

펄스 전기장에 의한 $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ 강유전체의 전자 방출

김용태 · 윤기현 · 김태희* · 박경봉* · 곽상희*

연세대학교 세라믹공학과

*안동대학교 재료공학부

(1999년 5월 25일 접수)

Electron Emission from $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ Ferroelectrics by Pulsed Electric Field

Yong Tae Kim, Ki Hyun Yoon, Tae Heui Kim*,
Kyung Bong Park* and Sang Hee Kwak*

Dept. of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

*Dept. of Ceramic Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea

(Received May 25, 1999)

초 록

$\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ 강유전체에서 Zr/Ti 비를 35/65, 50/50 및 65/35로 변화시키며 250 kV/cm 이하의 전기장 인가 범위에서 펄스 전기장에 의한 전자 방출에 대하여 연구하였다. 전자 방출은 하부 전극에 가해진 전계 부호에 관련 없이 모두 방출되었고, 하부 전극에 (-) 전계가 가해진 경우의 전자 방출량이 안정한 값을 나타내었으며, 전자 방출은 상부 전극의 모서리에 집중되어 발생함을 실험적으로 확인하였다. 전자 방출량은 조성에 따라 65/35>50/50>35/65 순서로 나타났으며, 전자 방출 특성은 이력 곡선 상의 분극 값에 크게 의존하였으며, 전자 방출의 threshold field는 강유전체의 항전계 변화와 일치하였다. 강유전체에서의 전자 방출은 전자 방출량을 변형된 Fowler-Nordheim 식에 대입한 결과, 분극 변화량에 따른 표면 전계에 의한 전계 전자 방출로 해석될 수 있었다.

ABSTRACT

Electron emission from the $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ ferroelectrics by pulsed electric field has been investigated as a function of Zr/Ti ratios such as 35/65, 50/50 and 65/35 below 250 kV/cm. Electrons were emitted regardless of the applied field polarity to the rear electrode. When the negative field was applied to the rear electrode, the electron emission charge was more stable. It was proved that the electrons were emitted at the edge of the upper electrode. The emission charge increased in order of 65/35>50/50>35/65. The electron emission characteristics were dependent on the ferroelectric properties such as polarization and coercive field. The emission charge and emission threshold field were affected by the polarization change and the coercive field, respectively. This result explains that the electron emission is a field emission with polarization induced surface potential by a modified Fowler-Nordheim plot of emission charge.

key words : Ferroelectric, Electron emission, PZT, Cathode, Electron gun

1. 서 론

펄스 전기장에 의한 강유전체에서의 전자 방출 현상에 대한 본격적인 연구는 1988년 PZT에 의한 전자 방출의 보고^{1,2)} 이후에 활발히 진행되고 있다. 강유전체에서의 전자 방출은 온도 변화나 기계적 에너지에 의해서도 가능하나,^{3,4)} 펄스 전기장에 의한 전자 방출은 전자의 경우에 비하여 약 100배 이상의 전자 방출 전류 밀도가 가능하여 수십 A/cm²까지 전류 밀도가 얻어진다.⁵⁾ 강유전체로부터의 펄스 전기장에 의한 전자 방출은 방출 전자의 에너지가 수십 수천 eV^{5,7)}의 범위로 매우 높아서 낮은 진공도에서의 전자 방출이 가능하고, 전류 밀도가 열전자 방출, 전계 전자 방출

등의 다른 방식의 전자 방출에 비하여 매우 높으며, 상온에서의 작동이 가능하고 펄스 방출 형식으로서 전자 방출 시간의 제어가 용이하며, 평판형 전자총으로서 FED에의 응용 가능성에 대해서도 이미 연구가 진행되고 있으나⁶⁾ 국내에서는 이에 대한 연구 보고가 없다.

강유전체에서의 전자 방출 기구에 대해서도 여러 가지 연구가 진행되어, 상부 및 하부 전극의 비대칭 구조에서의 강유전체 내부 및 외부 진공에서의 전계 분포,⁸⁾ 전자 방출 후의 상부 전극 edge의 손상⁹⁾ 등에 대한 보고는 일치되고 있으나, 인가 전압 방향에 따른 방출 전자 전류 밀도, 방출 전자의 운동 에너지 등에 대해서는 연구자들에 따라 각기 다른 값을 보고하였다.¹⁰⁾ 특히 강유전체의 각종 물성과 전

자 방출 특성과의 관계에 대해서는 연구가 거의 이루어지지 않았다. Asano 등⁷⁾은 전자 방출 threshold voltage와 항전계의 관계를 보고하였고, PMN-PT 및 PZT 유전체의 비교 실험을 통하여 분극 반전 및 유전 상수가 모두 전자 방출 특성과 관계 있음을 설명하였다.¹¹⁾ 그러나, 일반적으로 강유전체의 포화 분극, 잔류 분극 및 유전 상수 등의 유전 물성과 전자 방출 특성간의 보편적인 관계는 완전히 설명되지 못했으며, 따라서 본 논문에서는 PZT 강유전체의 조성을 변화하여 유전 물성을 변화시키고 이에 따른 전자 방출 특성을 연구하여 강유전체 물성과 전자 방출 특성의 관계를 연구하였다.

