

논문 2005-42SD-6-4

Pt/Ti 전극을 사용한 산화된 다공질 폴리 실리콘 전계방출소자의 특성

(The field emission characteristics of an oxidized porous polysilicon field emitter using Pt/Ti emitter-electrode)

한 상 국*, 박 근 용*, 최 시 영*

(Sang-Kug Han, Keun-Yong Park, and Sie-Young Choi)

요 약

본 논문에서는 다양한 에미터 금속 재료를 이용하여 산화된 다공질 폴리실리콘(Oxidized Porous Poly-Silicon) 전계방출 소자를 제조하였으며 에미터 금속의 열처리 효과가 산화된 다공질 폴리실리콘 전계방출소자의 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 다양한 에미터 금속 중 구동전극을 가진 Pt/Ti 에미터 전극을 300 °C-1hr 열처리한 경우 전자방출 효율은 $V_{ps}=12$ V에서 최대 2.98 %의 효율을 나타내었으며, 350 °C-1hr 열처리한 경우 $V_{ps}=16$ V에서 3.37 %의 가장 높은 효율을 나타내었다. 이는 열처리 공정을 통해 OPPS 전계방출 소자 표면에 다수의 결정립 경계와 무수히 많은 미세한 다공질 간의 흡착성의 개선으로 인한 면 저항 감소에 의한 것을 알 수 있다. OPPS 전계 방출 소자를 디스플레이소자로 적용하기 위해 형광체 발광 특성을 조사해 본 결과, 900 °C-50min 산화 후 Pt/Ti(5nm/2nm) 에미터 전극을 사용하여 제조된 OPPS 전계 방출 소자의 경우 15 V에서 3600 cd/m², 20 V에서 6260 cd/m²의 상대적으로 높은 휘도를 나타내었다. 열처리는 Ti층과 OPPS 간의 흡착성을 개선시키고 에미터 전극에 고른 전계를 가하는 중요한 역할을 한다.

Abstract

In this paper, OPPS(oxidized porous poly-silicon) field emitters were fabricated by using various emitter-electrode metal and these electron emission characteristics were investigated for different thermal annealing effects. The addressed OPPS field emitter with Pt/Ti emitter electrode annealed at 300 °C-1hr showed the efficiency of 2.98% at $V_{ps}=12$ V and one annealed at 350 °C-1hr showed the highest efficiency of 3.37 % at $V_{ps}=16$ V. They are resulted from the improvement of interfacial contact characteristics of thin emitter metal to an oxidized porous poly-silicon and the decrease of electrical resistance of emitter metal. The brightness of the OPPS field emitter increases linearly in V_{ps} and after oxidation process for 900 °C-50min, the brightness of the OPPS field emitter with the as-deposited Pt/Ti emitter electrode was 3600 cd/m² at the $V_{ps}=15$ V, 6260 cd/m² at the $V_{ps}=20$ V. Thermal treatment improved the adhesion between the Ti buffer layer and the oxidized porous poly-silicon and also played an important role in the uniform distribution of electric field to the emitter electrode.

Keywords : field emission device(FED), oxidized porous poly-silicon(OPPS), emission efficiency, silicon device

I. 서 론

종래에는 디스플레이라 하면 컬러 TV와 데스크 톱 PC 디스플레이로서 거대한 시장을 차지하는 CRT

(cathode ray tube)가 주류를 이루고 있었다. 그러나 CRT가 가지고 있는 치명적인 단점인 화면크기의 증가에 따른 비선형적인 부피 및 중량의 증가로 인해 CRT 디스플레이는 그 한계점에 도달한 것으로 보고 있다. 정보화 사회의 급속한 발전으로 정보 영상을 보다 효율적으로 표시할 수 있는 디스플레이 소자에 대한 요구가 커지면서 CRT로서 감당하기 힘든 부분 등은 평판 디스플레이(flat panel display, FPD)로 대체되고 있는 추

* 정회원, 경북대학교 전자공학과
(School of Electrical Engineering and Computer Science Kyungpook National University)
접수일자: 2005년2월23일, 수정완료일: 2005년5월10일

