

Free-standing 박막의 전계 방출 특성을 이용한 고에너지 이온 디텍터에 관한 연구

박종후*

위스컨신 주립대 전기공학과

(2011년 10월 19일 받음, 2011년 10월 20일 최종수정본 받음, 2011년 10월 21일 게재확정)

기계적 자유도(mechanical degrees of freedom)를 가지는 free-standing 박막의 전계 방출 특성을 연구하였다. Free-standing 박막에서의 전계 방출 효과를 보다 정확히 해석하기 위하여 기계적 자유도(mechanical degrees of freedom)를 고려한 Fowler-Nordheim 전계 방출 식을 유도하였다. 새롭게 유도된 Fowler-Nordheim 식은 실험값과 매우 잘 일치한다. 이러한 free-standing 박막에서의 전계 방출 효과를 이용하여 이온화된 생체 분자의 충돌로 인해 발생된 free-standing 박막의 고주파 기계적 진동을 탐지함으로써 단백질 질량 분석기의 디텍터로 활용될 수 있음을 보였다.

주제어 : 전계 방출, 이온 검출, 박막

I. 서론

양자역학적 전자 터널링 현상 중 하나인 전계 방출(field emission) 효과는 1928년 Fowler와 Nordheim[1]에 의하여 이론적으로 정립되고 Spindt[2]에 의하여 진공소자로 처음으로 제작된 이후 고전력 고주파 소스, 전계 방출 디스플레이, 고화질 전자현미경 등 여러 분야에 걸쳐 응용되고 있다[3]. 최근들어 탄소나노튜브[4], 그래핀[5] 등 여러 신소재들이 전계 방출 이미터(emitter) 또는 음극(cathode)으로 이용하여 고효율, 저전력, 플렉서 디스플레이 등을 구현 할 수 있게 되었다. 본 논문에서 다룬 새로운 형태의 전계 방출 음극인 free-standing 박막은 극도로 얇은 두께와 기판으로부터 분리되어 있는 기하학적 특성으로 인하여 주위 환경의 아주 작고 다양한 변화에 다음과 같은 세가지 방법으로 민감하게 상호작용을 한다. 첫째, 정적인 힘이 가해지면 기계적 변위(mechanical deformation)를 일으킨다. 둘째, 질량이 더해지면 고유 진동 주파수가 변한다. 셋째, 순간적인 힘 또는 충격이 가해지면 진동한다. 전계 방출은 이러한 상호 작용을 측정 가능케 함으로써 free-standing 박막의 센서 또는 디텍터의 여러 응용을 가능하게 해준다. 특히 전계 방출은 free-standing 박막에 힘 또는 충격이 가해진 시간의 측정을 가능하게 함으로써 새로운 원리로 동작하는 질량 분석기용 디텍터의 활용도 기대할 수 있게 한다. 따라서 본 논문에서는 다른 일반적인 전계 방출 음극과는 달리 기계적 자유도(mechanical degrees of freedom)를 가지는 free-standing 박막에서의 전계 방출과 그 응용에 대해서 다룰 것이다.

II. 이론 및 결과

전계 방출 음극으로써 free-standing 박막의 가장 큰 특징은 다른 음극과는 달리 기계적 자유도(mechanical degrees of freedom)를 가진다는 점이다. 즉, free-standing 박막과 양극 사이에 전압이 가해지면 전기장에 의한 전계 방출 효과뿐만 아

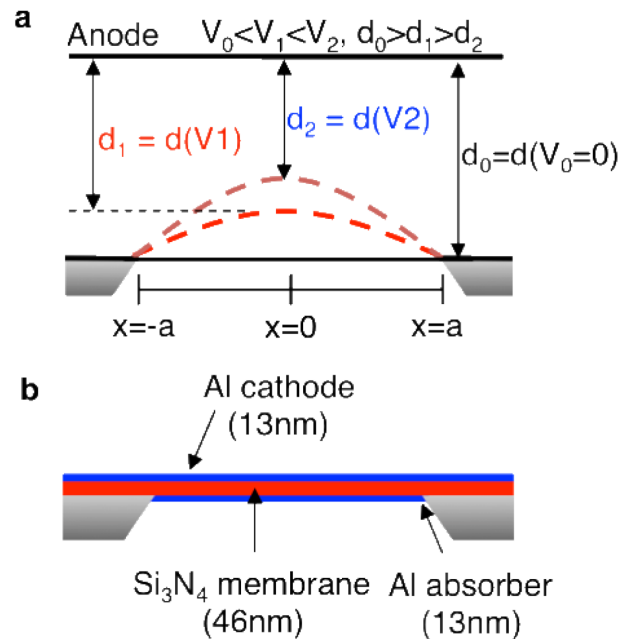


Fig. 1. (Color online) Illustration of the free-standing nanomembrane cathode. a, Schematic of the nanomembrane cathode under the electrostatic force showing mechanical deflection under different voltages. b, schematic of the nanomembrane configuration, consisting of tri-layer made of Al/Si₃N₄/Al.

