

전자빔을 자체 집속하는 탄소나노튜브 삼전극 전계방출소자의 시뮬레이션

이태동, 류성룡, 변창우, 김영길, 고남제*, 천현태*, 박종원*, 고성우*
금오공과대학교, LG.Philips Displays*

Simulations Of a Self-focusing Carbon Nanotube Triode Field Emission Device

Tae Dong Lee, Seong-Ryong Ryu, Chang Woo Byun, Young Kil Kim, N. J. Ko*, H. T. Chun*, J. W. Park*,
and S. W. Ko*

Kumoh National Institute of Technoloy, LG.Philips Displays*

Abstract

탄소나노튜브(CNT)가 도포된 평면형 에미터와 원형 개구의 게이트 전극을 가지는 삼전극 전계방출 소자의 전계방출 특성을 시뮬레이션하였다. 체계적인 시뮬레이션을 위해 소자 내 전위의 공간적 분포 특징을 결정하는 전계형상인자 γ 를 정의하고, 이 값에 따른 전위분포의 특성과 방출 전자의 궤적을 계산하였다. 계산 결과 $\gamma > 1$ 인 전압조건에서는 에미터의 가운데를 중심으로 강한 전자방출이 발생하고 전자빔이 구조의 축 방향으로 자체 집속됨을 알 수 있었다. 이렇게 되면 에미터와 게이트의 정렬이 전혀 필요하지 않게 되며 또한 별도의 전자집속회로 없이도 에미터와 양극에 있는 형광체가 1:1로 대응하는 획기적인 디스플레이 구조를 가능하게 해 준다. 적정 전압조건에서 CNT의 전계강화인자 β 의 변화에 따른 총 전류를 계산한 결과, $\beta > 3000$ 인 CNT를 사용할 경우 실제 소자로서 구현이 가능함을 확인하였다.

Key Words : 탄소나노튜브, 전계방출, 삼전극 구조, 전계형상인자, 전계강화인자

1. 서 론

탄소나노튜브(CNT)는 1991년 Sumio Iijima에 의해 발견된 이래[1], 그 독특한 물성으로 인해 많은 관심의 대상이 되어왔다. CNT의 끝 부분은 직경이 수 nm 정도인 반구형으로서 극히 뾰족하므로[2] 전자의 전계방출에 매우 유리한 구조이다. 실제로 CNT를 전계방출에 응용하고자 하는 연구들이 많이 이루어져 왔으며[3], 최근에는 디스플레이 장치에 적용하는 연구가 많이 이루어지고 있다. 1998년에는 CNT 전계방출을 이용하는 조명용 광원 개발이 보고되었고[4], 효율적인 삼전극 구조를 찾기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다[5].

삼전극 구조가 효율적으로 동작하려면, 에미터에서 전자의 전계방출이 효율적으로 일어나야 하며, 충분한 양의 방출 전자가 양극의 원하는 위치에 도달할 수 있어야 한다. 그러므로 실제 소자에서 허용되는 제약된 공간 내에 어떤 형상의 전극들을 최적 위치에 배치하는 문제와 함께 최적의 전압인가 조건을 찾는 것이 중요하다.

전계방출은 양자역학적 터널링에 기초한 현상으로서 그 결과 방출되는 전자의 전류밀도는 ϕ 가 에미터 물질의 일함수(work function), F 가 전계의 세기라 할 때, 다음의 Fowler-Nordheim 방정식으로 표현된다[6].

$$I \propto (F^2/\phi) \exp(B\phi^{3/2}/F) \quad (1)$$

식(1)에 의하면 방출전류는 전계의 세기에 거의 지수함수적으로 의존하므로 에미터 전계의 세기에 국소적으로 작은 차이가 있다해도 해당 영역에서 방출되는 전류의 밀도는 크게 다르게 된다. 또한, 방출된 전자가 형광 양극에 도달하기까지 지나가는 궤적의 모양은 전극들 사이의 공간 영역에서의 전계분포에 의해 결정된다. 전계의 공간적 분포는 각 전극의 형상 및 상대적인 크기와 간격 등의 기하학적인 요인과, 각 전극에 인가되는 전압에 의해 결정된다.