세이다. FPD 중의 하나로 최근에 이르러 연구 개발이 더욱 가속화되고 있는 디스플레이 장치로서, 전계방출 디스플레이(field emission display, FED)를 들 수 있다. 최근에는 FED 분야에서 기존의 Spindt^[1]형태의 구조에서 벗어나 다양한 구조와 방출 기구(mechanism)를 가지는 전자 방출원이 연구되고 있다. 현재 연구되고 있는 차세대 FED형 전자 방출원으로는, MIM (metal-insulator-metal)^[2], CNT(carbon nano tube)^[3], PFE (printable field emitter)^[4], SED(surface conduction electron emitter)^[5], BSD(ballistic electron surface emitting device)^[6-7], 그리고 OPPS(oxidized porous poly-silicon)^[8-9]등이 있다. 이중 OPPS 전계방출 소자는 구동전압이 15 V이하로 낮으며, 제작 공정이 간단하여 제조원가를 크게 낮출 수 있는 장점을 가지고 있다, 그러나 구동 전류가 커서 효율이 1 % 이하로 낮고 다공질성의 거친 표면에 10 nm 이하의 얇은 에미터 전극이 형성되므로 소자의 신뢰성이 확보되지 못하는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점들을 극복하기 위해서 본 논문에서는 산화된 다공질 폴리실리콘 전계방출소자에 필요한 각 기본공정을 확립하였고 다양한 에미터 금속에 대한 열처리 공정이 OPPS 전계방출소자의 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 그리고 명확히 규명되지 못한 OPPS 전계방출 기구를 규명하여 디스플레이 소자의 적용가능성을 확인하였다.

II. OPPS 전계 방출 소자의 원리

산화된 다공질 폴리실리콘(OPPS)층에 전계를 인가

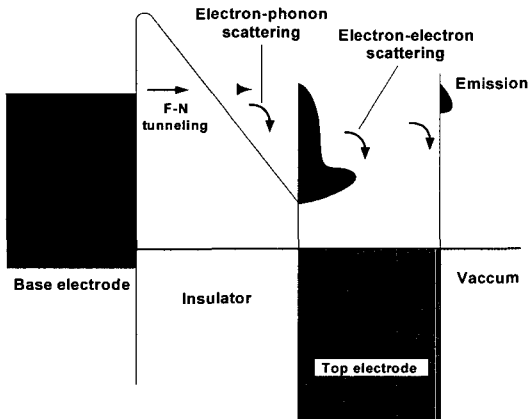


그림 1. OPPS 전계 방출 소자의 에너지 밴드 다이어그램 및 전자방출기구
 Fig. 1. Energy band diagram and emission mechanism for the OPPS field emitter.

할 경우, 하부 전극에서 출발한 전자들이 얇은 산화막으로 둘러싸인 다공질 폴리실리콘을 통해 터널링하여 진공 중으로 방출된다. 방출된 전자는 양극전압에 의해 형광체가 도포된 상부 패널 쪽으로 가속, 충돌하여 형광체를 여기시켜 발광하게 된다. 그림 1에는 OPPS 전계 방출 소자의 에너지밴드 다이어그램과 방출 기구를 도식화해 나타내었다. 상부전극에 (+)전계를 가하면 하부전극 중의 전자가 절연층을 Fowler-Nordheim^[10] 터널링하여 상부전극으로 터널링 전류가 형성된다. 이때 대부분의 전자는 상부 금속 층에서 산란 되어 에너지를 잃지만 전자 중에 높은 에너지를 갖는 전자가 상부의 금속 전극층을 뚫고 진공으로 방출되어 고전압이 인가된 anode로 가속된다. 이렇게 가속된 전자는 상부 전극면에 있는 형광체를 충돌하여 빛을 방출하게 된다.