*Tel: 1-608-213-1849, E-mail: jonghoopark@wisc.edu

나라 정전기력에 의한 기계적 변위(mechanical displacement)도 일어난다. 그 결과, Fig. 1a에 나타난 것 처럼 음극과 양극 사이의 거리가 상수가 아닌 그 사이에 가해진 전압과 박막 표면 위의 위치의 함수가 된다. 따라서 free-standing 박막에서의 전계 방출 효과를 보다 정확하게 해석하게 위해서는 아래의 일반적인 Fowler-Nordheim 전계 방출 전류밀도 관계식에 기계적 변위에 의한 효과도 적절히 고려되어야 한다.

$$J_{FN} = \frac{A(-V/d)^2}{\phi_w t^2(y)} \exp\left(\frac{-Bv(y)\phi_w^{3/2}}{(-V/d)}\right) \text{ A/m}^2 \quad (1)$$

여기서 V 는 음극과 양극 사이에 걸린 전압이고, d 는 음극과 양극 사이의 거리, ϕ_w 는 음극 도체의 일함수, 그리고 A 와 B 는 실험에 의해 결정되는 상수, y 는 $(eE(s)/4\pi\epsilon)^{1/2}/\phi_w$ 로 나타내어지며, $v(y)$ 와 $t(y)$ 는 영상전하에 의한 효과를 고려할때 나타나는 함수이다.

Fig. 1b는 이론 및 실험에 쓰인 free-standing 박막의 단면을 보여준다. Free-standing 박막은 25 mm² 면적의 Al/Si₃N₄/Al으로 이루어져있고 각층 두께는 각각 13 nm/46 nm/13 nm이다.

Free-standing 박막에 고르게 가해진 압력과 최대 변위(박막의 중심에서의 변위) 사이의 관계식은 아래와 같다[6].

$$p(h) = C_1 \frac{t\sigma}{a^2} h + C_2(v) \frac{tE}{a} h^3 \quad (2)$$

여기서 p 는 압력, h 는 박막의 최대 변위(중심점에서의 변위), a 는 박막의 한변의 길이의 반, t 는 두께, E 는 영계수(Young's modulus), σ 는 잔여 스트레스, v 는 포와송 비(Poisson's ratio), 그리고 C_1 와 $C_2(v)$ 는 포와송비에 의해 결정되는 상수이다.

도체로 이루어진 평면형태의 양극의 경우 위 관계식의 압력(P)은 아래식에 의해 그에 상응하는 전기적 압력을 유도하는 전압으로 변환될 수 있다.

$$P = \frac{F_e}{A} = \frac{\epsilon_0 V^2}{2(d_0 - \zeta(x,y))^2} \approx \frac{\epsilon_0 V^2}{2(d_0 - \zeta_{ave})^2} \quad (3)$$

여기서, F_e 는 정전기력, A 는 면적, ϵ_0 는 진공에서의 전기 유전율, V 는 음극과 양극 사이의 전압, d_0 는 전압이 가해지지 않았을때의 음극과 양극 사이의 초기거리, $\zeta(x, y)$ 는 박막의 위치에 따른 변위, 그리고 ζ_{ave} 는 박막의 평균 변위이다.

식(3)에 쓰인 박막내의 위치에 따른 변위는 아래와 같다[6].

$$\zeta(x,y) = h \left(1 + 0.401 \frac{x^2 + y^2}{d^2} + 1.1611 \frac{x^2 y^2}{a^4} \right) \cos \frac{\pi x}{2a} \cos \frac{\pi y}{2a} \quad (4)$$

여기서 x 와 y 는 박막내의 위치를 나타낸다.