2. 실험 방법

일반적인 고상법을 이용하여 Zr/Ti 비를 35/65, 50/50 및 65/35로 변화시키며 PZT 강유전체 벌크 시편을 제조하였다. 출발 물질로서 PbO(Aldrich Chemicals, 99.9%), ZrO₂(Aldrich Chemicals, 99%) 및 TiO₂(Junsei Chemicals, 99%)를 불밀 및 850°C에서 3시간 하소하여 정수압 성형한 후에 1250°C에서 3시간 소결하였다. 소결 시편은 얇게 절단하고 두께 30-60 μm로 연마하여 한쪽 면은 전면용 silver paste로 전극 처리를 하여 하부 전극으로 사용하고, 반대쪽 면은 스퍼터링에 의해 직경 0.5 mm-1.1 mm의 원형 백금 전극을 증착하여 상부 전극으로 사용하였다. 제조된 시편의 결정 구조는 X선 회절기(Rigaku Co., RINT2000, Japan)를 이용하였고, 임피던스 분석기(HP4194A)를 이용하여 유전 상수를 측정하였으며, RT66A(RADIANT, USA)에 고전압 증폭기(690D-6, RADIANT, USA)를 연결하여 강유전체 이력 곡선을 측정하였다.

전자 방출 특성 측정 장치를 Fig. 1에 개략적으로 나타내었다. 펄스파 발생기(HP33120A, Hewlett Packard, USA) 및 고전압 증폭기를 이용하여 상부 전극은 접지하고 시편의 하부 전극에 유지 시간이 각각 250 μs인 bipolar pulse를 인가하였으며, Faraday cup에 가속 직류 전압을 300 V 인가하여 감지하였다. 모든 실험은 1 mTorr의 진공에서 수행하였으며, 전자 방출은 Faraday cup에 직렬로 연결된 830Ω의 저항을 통한 전압 신호를 오실로스코프(HP54645A, Hewlett Packard, USA)에 의해 인가 전압과 동시에 측정하였으며, 전자 방출량(nC)은 오실로스코프 신호를 시간에 따라 적분하여 계산하였고, 전자 방출시의 switching charge 또한 측정하였다. 전자 방출 위치를 파악하기 위해서는 4 mm×4 mm의 정사각형 형태의 상부 전극을 사용하고, 직경 0.4 mm의 Faraday cup을 사용하였다. 전자 방출 실험 조건을 Table 1에 요약하여 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

Zr/Ti 비에 따른 소결 시편의 X선 회절 결과를 Fig. 2에

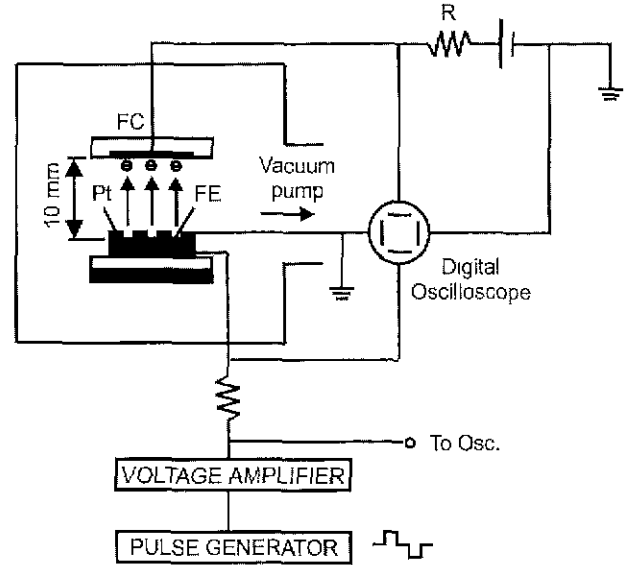


Fig. 1. Experimental setup for measuring electron emission.