III. 실험

그림 2은 산화된 다공질 폴리실리콘 전계 방출 소자의 제조 공정을 나타낸 그림이다. 기판은 4-inch 크기의 p-type(100) 실리콘 기판을 사용하였으며 습식 열산화 방식을 사용하여 600 nm 두께의 1차 산화막을 형성하였다. AZ1512 PR(photo resistor) 코팅 후 첫 번째 마스크를 사용하여 G-line의 파장으로 노광한 후 하부 전

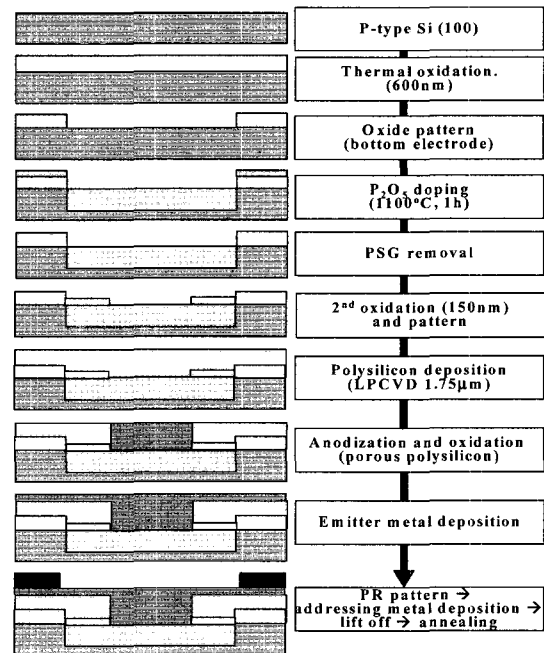
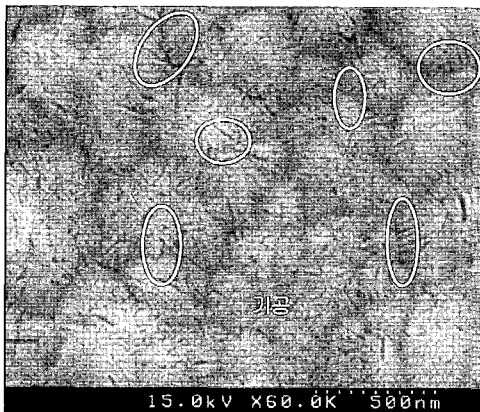


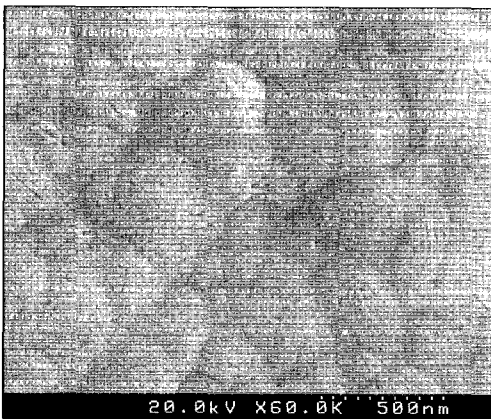
그림 2. OPPS 전계 방출 소자의 제작 공정 순서
 Fig. 2. Fabrication flow of OPPS field emitter.



(a)



(b)



(c)

그림 3. 폴리실리콘과 다공질 폴리실리콘의 SEM 사진
(a) 폴리실리콘의 표면 (b) 다공질 폴리실리콘 표면(20s) (c) OPPS(900 °C-50 min)의 표면

Fig. 3. SEM pictures of (a) surface view of polysilicon, (b) surface view of porous polysilicon(20s), and (c) oxidized porous polysilicon (900 °C/50 min).

