

CMP 공정에 의해 제작된 전계 방출기의 최적 설계에 관한 연구

김귀현*, 신양호, 박진석
한양대학교 전기공학과

A study on the optimal design of a field emitter fabricated by CMP process

Kwi Hyun Kim*, Yang Ho Shin, Jin Seok Park
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract - Numerical simulation has been performed on a microtip field emitter structure produced by employing a CMP technology. The field distributions are estimated by using a Maxwell 2D vector simulator and the electron trajectories are obtained by solving the equation of ballistic motion of emitted electrons. The beam width observed at the phosphor has been characterized as a function of the applied voltages and the gate-to-tip distance. It has also been investigated how the electron trajectory is changed by adopting the anode switching as well as the focus electrode.

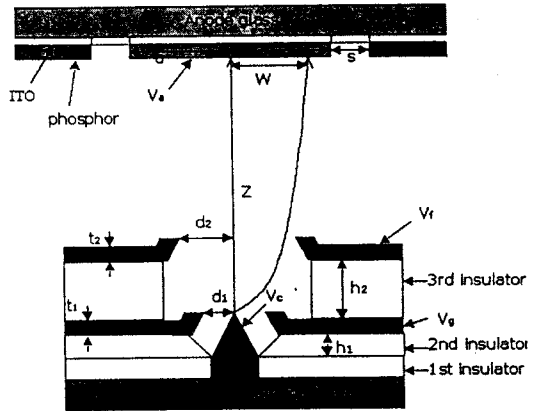


그림1. CMP 공정을 이용하여 제작된 전계 방출기의 구조

노드 스위칭을 한 경우 pixel 사이의 거리, W는 팁으로부터 방출된 전자가 형광체에 도달할 때 중심축으로부터의 최대 퍼짐을 의미한다. 또한, Vc, Va, Vg, Vr는 각각 캐소드(팁), 애노드, 게이트 및 집속전극에 인가되는 전압이다.

1. 서 론

FED(Field Emission Display)는 대부분 Spindt형 미세팁 구조⁽¹⁾로 제작되고 있지만, 최근에 CMP (Chemical-Mechanical-Polishing) 공정을 이용한 연구 결과가 발표되고 있다.⁽²⁾ CMP 공정을 이용하면 선택적 식각비로 인해 팁과 게이트가 자동 정렬되는 장점이 있고, 따라서 팁과 게이트의 거리를 산화층의 두께로서 자유롭게 조절할 수 있으며, 공정이 단순하여 균일성과 재현성을 높일 수 있다. 또한, 게이트와 집속 전극을 만들기 위해 별도의 마스크 공정이 필요 없기 때문에 소자의 생산 단가 절감 및 수율 향상을 꾀할 수 있는 장점이 있다. 이와 더불어 애노드 스위칭 구동방식을 적용하여 전자의 집속을 높여 pixel 간의 cross talk를 줄이면서 고해상도를 얻을 수 있는 FED 소자의 제작에 관한 연구도 진행중이다.⁽³⁾⁽⁴⁾ 그러나, 상기한 연구들은 아직까지 대부분 단편적인 실험 결과들로서, CMP 공정 및 애노드 스위칭 방식을 채택한 FED 소자의 상용화를 위해서는 다양한 소자의 구조 및 구동 방식에 따른 이론적인 분석이 체계적으로 수행되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 CMP 공정을 이용한 전계 방출기 소자의 최적화 설계에 관한 수치 해석적 연구를 수행하였다. CMP 공정을 사용한 전계 방출기 구조에 대하여 게이트 인가 전압, 팁과 게이트 사이의 거리, 집속 전극의 유무 등에 따른 전계 및 전자 궤적을 비교 분석하였으며, 특히 애노드 스위칭에 따른 전자빔의 집속효과를 최적화하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 전계 방출기의 구조

그림1은 수치 해석에 사용된 전계 방출기의 구조를 개념도로 나타낸 것이다. 그림1에서 d1과 d2는 각각 게이트 전극과 집속전극이 팁의 중심축으로부터 떨어진 거리를 나타내고, Z는 팁과 애노드 사이의 거리, S는 애

2.2 수치해석 방법

식(2.1)과 같은 Laplace 방정식의 해를 Maxwell 2D EM vector simulator로 구하여 전계 방출기의 전위 및 전계 분포를 산출하였다.⁽¹⁾⁽⁵⁾

$$\nabla \cdot \nabla V = \nabla^2 V = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial V}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (2.1)$$

수치해석에 사용된 총 mesh는 12000개 정도로 하였고, 특히 팁 주변에는 4000개 이상으로 나누어 전위와 전계 해석의 정확성을 얻고자 하였다. 산출된 전계 벡터 데이터를 자체 개발한 프로그램에 적용하여 전자의 궤적을 수치적으로 구하였다.