Table 1. Experimental Conditions for Ferroelectric Electron Emission Test

Applied pulse field	~250 kV/cm
Acceleration voltage	0 V, 300 V
Faraday cup distance	10 mm (2 mm for emission profile test)
Faraday cup size	φ 10 mm (φ 0.4 mm for emission profile test)
Pressure	10 ⁻³ Torr Ar
Resistance for emission signal	830
Upper electrode size	φ 0.5-1.1 mm
Temperature	Room temperature
Applied pulse shape	bipolar pulse(250 μs pulse width)

나타내었다. 35/65 및 50/50 조성은 정방정 구조를 나타내었으며, Zr/Ti 비가 65/35의 경우는 능면정 구조를 나타내었다. 제2상은 관찰되지 않았으며, 미세 구조 관찰 결과 Zr/Ti 비에 따른 변화는 없었으므로 본 실험에서는 전자 방출 특성에 대한 미세 구조의 영향은 없었다고 사료된다.

Fig. 3 및 Fig. 4는 각각 조성 변화에 따른 유전 상수 및 이력 곡선을 나타낸 그림이다. Zr/Ti 비가 50/50의 경우에 PZT의 MPB 조성에 근접하여 유전 상수가 약 910으로서 가장 높은 값을 나타내었으며, 35/65 및 65/35의 유전 상수는 각각 210 및 430으로 낮아졌다. 이력 곡선은 다른 보고에 비하여 전체적으로 불포화 형태를 나타내었다. 상부 전극이 하부 전극에 비하여 매우 작은 비대칭 전극 구조에서는 상부 전극 모서리 부근의 강유전체 분극 또한 반전 가능하다. 본 실험에서 사용된 시편은 상부 전극 면적이 1.96 × 10⁻³-9.5 × 10⁻³ cm², 시편 두께가 50 μm로서 이러한 효과

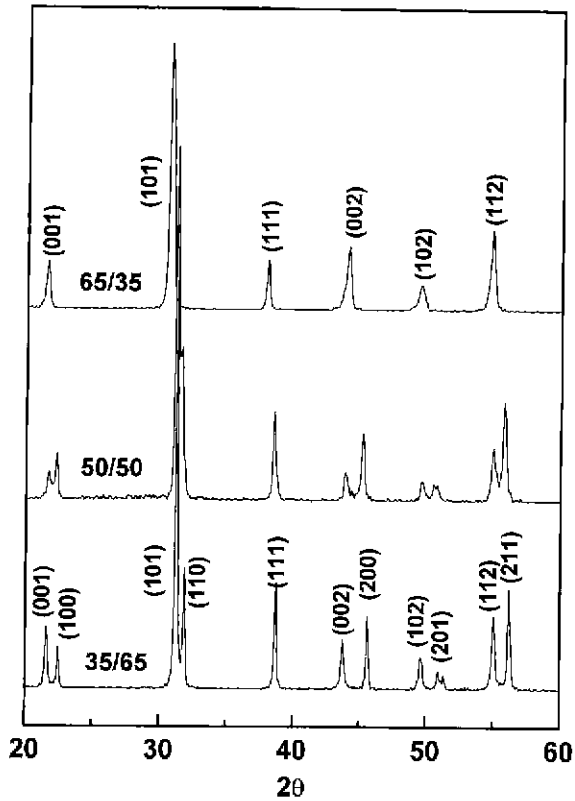


Fig. 2. XRD patterns of the sintered PZT specimens having various Zr/Ti compositions.

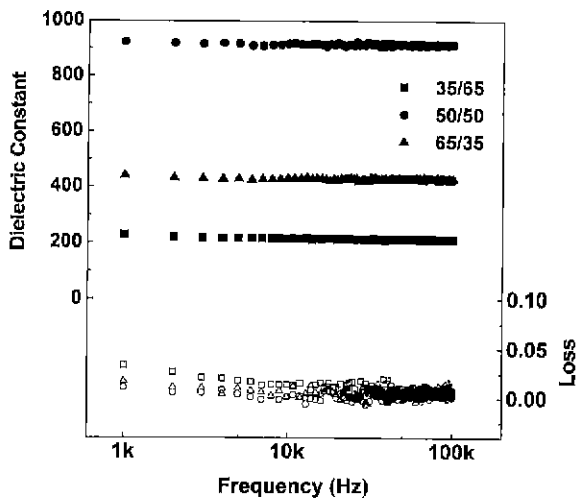


Fig. 3. Changes in dielectric constants and losses of the PZT bulk specimens as a function of composition.