극 형성될 부분의 산화막을 BHF를 이용하여 식각하였다. 그리고 하부전극에 P₂O₅ 소스를 코팅한 후 1100 °C

에서 60분 동안 pre-dep. 공정을 수행하였다. 그리고 pre-dep. 공정에서 형성된 PSG(phosphosilicate glass)를 식각한 후 누설전류를 막기 위해 2차 산화막을 150 nm 두께로 형성 하였다. 두 번째 마스크를 사용하여 차후 다공질 폴리실리콘이 형성될 부분의 산화막을 노광 및 식각 공정을 통해 제거하였다. 2차 산화막 패턴이 정의된 기판위에 LPCVD법으로 625 °C에서 1시간동안 1.75 μm 두께의 폴리실리콘을 성장하였다. 증착된 폴리실리콘은 HF(49%)와 ethanol이 1:1 혼합된 용액 내에서 화학반응에 의해 다공질화 되었다. 다공질화 된 폴리실리콘은 900 °C에서 고순도 dry O₂ 가스를 사용하여 분당 4ℓ씩 넣고 50분 동안 산화반응을 거친 후 얇은 에미터 금속을 형성하게 되면 산화된 다공질 폴리실리콘(oxidized porous poly-silicon) 전계 방출 소자가 완성된다. 그리고 소자의 전자방출 특성의 개선을 확인하기 위해 다양한 종류의 에미터 금속을 증착한 후 열처리 조건을 다양하게 진행하였으며, addressing 전극을 OPPS 에미터 전극 주위에 형성하는 공정을 수행하였다. 여기서 addressing 전극의 역할은 에미터 전극의 높은 저항으로 인한 전압강하를 막기 위해서 각각의 에미터 전극 주위에 결선의 목적으로 두꺼운 금속을 증착하여 저항 성분을 최소화하는 것이다.

그림3에는 폴리실리콘과 양극반응을 거친 후 다공질 폴리 실리콘 각각의 SEM 사진을 나타내었다. (a)는 625 °C에서 성장한 폴리실리콘의 표면을 나타내고 있으며, (b)는 전류밀도를 10 mA/cm², 20초 동안 양극반응을 통해 다공질화한 표면을 나타내고 있다. 표면의 기공이 그레인(grain)의 경계에서 활발하게 형성된 것을 알 수 있다. (c)는 다공질화 된 폴리실리콘에 대해 900 °C, 50 분 동안 산화 반응을 거친 산화된 다공질 폴리실리콘의 표면 SEM 사진이다. 산화 반응을 거친 후에도 기공들의 모습들은 양극반응 후의 기공들의 형태를 유지하고 있음을 확인하였다.

IV. 실험 결과 및 고찰

그림 4에는 OPPS 전계 방출 소자의 단면도 및 전계 방출 특성 분석을 위한 결선도를 나타내었다. 본 실험은 2.5 × 10⁻⁵ torr 진공도에서 이루어졌으며 OPPS을 이동한 전자가 상부전극으로 빠져나가는 구동전류(I_{ps})와 일부 전자들은 진공 중으로 방출되어 anode plate의 전압

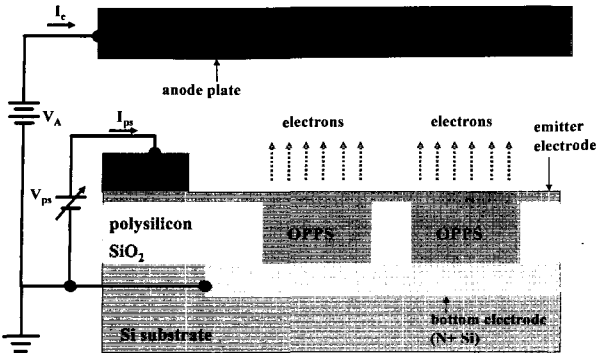


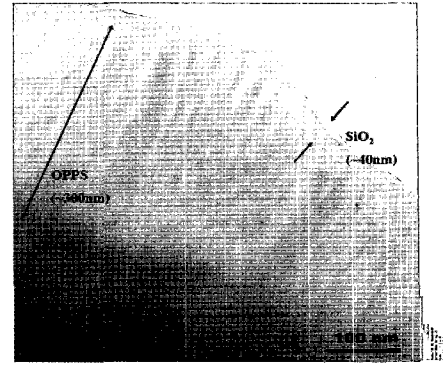
그림 4. OPPS 전계 방출 소자의 단면도 및 전계 방출 특성 분석을 위한 결선도

Fig. 4. Cross-sectional view of OPPS field emitter and the electrical connection for the analysis of its field emission characteristics.