팁에서 방출된 전자가 애노드까지 도달하는 공간은 진공이므로 충돌이 없는 ballistic motion으로 간주하고, 공간 전하가 전자의 궤적에 영향을 주지 않는 것으로 가정하였다. 식(2.2)는 전자가 전계(E)와 자계(B) 영향을 받아 변화하는 전자의 가속도(a)에 관한 운동 방정식을 의미한다.

$$\vec{a} = \frac{q_e}{m_e} (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.2)$$

여기서 a, E, v, B는 모두 벡터값이며 본 연구의 경우 B의 영향은 없다. 그리고 가속도와 속도(v)를 계산하기 위하여 4차 Runge-Kutta 적분 알고리즘을 사용하였다.⁽⁶⁾

$$\bar{x}_{i+1} = \bar{x}_i + \frac{\Delta t}{6} (\bar{v}_i + 2\bar{v}_i + 2\bar{v}_i + \bar{v}_i) \quad (2.3)$$

$$\bar{v}_{i+1} = \bar{v}_i + \frac{\Delta t}{6} (\bar{a}_i + 2\bar{a}_i + 2\bar{a}_i + \bar{a}_i) \quad (2.4)$$

여기서 \bar{x}_i 는 전자의 위치이고, \bar{v}_i 는 전자의 위치에너지와 초기 방출시 운동에너지에 의해 결정되며 Δt 는 10^{-14} 초로 하였다.

2.3 모델링 조건

본 모델링에서 사용한 고정 변수는 다음과 같다. 팁의 반경(r)과 높이는 10nm, $1.5\mu\text{m}$ 이고, 게이트 및 집속 전극의 두께(t_1, t_2)와 높이(h_1, h_2)는 각각 $0.35\mu\text{m}$, $1.0\mu\text{m}$ 로 하였고, Z는 $100\mu\text{m}$ 로 고정하였으며 팁(V_g)에는 0V를 인가하였다. 가변 조건으로서, d_1 은 $0.3\mu\text{m}$ 와 $0.5\mu\text{m}$, d_2 는 $1.2\mu\text{m}$ 와 $2.0\mu\text{m}$ 로 변화시켰으며, 게이트, 애노드 및 집속 전극의 인가 전압은 각각 $V_g=40\sim 100\text{V}$, $V_a=400\sim 800\text{V}$ 및 $V_f=-10\sim 20\text{V}$ 로 변화시켰다.

3. 결과 및 검토

3.1 전계 및 전자 궤적

그림2는 미세팁의 구조를 반경 $r=10\text{nm}$ 인 구형으로 간주하고, 팁위의 전자 방출 위치를 $N=0\sim 18$ 로 나타내고, 방출된 전자가 게이트 혹은 집속 전극쪽으로 누설되지 않고 애노드에 도달하는 전자 방출 위치를 미세팁위의 방출각(θ)으로 표현한 것이다.

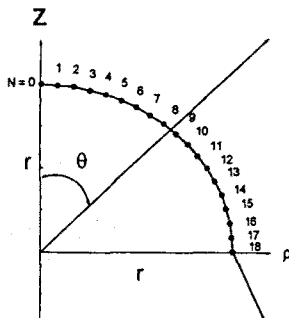
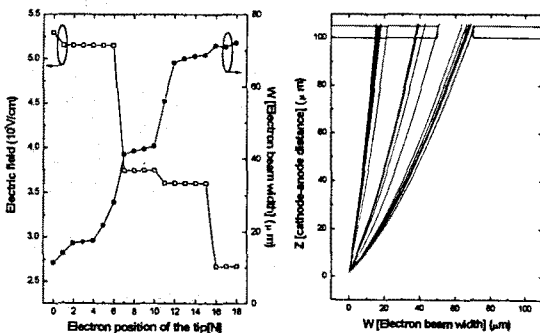


그림2 미세팁위의 전자 방출 위치(N) 및 유효 방출각(θ)

그림3의 (a)는 전자 방출기 위치에 따른 전계 분포 및 그림3의 (b)에 나타낸 바와 같은 전자 궤적의 결과로부터 산출한 전자빔의 퍼짐(W)을 나타낸 것이다. 팁



(a)

(b)