본 연구에서는 삼전극 구조에서 전계의 분포를 결정하는 전계형상인자(Field Shape Parameter) ν 를 정의하고, 평면형 CNT 에미터를 가지는 삼전극 구조에서 전계형상인자의 변화에 따른 전자궤적의 변화를 전산 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 아울러 실제 소자로서의 구현 가능성을 확인하기 위한 정량적 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 시뮬레이션

2.1 전계형상인자(Field shape parameter)

삼전극 구조에서 음극 즉, CNT 에미터 면과 게이트 면 사이의 거리를 H , 에미터 면에서 양극까지의 거리를 L 이라 하고, 음극과 게이트, 음극과 양극 사이에 인가되는 전압이 각각 V_g, V_a 일 때 전계형상인자 ν 를 다음과 같이 정의하자.

$$\nu \equiv \frac{E_a}{E_g} = \frac{V_d/L}{V_g/H} \quad (2)$$

이 식에서 $E_a = V_d/L$ 는 음극과 양극만 있을 경우의 평균 전계, $E_g = V_g/L$ 는 음극과 게이트만이 있을 경우의 평균 전계를 나타낸다. 삼극구조에서 전극들의 기하학적인 배치가 주어지면, 구조 내 전위의 공간적 분포 양상은 구체적인 인가전압에 관계없이 이 인자에 의해 결정된다. 그러므로 이 인자는 삼전극 전계방출 소자의 설계와 특성 분석에 매우 중요한 파라미터로 활용될 수 있다.

2.2 시뮬레이션

이 연구에서 분석한 구조는 평면 음극 위에

CNT를 도포한 에미터를 가지는 삼전극 구조이다(그림 1). 게이트는 에미터로부터 $20\mu\text{m}$ 거리에 위치하며 전자가 통과할 수 있도록 중앙에 직경 $150\mu\text{m}$ 의 원형 구멍이 뚫려있다. 양극은 에미터로부터 $500\mu\text{m}$ 떨어진 곳에 위치한다.

시뮬레이션에는 상용 3D 전계분석 소프트웨어인 Opera 3D와 2D 소프트웨어인 Tricomp 프로그램이 이용되었다.

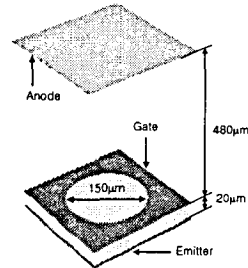


그림 1. 분석에 이용된 삼전극 구조의 개략도.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 평면 에미터 삼전극 구조 내의 전위분포에 ν 인자가 어떤 영향을 주는지를 2D 전계분석 프로그램으로 계산한 결과이다. (a), (b), (c)는 각각 $\nu=0.2, 1.0, 4.0$ 에 대한 경우로서 게이트 구멍 근처의 등전위면들을 그린 것이다. 그림 2(b)는 $\nu=1$ 인 경우로서 전계는 구조 전체 영역에 걸쳐 거의 균일하며 구조의 대칭축과 나란한 방향이다. $\nu < 1$ 인 경우(그림 2(a)) 에미터와 게이트 사이의 공간에서 전계는 게이트 전위의 지배를 받아 강해지며, 등전위면은 양극 쪽을 향하여 부풀어오르는 형상이 된다. 이러한 분포는 방출되는 전자에 축 쪽으로부터 바깥쪽으로 발산하는 방향으로 힘을 가하게 된다. 한편 $\nu > 1$ 인 경우(그림 2(c)), 전계는 양극에 의해 가해지는 전계가 낮은 전위의 게이트 전극에 의해 차폐되어 약화되고, 등전위면은 게이트 쪽을 향해 오목한 형상을 가지게 되어 축 쪽을 향하는 방향으로 힘을 전자에 작용하게 된다. 이와 같은 결과로부터 전계형상인자 ν 가 1보다 작을수록 방출전자의 궤적은 축으로부터 발산되는 경향이 커지고, 1보다 클수록 축을 향하여 집중되는 경향을 가질 것을 예상할 수 있다.

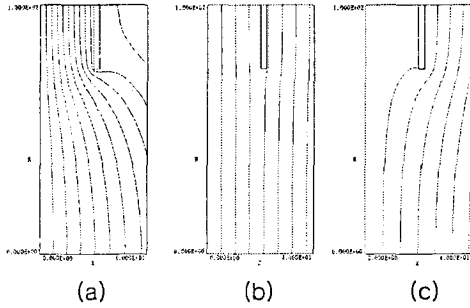


그림 2. 다른 ν 값에 대한 게이트 구멍 근처 전위의 공간적 분포. (a) $\nu=0.2$ (b) $\nu=1.0$ (c) $\nu=4.0$.