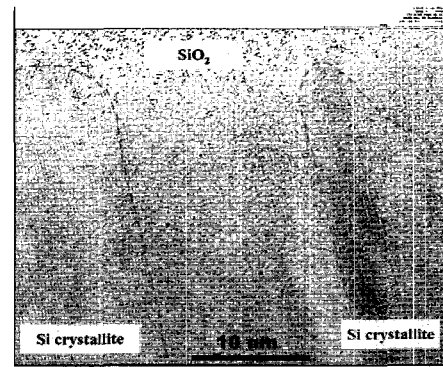
V_A 에 의해 끌려가는 방출전류(I_e) 측정을 위해서는 anode 전압(V_A)를 1.2 kV, 샘플과 anode전극 사이의 거리를 3 mm로 유지하여 측정하였다. 상부 전극의 전압은 0~20 V로 가변시키면서 I_{ps} 와 I_e 를 측정하였다. 위 경우와 달리 형광체 발광 특성은 CRT 형광물질(p-22 green phosphor)을 사용하여 샘플과 anode plate와의 거리를 9 mm로 고정하고, V_A 를 3 kV로 인가하여 확인하였다. 그리고 상부 전극의 전압은 전류 측정과 마찬가지로 0~20 V로 가변시켰으며 형광체의 발광은 CS-100A 휘도계를 이용하여 측정하였다.

그림 5에는 TEM을 이용하여 산화된 다공질 폴리실리콘의 방출 기구를 분석하였다. 그림 5(a)는 OPPS 구조의 단면에 대한 배율을 20만 배로 나타낸 TEM 사진이다. 사진에서 상대적으로 밝은 부분이 산화된 다공질 폴리실리콘이며 아래쪽의 어두운 부분은 폴리실리콘이다. 산화된 다공질 폴리실리콘은 300 nm정도 형성되었고, 표면 산화막 두께는 약 40 nm정도로 성장한 것을 확인할 수 있었다. 그림 5(b)는 표면 산화막 아래 부분에 2개의 실리콘 나노팁이 15 nm정도의 산화막을 사이에 두고 존재하는 것을 보여주고 있으며 그림 5(c)는 결정성을 띤 실리콘 나노팁과 이를 둘러싼 비정질 산화막의 경계가 뚜렷하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과들을 통해 앞서 수행된 다공질화 공정과 산화막 형성 공정이 주위에 적절하게 수행되었음을 확인할 수 있었다.

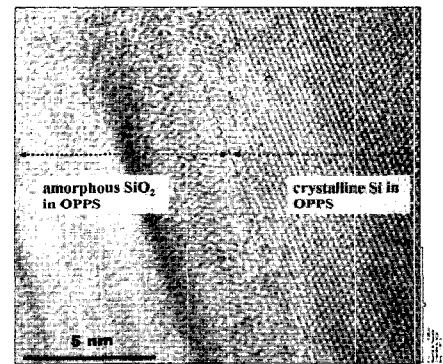
그림 6에는 산화된 다공질 폴리실리콘 표면 위에 열역학적으로 우수한 특성을 가지고 있는 다양한 에미터 전극을 단일 또는 이중으로 증착하고 각각의 경우에 대한 방출 특성을 나타내었다. 그리고 방출 효율은 구동



(a)



(b)

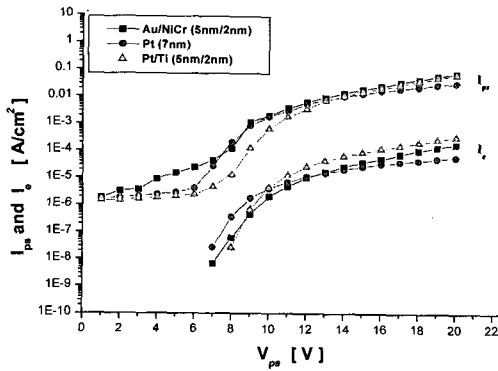


(c)