가 강하게 나타났다. 이러한 비대칭 전극에서의 전계 분포에 대한 시뮬레이션 결과⁸⁾ 및 박막에서의 유사한 실험 결과¹²⁾가 보고되어 있다. 본 실험에 사용된 전극 구조에서는 전계를 가함에 따라 상부 전극 모서리 바깥 부분, 즉 전극 처리가 되어 있지 않은 부분에서의 분극이 유도되고, 전계가 높을수록 이러한 효과는 증대되어, 시편 표면에 평행인 방향으로의 분극이 유도되어 이력 곡선이 누워 있는 형태로

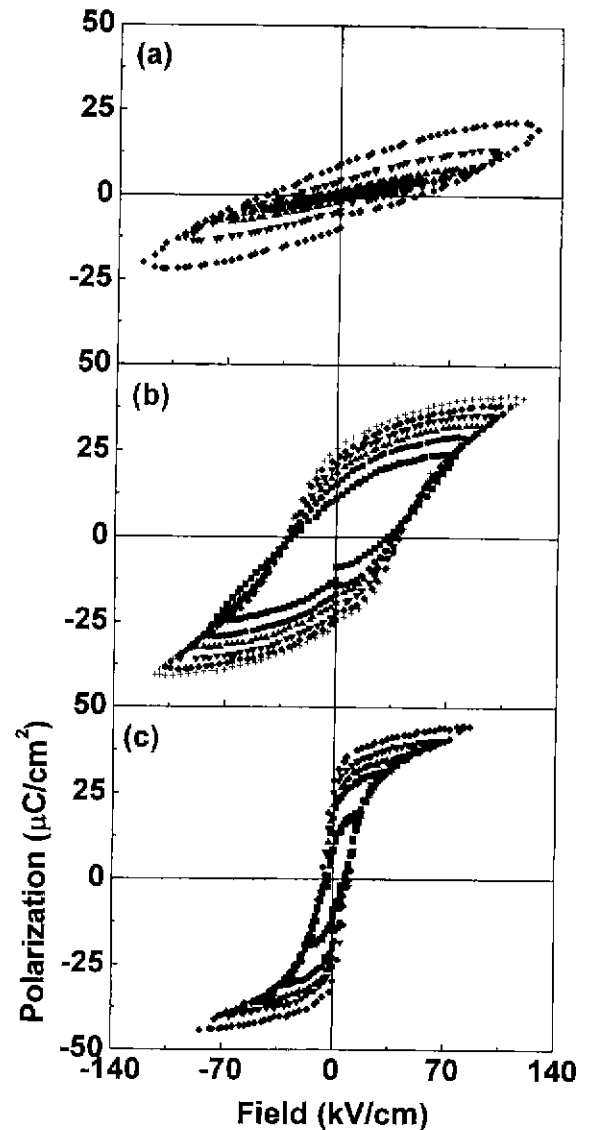


Fig. 4. Ferroelectric hysteresis curves of the specimens having various compositions: (a)35/65, (b)50/50 and (c) 65/35.

나타나게 된다. 특히 35/65와 같이 높은 항전계를 갖는 조성에서는 분극이 횡방향으로만 증대되어 이와 같은 현상이 두드러지게 된다. 비대칭 전극 구조에서 횡방향으로의 분극이 유도된다는 사실은 강유전체 전지층에서 매우 중요한 현상이다.

Fig. 5에는 강유전체에 bipolar 펄스 전계를 인가하였을 때의 전자 방출 및 인가 전압의 오실로스코프 trace를 나타내었다. 하부 전극에 인가된 전계 부호에 관계없이 전자 방출 신호가 나타났으며, 전자 방출은 전압을 인가할 때마다 예외 없이 발생하였으나, 그 값은 상당히 불안정하였다. 전자 방출량이 매우 불안하다는 것은 강유전체 전자 방출에서 공통적으로 보고되었으며, 전자 방출점은 전계가 가장 집중되는 점이며 전자 방출점의 수가 안정되지 못하였다는 것을 알 수 있다. 전자가 방출되는 순간에 인가 전압의 왜

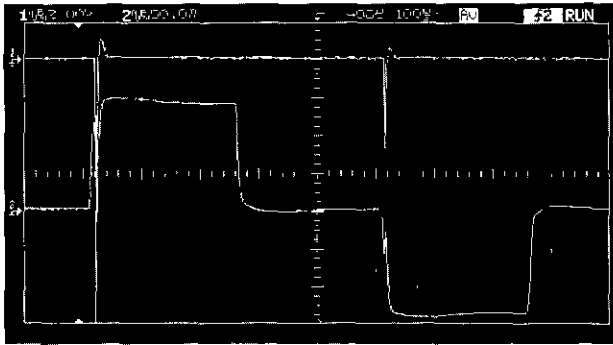


Fig. 5. Oscilloscope traces of electron emission current (top: 2 V/div.) and applied pulse field (bottom: 50 V/div.). The time scale is 100 μs/div.