그림 3은 에미터에서 방출된 전자가 양극에 도달하기까지 지나는 궤적을 시뮬레이션한 결과로서 (a), (b), (c)는 각각 $\nu=0.2, 1.0, 4.0$ 에 해당한다. 예상과 같이 전자빔은 ν 가 1보다 작을 때는 발산, 1보다 클 때는 집속되는 것을 볼 수 있다.

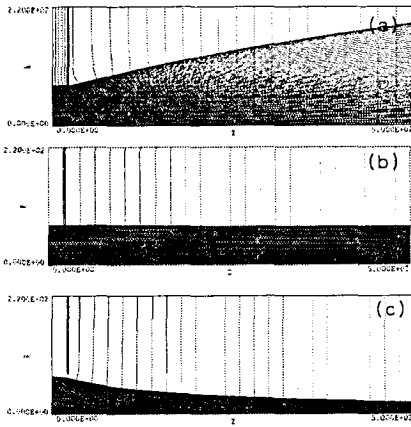


그림 3. ν 값에 따른 방출전자 궤적의 변화 (a) $\nu=0.2$ (b) $\nu=1.0$ (c) $\nu=4.0$

$\nu > 1$ 일 때 다른 제어전극이 없는데도 전자빔이 집속된다는 사실은 전계방출 디스플레이에서 매우 중요한 의미를 가진다. 에미터와 양극의 형광 픽셀을 일대일로 대응시켜 픽셀간 crosstalk 없는 동작이 가능하기 때문이다. 또한 전자 빔 제어

위한 다른 전극이 필요 없고, 에미터에 edge enhancement를 위한 요철을 두지 않으므로 에미터의 제작이 용이하다. 또한 에미터와 게이트의 정렬이 전혀 문제되지 않기 때문에 전체적 제작 원가를 크게 줄일 수 있다. 그러므로 이러한 장점들을 가지는 평면 에미터 구조가 실제로 구현될 가능성이 있는지를 보다 세부적으로 분석하는 것은 매우 중요하다.

위의 계산에서는 게이트 구멍을 통과하는 전자의 궤적을 알아보기 위하여 에미터 구멍 바로 아래쪽 원형 영역의 CNT에서만 전계방출이 일어난다고 가정하였지만, 보다 정량적인 분석을 위하여 에미터 전체 면에서 방출이 가능하도록 하여 시뮬레이션하였다.

$\nu < 1$ 인 전압조건에서는 그림 2(a)의 전위분포에서 알 수 있듯 게이트 구멍 아래에 비하여 게이트에 가려진 CNT 영역에서의 전계가 더 강하다. 전계방출은 게이트에 가려진 영역에서 강하게 일어나고 그 전류는 게이트로 흘러버리기 때문에 이 전압조건 하에서의 동작은 불가능하다. 이와 반대로 $\nu > 1$ 인 경우 가려진 부분보다 열린 부분의 전계가 강하고, 전자도 그 부분에서 주로 방출되므로 손실 없이 양극에 도달할 수 있다. 게이트 구멍 바로 아래 에미터 층에서의 전계의 세기 분포와 방출전자궤적을 계산한 결과인 그림 4를 통하여 이를 확인할 수 있다.

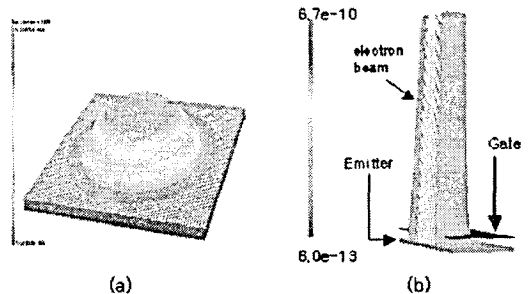


그림 4. $\nu=1.3$ 에서의 시뮬레이션 결과 (a) 에미터 표면에서 전계의 세기 분포 (b) 방출 전자의 궤적.

그림 4(a)는 전계의 세기가 게이트 바로 아래 가운데 부분에서 최대가 되는 부드러운 전계분포를 가짐을 보여준다. 이런 부드러운 전계분포 때문에 평

면 에미터 구조는 또 한 가지 장점을 가진다. 이른바 normal gate 구조[6] 등 sharp edge를 가지는 구조에서 전자들은 전계가 집중되는 edge 영역에서 높은 밀도로 방출되므로 국소적인 burn-out의 가능성이 매우 높다. 이에 반해 평면 에미터 구조는 전자의 방출이 비교적 넓은 영역에서 낮은 밀도로 일어나므로 국소적 burn-out의 가능성이 훨씬 낮고, 소자의 수명도 길어지게 되는 것이다.

