material Science, and Center for Next Generation Semiconductor Technology,
Sunmoon University, ChungNam 336-708, KOREA*

Won Kweon Jang

Dept. of Physics, Hansoo University, ChungNam 356-706, KOREA

[†]E-mail: yckim@sunmoon.ac.kr

(Received May 23, 2002 ; revised manuscript received June 26, 2002)

We examine the adjustment of the semiconvergent angle and current for the miniaturized micro column working at low voltage but producing maximized current. Our study shows that the minimum electron beam sizes are 10 nm for the cold field emitter (CFE) and 20 nm for the thermal field emitter (TFE) at a given condition.

Classification codes : OE.050, SM.020.