식(4)를 이용하면 면적에 대한 평균변위는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\zeta_{ave} = \frac{\int_{-a}^a \int_{-a}^a \zeta(x,y) dx dy}{(2a)^2} \quad (5)$$

따라서 일반적인 사각형 형태의 박막의 최대 변위 대 평균 변위 사이의 비는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{\zeta_{ave}}{h} = 0.48 \quad (6)$$

관계식(2)와 (3)을 이용하면 최대변위 대 전압의 관계를 아래와 같은 3차 다항식으로 나타낼 수 있다.

$$h(V) = a + bV + cV^2 + dV^3 \quad (7)$$

여기서, $a = 3.45 \times 10^{-6}$, $b = 8.67 \times 10^{-8}$, $c = -3.32 \times 10^{-11}$ and $d = 1.11 \times 10^{-14}$ 이다.

Fig. 2는 식(7)에서 구한 최대변위(red circles)와 평균변위(blue squares) 대 전압의 관계를 보여주고 있다. 따라서 Fowler-Nordheim 전계 방출 관계식에 나타나있는 음극과 양극 사이의 거리 d 는 식 (6)과 (7)에 의해 아래와 같이 전압의 함수로 나타낼 수 있다.

$$d(V) = d_0 - \alpha h(V) \quad (8)$$

식(8)을 식(1)의 d 대신에 대입하면 기계적 자유도를 가지는 free-standing 박막에서의 전계방출 식을 구할 수 있다.

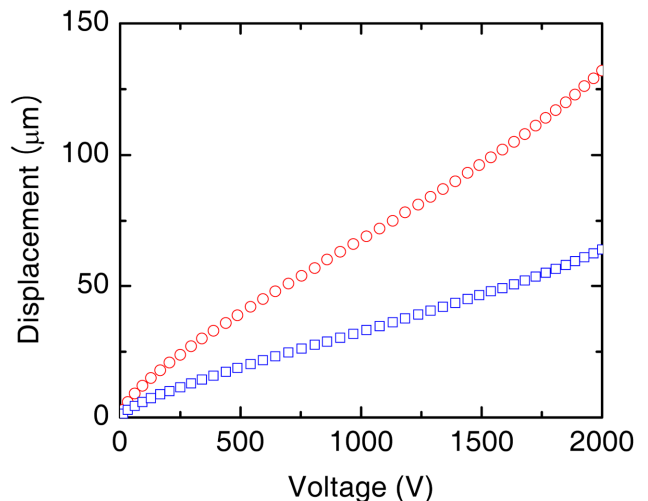


Fig. 2. (Color online) Load-deflection relationship of the nanomembrane under uniform load. Maximum (red circles) and averaged (blue squares) displacement for the nanomembrane as a function of voltage applied between the nanomembrane and anode. The ratio of averaged and maximum displacement of 0.48 was calculated using the shape function.

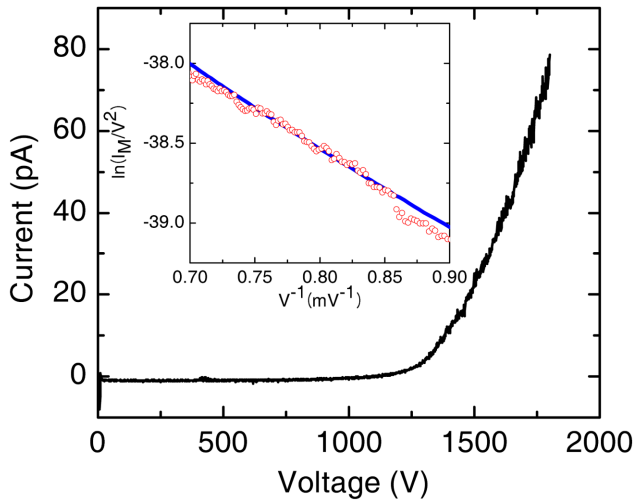


Fig. 3. (Color online) Field emission current from the deformed nanomembrane. Measured field emission current I vs. voltage between the nanomembrane and the gate. Inset shows Fowler-Nordheim representation of field emission current (red dots) and is fitted according to the modified Fowler-Nordheim equation (blue line).

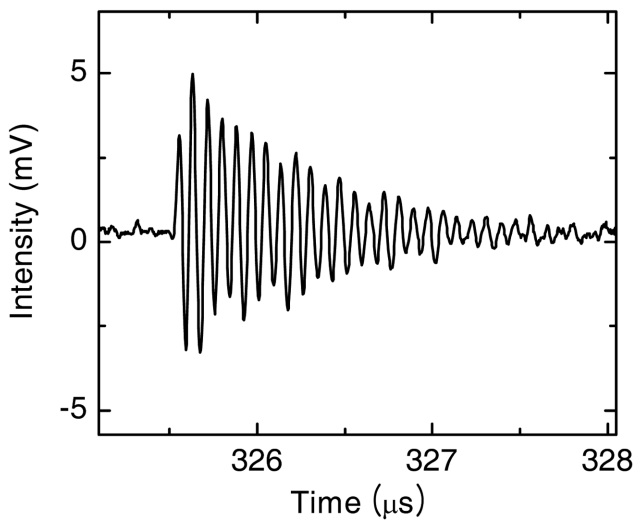


Fig. 4. Mechanical vibration of the free-standing nanomembrane. The mechanical vibration of the nanomembrane excited by ion bombardment translate into corresponding oscillations in the field emission current.