그림3. 전자 방출 위치에 따른 전계 및 전자 궤적의 비교

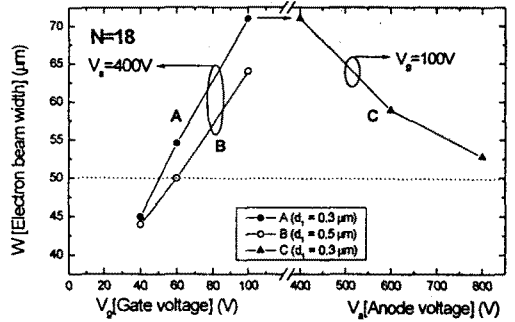


그림4. A, B는 V_g 와 d_1 의 변화, C는 V_a 의 변화에 따른 $N=18$ 번의 궤적

의 중심폭일수록 전계가 강하고 빔의 퍼짐이 적어짐을 볼 수 있다. 그림3의 결과는 집속 전극을 설치하지 않는 경우로서, 방출된 전자의 일부만($N=0\sim 11, \theta=55^\circ$) 형광체에 도달하고 있음을 보여준다.

그림4는 V_g, V_a, d_1 을 변화시키면서 전자 궤적의 퍼짐을 관찰한 것이다. A는 게이트 전압(V_g)이 낮아짐에 따라 빔의 퍼짐(W)이 감소함을 나타내는 것인데 이는 팁에서 V_g 의 감소에 의해 애노드 방향으로의 전계(\bar{E}_z)에 비하여 게이트 방향으로의 전계(\bar{E}_g)의 감소 효과가 상대적으로 더 크기 때문이다.

B의 경우는 d_1 을 $0.5\mu\text{m}$ 로 증가시킨 경우인데, 게이트로부터 멀어짐에 따라 \bar{E}_z 의 변화에 비하여 \bar{E}_g 의 변화가 상대적으로 크고, 또한 게이트 전압의 감소에 대하여도 동일한 효과가 존재하기 때문에 게이트 전압의 변화에 따른 전자빔의 퍼짐이 감소하는 정도가 상대적으로 완만하게 변화한다.

한편 C는 애노드 전압(V_a)을 400V에서 800V까지 증가시킨 경우 전자의 빔 퍼짐이 줄어드는 것을 나타낸 것이다. 이는 애노드의 전압이 커지면서 \bar{E}_z 의 변화는 거의 없으나, 애노드 방향의 전계(\bar{E}_z)가 커져서 방출된 전자의 애노드 방향으로의 가속도를 증가시켰기 때문이다. 그러나, 애노드 전압이 너무 큰 경우에는 전자의 집속 효과는 얻을 수 있지만, 팁의 과열에 의한 수명 단축, 불필요한 아크 방전 및 전력 손실의 증가 등의 문제가 발생할 가능성이 있다.

3.2 집속 전극의 영향

본 연구에서는 집속 전극을 설치하여 전자의 퍼짐을 더욱 줄이고 원하는 형광체를 균일하게 발광시키고자 하였다. 그림5에 나타낸 바와 같이 집속 전극이 있는 경우

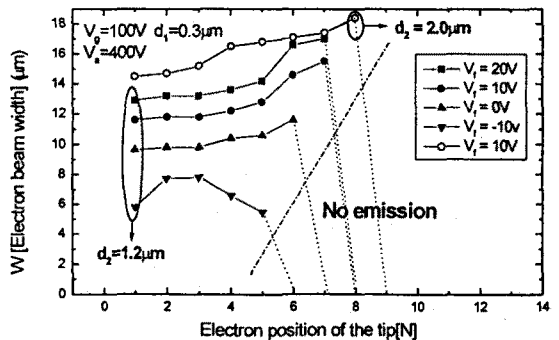


그림5. 집속 전극의 전압에 따른 전자 궤적

빔의 퍼짐이 현격히 감소하며 집속 전극의 인가 전압이 낮을수록 빔의 집속 효과는 커진다. 그러나, 집속 전극의 전압이 낮을수록 집속 전극이나 게이트 전극쪽으로는 누설 성분으로 인한 방출 전류 밀도의 감소가 초래된다. 또한, 동일한 집속 전극($V_f=10V$)에 대하여 d_2 를 $2.0 \mu m$ 로 증가시키면 전자빔의 집속 효과는 감소하나 방출 전류 밀도는 증가시킬 수 있다.

게이트 전압을 크게 증가시켜 전자 방출을 증가시키더라도 이로 인해 퍼지는 전자를 집속하기 위해서는 집속 전극의 전압을 크게 낮추어야 한다. 따라서, 제한된 pixel 크기의 범위 내에서 이상적인 전계 방출기를 구현하기 위해서는 집속 전극의 구경(d_2)과 전압(V_f) 그리고 게이트 전압(V_g)사이의 상관관계를 충분히 고려하여 각 변수에 따른 집속 효과와 전류 밀도의 변화가 최적화된 조건이 도출되어야 한다.