곡이 발생하였으며, 이는 전자 방출에 따라 발생하는 플라즈마가 강유전체 표면에서 일시적인 전극 역할을 하여¹³⁾ 전극 처리되지 않은 강유전체 부분의 분극 반전이 발생하고 이에 따라 고전압 증폭기에서의 전압 강하가 일어난 것으로 설명할 수 있다. 전자 방출 지속 시간은 약 5 μs로서 비교적 안정되었으며, 전자 방출 펄크의 수는 전계가 증가함에 따라 2-3개까지 나타나는 경우도 있었다. 전계가 인가되기 시작점부터 약 4-10 μs 이후에 전자 방출이 시작되며, 플라즈마의 일반적인 속도¹⁰⁾(2×10^6 cm/sec)를 고려하면, 1 cm 거리의 Faraday cup에 도달하기까지의 시간보다 길며, 이러한 시간 차이는 강유전체 표면에서 plasma가 안정화되기까지의 시간¹⁰⁾(2-2.5 μs)으로 해석된다.

전자가 방출되는 위치를 알아내기 위한 실험으로서 Fig. 6에 나타난 바와 같이 4×4 mm²의 넓은 상부 전극을 증착한 50/50 조성을 사용하고, 전자 궤적의 휘어짐을 방지하기 위하여 가속 전압을 인가하지 않은 상태에서 직경 0.4 mm의 작은 Faraday cup을 상부 전극 위로 2 mm 거리에서 위치를 이동하며 강유전체 하부 전극에 86 kV/cm의 전계를 인가하였을 때의 전자 방출량을 측정하였다. 전자 방출은 전

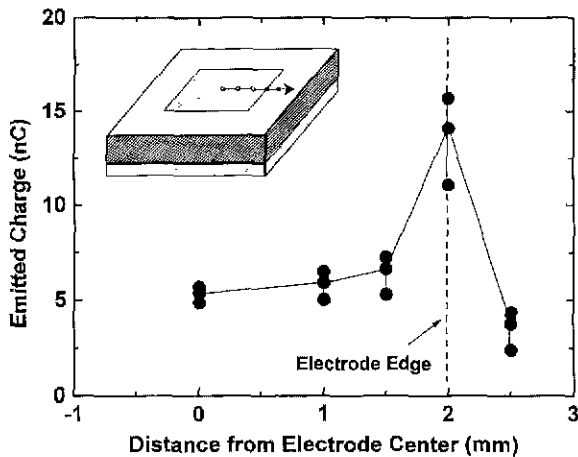


Fig. 6. Electron emission profile change with upper electrode position.

극 모서리 부분에서 최대값을 나타내었으며, 전극 처리되지 않은 강유전체 표면에서는 전자 방출량이 급속히 감소함을 알 수 있었다. 강유전체에서의 전자 방출 각도는 특히 가속 전압이 없는 경우에는 넓은 방향으로 퍼진다고 보고되어 있으며,¹⁴⁾ 따라서 Faraday cup이 상부 전극의 중심부에 위치하였을 때에도 전자 방출 신호가 나타났다고 생각되며, 육안상으로도 전자 방출시 발생하는 플라즈마가 전극 모서리에만 집중된 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 연마된 강유전체의 표면 거칠기 및 상부 전극 두께를 고려하면, 상부 전극이 매우 얇게 코팅되어 강유전체가 노출된 부위가 존재할 수도 있으며, 이러한 노출 부위는 전극 모서리와 똑같은 역할을 하여 상부 전극 처리된 중심부에서도 전자가 방출될 수도 있다고 생각할 수 있으나, 두 가지 경우 모두 전극 모서리에서 전자가 방출되는 것으로서 설명할 수 있다.

Fig. 7에 각 조성의 강유전체에 대하여 가속 전압을 300 V로 인가한 상태의 인가 전계에 따른 전자 방출량을 나타내었다. Fig. 7-(a)는 하부 전극에 (+) 전계가 인가된 경우의 전자 방출량($Q_e(+)$)이고, Fig. 7-(b)는 (-)전계가 인가된 경우의 전자 방출량($Q_e(-)$)이다. $Q_e(+)$ 값은 전계에 따라 매우 불안정한 값을 나타내었으며, $Q_e(-)$ 에 비하여 상대적으로 높은 값을 나타내었다. Rosenman 등¹³⁾도 $Q_e(+)>Q_e(-)$ 의 실험 값을 나타내었으며, 전계 방향에 따른 방출 전자의 운동 에너지 또한 차이를 나타낸다고 보고하였다. 하부에 (+) 전계가 가해진 경우에, 강유전체 분극의 (+) 부분은 상부면을 향하게 되고, 상부면에 집중된 (+) 전하를 상부 전극이 중화