그림 4(b)는 방출되는 전자들이 양극을 향하여 상승하면서 축 방향으로 집중됨을 보여준다. 이러한 집중의 경향은 γ 가 커질수록 더 강해진다. 전자 빔 중앙의 밝은 부분이 전자 밀도가 높은 부분으로서 그림 4(a)에서 예상한 바와 일치한다.

남은 문제는 실제 소자에서 허용 가능한 전압에서 충분한 전류를 얻을 수 있는가 하는 문제이다. 이를 알아보기 위하여 CNT의 전계강화인자 β 를 [7] 변화시키면서 총 방출 전류를 시뮬레이션하였다. 양극 전압 500 V, 게이트 전압 15V로서 $\nu=1.3$ 인 경우의 계산 결과를 그림 5에 보였다.

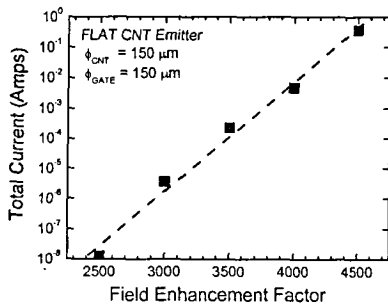


그림 5. 전계강화인자와 총 방출전류와의 관계

방출전류는 β 의 증가에 따라 거의 지수함수적으로 증가하며, $\beta=3,000$ 일 때 약 $3.6 \mu A$ 정도로서, 디스플레이에 요구되는 전류를 충분히 공급할 수 있다. 실제로 CNT의 전계강화인자는 다중벽 CNT가 1,000~3,000, 단일벽 CNT가 2,500~10,000 정도로 알려져 있으므로[6], 수직배향 CNT 등[7] 방출 특성이 좋은 CNT를 사용하면 이 평면 에미터 구조의 구현은 충분히 가능하다고 사료된다.

에미터가 평면이 아닌 구조의 경우 전자빔의 수렴과 집중의 경계가 되는 γ 값이 정확히 1은 아니

지만, 대체로 1보다 작을수록 더 발산, 1보다 클수록 더 집중되는 경향은 평면 에미터 구조와 같다. 이런 구조들의 ν 에 따른 특성 시뮬레이션도 수행 되었으며 그 결과는 곧 발표될 예정이다.

4. 결론

평면 에미터를 가지는 삼전극 구조의 전계분석 시뮬레이션을 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 전계형상인자 γ 가 1보다 작은 경우, 게이트에 의해 가려진 부분에 전계방출이 집중되고, 이 전류는 거의 전부 게이트로 흐르게 되므로 실질적으로 동작이 불가능하다.
2. $\nu < 1$ 인 경우 전계방출은 게이트 구멍 아래에서 일어나고, 방출전자들은 손실없이 게이트 구멍을 통과하며, 양극으로 진행하며 집중된다. 집중은 ν 가 클수록 더 강하게 일어난다.
3. 전계강화인자가 3,000 이상인 CNT를 이용하면 충분한 전류를 공급할 수 있으므로, 별도의 전자집속회로 없이도 crosstalk이 전혀 없는 우수한 FED 소자 구현의 가능성이 높다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 금오공과대학교 전자부품산업고품질화 및 공정자동화연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고 문헌

- [1] S. Iijima, Nature Vol. 354, p. 56, 1991.
- [2] S. Wang and D. Zhou, Chem. Phys Lett., Vol. 225, p. 165, 1994.
- [3] W. A. de Heer, A. Chatelain, and D. Ugarte, Science Vol. 270, p. 1179, 1995.
- [4] S. Uemura, J. Yotani, T. Nagasako, T. Shimojo, and Y. Saito, SID '98, p. 1052, 1998.
- [5] J. M. Kim *et al.*, SID 01 Digest, p. 304, 2001.
- [6] Jean-Marc Bonard *et al.*, Appl. Phys. Lett., Vol. 73, No. 7, p. 918, 1998.
- [7] Z. R. Ren, Z. P. Huang, J. W. Xu, J. H. Wang, P. Bush, and P. N. Provenico, Science, Vol. 282, p. 1105, 1998.