Fig. 3은 실제 측정된 free-standing 박막에서의 전계 방출 전류를 보여주고 있다. Inset에서 보여진 것과 같이 전계방출 전류 대 전압을 Fowler-Nordheim 표현법으로 나타내었을때 측정값과 이론치가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

위 해석에서 보여준 바와 같이 기계적 자유도를 가지고 있는 전계 방출 음극의 경우 전계 방출 전류밀도는 일정 전압 하에서 음극의 기계적 변위에 의해 결정된다. 따라서, free-

standing 박막이 외부의 힘 또는 충격에 의해 진동하게 된다면 그 기계적 진동은 결국 전계방출 전류의 진동을 유발하게 될 것이다. 이러한 free-standing 박막으로 이루어진 음극만의 독특한 특성은 질량분석기의 이온 디텍터로의 응용을 가능하게 한다.

Fig. 4는 20 keV의 운동에너지를 가지는 이온화 된 생체 분자의 충돌에 의한 free-standing 박막의 진동이 전계 방출 전류의 진동으로 변환된 것을 보여준다. 전계 방출된 전류는 마이크로채널플레이트(Microchannel plate, MCP)에 의해 증폭된 뒤 오실로 스코프에 의해 실시간으로 측정되었다. 그림에서 보여진 것과 같이 측정된 전계 방출 전류는 일정한 주파수를 가지고 진동하는 free-standing 박막의 기계적 진동을 잘 보여준다. 이온 충돌에 의해서 생성된 박막의 기계적인 진동은 연속된 충돌이 없으면 시간이 지남에 따라 감쇠하며 결국 정상상태로 되돌아 간다. 이 기계적 진동 주파수와 감쇠 계수 등 기계적인 진동특성은 박막의 기하학적 특성에 의해 결정된다.

III. 결 론

Free-standing 박막에서의 전계방출 효과를 보다 정확히 해석하기 위하여 기계적 자유도(mechanical degree of freedom)를 고려한 Fowler-Nordheim 전계 방출 식을 유도하였다. 새롭게 유도된 Fowler-Nordheim 식은 실험값과 매우 잘 일치한다. 이런 Free-standing 박막에서의 전계방출 효과를 이용한 이온 디텍터를 선보였다. 이 이온 디텍터는 이온의 충돌에 의해 발생 된 free-standing 박막의 기계적 진동을 전계방출로 변환, 증폭하여 이온의 충돌 유무를 감지할 수 있고 더 나아가 충돌한 이온의 질량까지 분석할 수 있게 한다.

참고문헌

- [1] R. H. Fowler and L. Nordheim, Proc. R. Soc. London, Ser. A **119**, 173 (1928).
- [2] C. A. Spindt, J. Appl. Phys. **39**, 3504 (1968).
- [3] G. Furse, Field Emission in Vacuum Microelectronics, Kluwer Academic/Plenum Publisher, New York (2005).
- [4] Walt A. de Heer, A. Chatelain, and D. Ugarte, Science **270**, 1179 (1995).
- [5] Z.-S. Wu, S. Pei, W. Ren, D. Tang, L. Gao, B. Liu, F. Li, C. Liu, and H.-M. Cheng, Adv. Mater. **21**, 1756 (2009).
- [6] D. Maier-Schneide, J. Maibach, and E. Obermeier, J. MEMS **4**, 238 (1995).

Field Emission from Free-standing Nanomembrane For High Energy Ion Detection

Jonghoo Park*

Electrical and Computer Engineering, University of Wisconsin-Madison, WI 53706, USA

(Received 19 October 2011, Received in final form 20 October 2011, Accepted 21 October 2011)

We describe modified Fowler-Nordheim (FN) field emission equation for the free-standing nanomembrane cathode, which has mechanical degrees of freedom. The derived FN equation agrees well with the experimental data. The free-standing nanomembrane cathode demonstrates its unique ability to detect large biomolecule ions.

Keywords : field emission, ion detection, nanomembrane