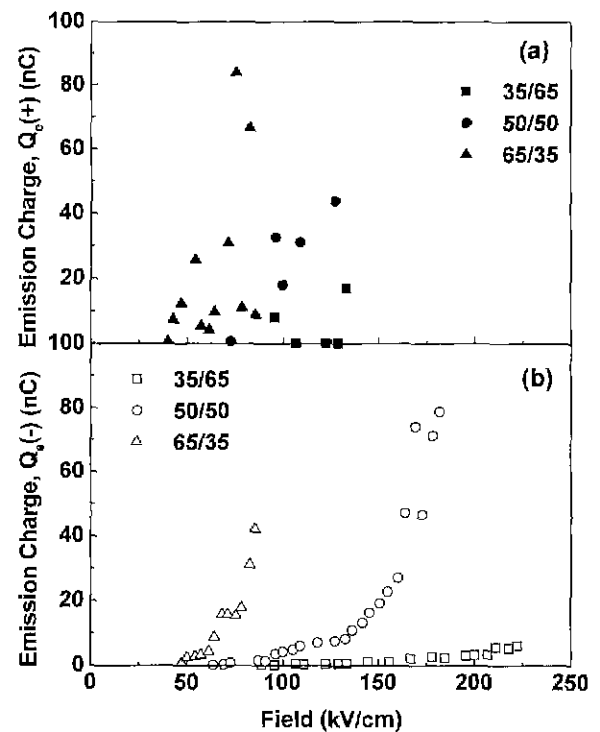


Fig. 7. Variations of the electron emission charge with applied electric fields; (a) $Q_e(+)$ and (b) $Q_e(-)$.

하게 된다. 앞에서 설명한 바와 같이, 하부 전극에 비해 상부 전극 면적이 매우 작으면, 상부 전극 모서리의 바로 바깥쪽에 있는 강유전체에 stray field가 작용하여 이곳에서도 분극이 발생하게 되고, 이 분극을 증화하기 위하여 접지된 상부 전극으로부터 전자가 방출하게 된다. 반대로 하부 전극에 (-) 전계가 가해진 경우에는 강유전체로부터 전자가 방출된다. 상부 전극으로부터의 전자 공급은 무한하며, 강유전체로부터의 전자 공급은 강유전체의 분극 변화량에 의존할 것이므로, $Q_c(+)>Q_c(-)$ 의 관계가 나타난 것으로 설명된다. 따라서, $Q_p(+)$ 에 비하여 $Q_c(-)$ 가 강유전체의 물성에 더욱 밀접한 관계를 갖고 있다고 생각된다. 전자 방출 threshold field는 65/35<50/50<35/65의 순서를 나타내었으며, 전계가 증가함에 따라 전자 방출량은 급격히 증가하여 일정 전계에서의 전자 방출량은 65/35>50/50>35/65의 순서로 나타났다. 항전계는 능면정보다 정방정에서 증가하여 65/35<50/50<35/65의 순서로서, 전자 방출의 threshold field와 같은 순서를 나타내었다. 또한 포화 분극 또는 잔류 분극은 65/35>50/50>35/65의 순서로서 전자 방출량과 같은 거동을 나타내었다. 일반적으로, 전극과 유전체 사이에는 작은 gap이 존재할 수 있으며,¹⁵⁾ 이러한 gap에는 전계가 집중된다. 이러한 전계의 집중은 유전체의 유전 상수에 비례하여, 최소 전자 방출 threshold field인 40 kV/cm에서의 전계 집중은 1.7×10^7 V/cm로서 일반적인 전계 전자 방출 현상이 가능하다. 하지만, 본 실험에서는 일정 전계에서의 전자 방출량 또는 전자 방출 threshold field가 유전 상수와는 큰 관련 없이 강유전체 이력 곡선에서 나타나는 분극 및 항전계에 의존하였다. 전자 방출의 threshold field와 항전계의 관계는 Asano 등⁷⁾의 보고와 일치하며, 분극 반전량과 전자 방출량의 관계는 Gundel 등¹⁶⁾ 및 Rosenman 등¹⁷⁾이 정성적으로 보고한 바 있다.

전계에 따른 전자 방출량의 변화율은 연구자에 따라 선형^{11),12)} 및 지수적^{18),19)}으로 다르나, 본 실험에서는 전계에 따라 지수적인 증가를 나타내었다. 전자가 모서리에 집중되어 방출되었다는 결과, 육안 고찰에 의한 전극 모서리에서의 가시광 발생, 전자 방출 후의 전극 모서리에서의 dendrite 형태의 전극 침식 현상,¹⁵⁾ 4-10 μ s의 de-lay time 결과 등을 종합하면, 강유전체 모서리에서 플라즈마가 발생했다는 것을 알 수 있으며, 다음과 같은 전자 방출 기구를 제시할 수 있다. 비대칭 전극 구조를 갖는 경우에는 stray field가 존재하여 상부 전극 모서리 부근의 강유전체 표면에도 분극 반전이 발생하게 되고, 발생된 분극은 상부 전극의 모서리 부근에서 간단히 (1)식에 의해 전계를 발생하게 된다.