3.3 에노드 스위칭 효과

고화질 전계 방출기를 구현하기 위해 형광체의 크기 (a_1)가 $50 \mu m$ 이상이 되어야⁽³⁾ 하고, 동시에 pixel간의 cross talk가 적어야 하기 때문에 집속 전극 및 에노드 스위칭이 필요하게 된다. 본 연구에서는 $30 \mu m$ 의 크기로 형광체를 제한하였고, 게이트 전압 및 에노드 스위칭에 따른 전자 궤적의 변화를 산출하였다. 표1의 (a)는 에노드 스위칭을 하지 않은 경우이고 ($V_{a1}=V_{a2}=400V$), (b)는 에노드 스위칭을 한 경우($V_{a1}=400, V_{a2}=$$

표1. 에노드 스위칭에 따른 전자 궤적 결과

	d_2 (μm)	V_g (V)	V_f (V)	s (μm)	V_{a1} (V)	V_{a2} (V)	W (μm)	θ (N)
(a)	1.2	100	10	20	400	400	15.3	15° (0-2)
(b)	1.2	100	10	20	400	0	12.2	10° (0-1)
(c)	1.2	30	10	20	400	0	10.4	30° (0-5)

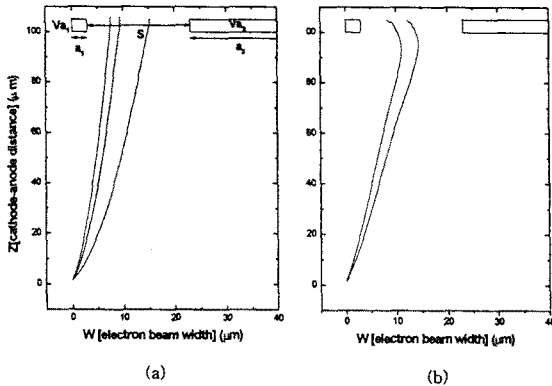


그림6. 집속 전극이 설치된 경우 에노드 스위칭에 따른 전자의 궤적 변화

0V)이며, (c)는 에노드 스위칭을 하면서 게이트 전압을 변화시킨 경우이다. 이러한 조건들에 따른 전자 궤적의 변화를 각각 그림5의 (a), (b) 및 (c)에 나타내었다.

게이트 전압이 100V인 경우 에노드 스위칭에 의해 전자빔의 집속 효과가 나타나고 있으나 방출각의 감소가 동시에 존재한다. 이 경우 게이트 전압을 낮추면 집속 효과와 방출각의 증가를 동시에 꾀할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

CMP 공정에 의해 제작된 전계 방출기의 수치해석을 통하여 얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 게이트 구동 전압이 낮을수록 방출 전류 밀도는 감소하지만, 전자빔의 집속 효과는 증가하며 이러한 효과는 텡과 게이트 사이의 거리가 짧을수록 더 크게 나타난다.
- (2) 집속 전극의 인가 전압이 낮을수록 전자빔의 집속 효과는 증가하지만 집속 전극과 텡 중심축과의 거리, 인가 전압 등의 최적화는 누설 전류 성분 및 전류 밀도와와 상관관계로부터 결정된다.
- (3) 에노드 스위칭에 의해 전자빔의 집속 효과가 증가하였으며 게이트 인가 전압을 조절하여 유효 방출 면적을 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

현재 에노드 스위칭의 최적화를 위하여 d_1, d_2, V_g 및 V_f 등의 변수에 따른 전자빔의 집속효과 및 전류 밀도의 변화를 분석 중에 있다.

본 논문은 1998년 한양대학교 교내연구비에 의하여 연구되었음.

(참 고 문 헌)

- [1] W. D. Kesling and C. E. Hunt, "Beam focusing for field-emission flat-panel displays", IEEE Trans. Electron Devices, vol.42, No.2, pp.340-347, 1995
- [2] 이진호, 강승열, 송운호, 최성욱, 조경익, "기계-화학적 연마법에 의한 실리콘 및 폴리실리콘 전계 방출 소자 제작", Field Emission Workshop 98, pp.1-5, 1998
- [3] 한정인, "새로운 구조의 FED full color phosphor screen 설계 및 제작", Field Emission Workshop 98, pp.37-42, 1998
- [4] M. Tanaka, Y. Nohara, K. Tamura, Y. Sato, H. Sakurada "Luminance improvement of low-voltage full-color FEDs", SID 98 DIGEST14.3, pp.193-196, 1998
- [5] R. M. Mobley and J. E. Boers, "Computer simulation of micro-triode performance", IEEE Trans. Electron Devices vol.38, No.10, pp.2383-2388, 1991
- [6] 안효영, "Numerical analysis of field emitter", 서울대 박사 학위 논문, p.28-34, 1996