$$E_{\text{surf}} = q/\epsilon_0 \quad (1)$$

E_{surf} : 전극 모서리에 발생되는 전계 (V/cm)

q : 표면에 발생된 분극 (C/cm^2)

ϵ_0 : 진공의 유전율 (8.854×10^{-14} F/cm)

q 를 최소 $10 \mu C/cm^2$ 로 하여 계산하면, 전극 모서리에서의 표면 전계, E_{surf} 는 약 1.1×10^8 V/cm가 발생한다. 일반적인 전계 전자 방출이 약 10^7 V/cm인 것에 비하면, 매우 높은 전계가 발생된 것이며, 따라서 전자 방출량이 일반적인 전계 전자 방출에 비하여 훨씬 높은 이유를 설명할 수 있다. Fowler-Nordheim 관계식은 (2)로서 나타나며,

$$J = A \cdot E_{\text{surf}}^2 \exp\left(-B \frac{\phi}{E_{\text{surf}}}\right) \quad (A/cm^2) \quad (2)$$

여기서, $A=1.54 \times 10^{-6}$, $B=6.8 \times 10^7$, ϕ 는 강유전체의 일함수(eV)이다. 전자 방출 면적 및 전자 방출 지속 시간을 정확하게 측정할 수 없기 때문에, (2)식을 (3)과 같이 변화하였다.

$$Q_c(-) = A' \cdot Q_p^2 \exp\left(-B' \frac{\phi}{Q_p}\right) \quad (\text{nC}) \quad (3)$$

여기서, Q_p 는 switching charge(nC)이고, A' 및 B' 은 상수이다. Fig. 8은 전자 방출과 switching charge를 동시에 측정하고, switching charge를 이용하여 계산된 표면 전계를 이용하여, 변형된 Fowler-Nordheim 관계식 (3)에 의해 전자 방출량을 나타낸 그림이다. 불안정한 전자 방출량에도 불구하고, 대략적으로 직선적 관계를 갖고 있어 전계 전자 방출 현상이 일어났음을 정성적으로 확인할 수 있었다. 직선의 기울기에는 강유전체의 일함수에 대한 정보가 있으나, 전자 방출 면적이 시편마다 다를 수 있으므로 조성에 따른 일함수의 직접적인 비교는 불가능하였다. 결론적으로, 강유전체에

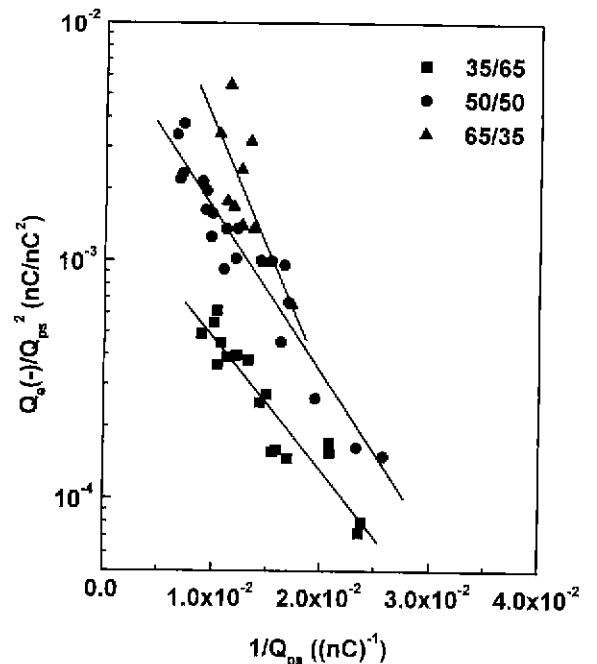


Fig. 8. Modified Fowler-Nordheim plot of emission charge as a function of switching charge.

서의 전자 방출은 비대칭 구조를 갖는 강유전체의 상부 전극 모서리에서 분극 변화량에 의한 일종의 전계 전자 방출 현상으로서 해석된다.

4. 결 론

강유전체에서의 전자 방출은 강유전체 이력 곡선에서 나타나는 분극 및 항전계와 밀접한 관계를 갖고 있어, 전자 방출량은 포화 분극값 또는 분극 반전량에 의존하였고, 전자 방출의 threshold field는 항전계에 의존하여 65/35 조성이 가장 낮은 전계에서 가장 높은 전자 방출량을 나타내었다. 전자 방출은 상부 전극의 모서리에서 집중되어 발생하며, 이는 비대칭 전극 구조의 강유전체에서 발생하는 상부 전극 모서리 외부의 강유전체 표면에서의 분극에 의한 전계 집중 현상이 발생하여, 일종의 전계 전자 방출 현상이 일어난 것으로 설명될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 한국과학기술원 재료계면공학 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. H. Gundel, H. Riege, J. Handerek and K. Zioutas, "Low-pressure Hollow Cathode Switch Triggered by a Pulsed Electron Beam Emitted from Ferroelectrics," *Appl. Phys. Lett.*, 54(21), 2071-2073 (1989).
2. H. Gundel, J. Handerek, H. Riege, E. J. N. Wilson and K. Zioutas, "Pulsed Electron Emission from PLZT Ceramics," *Ferroelectrics*, 109, 137-142 (1990).
3. B. Rosenblum, P. Braeunlich and J. P. Carrico, "Thermally Stimulated Field Emission from Pyroelectric Lithium Niobate," *Appl. Phys. Lett.*, 25(1), 17-19 (1974).
4. G. Rosenman, V. I. Pechorskii and I. S. Rez, "Exoelectron Emission as a Result of Uniaxial Deformation of $LiNbO_3$," *Sov. Phys. Solid State*, 23(12), 2162-2163 (1981).
5. H. Gundel, "High-intense Pulsed Electron Emission by Fast Polarization Changes in Ferroelectrics," *Ferroelectrics*, 184, 89-98 (1996).
6. O. Auciello, M. A. Ray, D. Palmer, J. Duarte, G. E. McGuire and D. Temple, "Low Voltage Electron Emission from $Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ -based Thin Film Cathodes," *Appl. Phys. Lett.*, 66(17), 2183-2185 (1995).
7. J. Asano, S. Iwasaki, M. Okuyama and Y. Hamakawa, "Electron Emission from PZT Ceramic by External Pulsed Electric Fields," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 32(9B), 4284-4287 (1993).
8. H. Gundel, "Electron Emission from Ferroelectrics"; pp. 335-351, in *Science and Technology of electronic thin films*, Ed. by O. Auciello and R. Waser, Kluwer Academic, Norwell, MA, 1995.
9. M. Miyake, S. Ibuka, K. Yasuoka and S. Ishii, "Effects of Polarization Reversal and Surface Conditions on the Ferroelectric Electron Emission," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 36(9B), 6004-6007 (1997).
10. D. Flechtner, C. Golkowski, J. D. Ivers, G. S. Kerlick, J. A. Natun and L. Schchter, "Electron Emission from Lead-Zirconate-Titanate Ceramics," *J. Appl. Phys.*, 83 (2), 955-961 (1998).
11. Y. Kuratani, M. Okuyama and Y. Hamakawa, "Field-Excited Electron Emission from $(1-y)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_{3-y}PbTiO_3$ Ceramic," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 35(9B), 5185-5187 (1996).
12. D. Averty, J. L. Chartier, H. W. Gundel and R. Le. Bihan, "Nanosecond Switching of Ferroelectric Thin Films for Application to a Short-Pulse Micro Electron Emitter," *Integrated Ferroelectrics*, 18, 91-99 (1997).
13. V. D. Kugel, G. Rosenman, D. Shur and Ya. E. Krasik, "Copious Electron Emission from Triglycine Sulfate Ferroelectric Crystals," *J. Appl. Phys.*, 78(4), 2248-2252 (1995).
14. Y. Kuratani, S. Omura, M. Okuyama and Y. Hamakawa, "Enhancement of Field-Excited Electron Emission from Lead-Zirconate-Titanate Ceramic Using Ultrathin Metal Electrode," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 34(9B), 5471-5474 (1995).
15. G. A. Mesyatz, "Physics of Electron Emission from Metal-Dielectric Cathodes," *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*, 2(2), 272-276 (1995).
16. H. Gundel and A. Meineke, "First Simultaneous Observation of Electron Emission from and Switching Current Transient in PZT Ferroelectric Ceramics," *Ferroelectrics*, 146, 29-25 (1993).
17. G. Rosenman, D. Shur, Kh. Garb and R. Cohen, "Polarization Switching in Ferroelectric Cathodes," *J. Appl. Phys.*, 82(12), 772-778 (1997).
18. J. Asano, T. Imai, M. Okuyama and Y. Hamakawa, "Field-Excited Electron Emission from Ferroelectric Ceramic in Vacuum," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 31(9B), 3098-3101 (1992).
19. J. Handerek and H. Riege, "Field-Excited Electron Emission from Lanthanum-Doped, Barium-Strontium-Titanate Ceramics," *Ferroelectrics*, 128, 43-48 (1992).