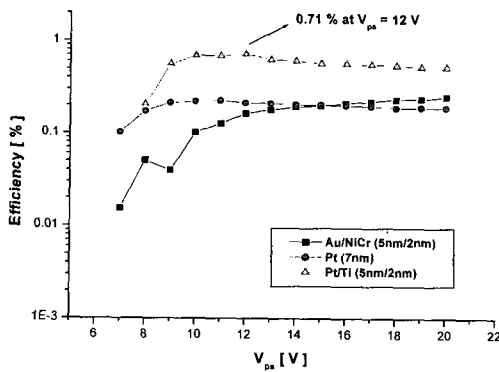
그림 5. 산화된 다공질 폴리 실리콘 영역의 TEM 분석 (a) 20만배 확대 (b) OPPS 구조 내의 실리콘 나노팁 (c) 실리콘 결정질과 비정질 SiO₂의 경계면

Fig. 5. TEM views of OPPS region. (a) magnification of 200k, (b) Si nano-tips in OPPS structure, and (c) boundary of crystalline Si and amorphous SiO₂.

전류에 대한 방출 전류의 백분율인 $100 \times (I_e / I_{ps})$ 로 계산되었다. Pt/Ti(5nm/2nm) 에미터의 경우 구동전류와 방출전류는 $V_{ps} = 20$ V에서 $I_{ps} = 63$ mA/cm², $I_e = 332$ μ A/cm²로 나타났으며, 방출효율은 $V_{ps} = 12$ V에서 0.71 %로 가장 높게 나타났다. 방출전류와 효율 특성 모두



(a)



(b)

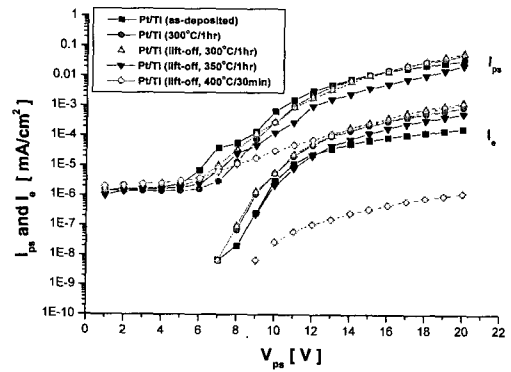
그림 6. 구동전압에 따른 Au/NiCr, Pt, Pt/Ti OPPS 전계 방출 소자의 (a) 구동전류 I_{ps} 및 방출 전류 I_e 와 (b) 방출 효율의 차이.

Fig. 6. Difference of (a) driving current I_{ps} and emission current I_e , and (b) emission efficiency of Au/NiCr, Pt, and Pt/Ti OPPS field emitter with increasing the V_{ps} .

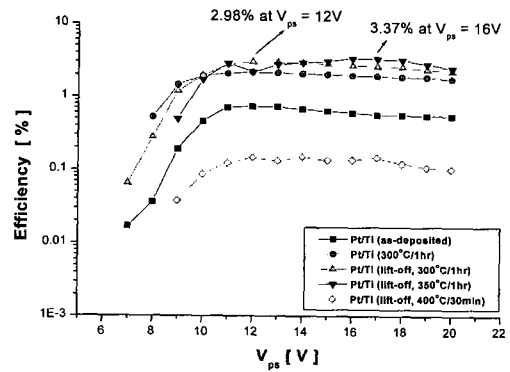
에서 Pt/Ti 전극이 상대적으로 우수한 특성을 나타내고 있다. 이는 완충 전극으로 이용한 Ti층이 흡착성이 뛰어나 Pt전극이 OPPS 표면에 균일하게 전계를 인가해 줄 수 있기 때문으로 판단된다.

그림 7은 Pt/Ti OPPS 전계 방출 소자에 대한 열처리 공정과 구동전극의 유무에 따른 방출특성이다. 그림 7(a)는 열처리 전, 후, 그리고 동일한 조건에서 addressing 전극이 형성된 소자에 대해서 비교 분석하였다. 300 °C에서 1 시간동안 질소분위기에서 열처리 한 소자는 열처리하기 전보다 방출효율이 $V_{ps} = 12$ V에서 2 %로 나타나 0.71 %보다 1.29 % 향상되었다.

이는 열처리를 통해 OPPS 표면의 다수의 결정립 경계와 무수한 미세 다공질 간의 흡착성 개선으로 면저항이



(a)



(b)

그림 7. 어드레싱 전극이 적용된 Pt/Ti 전계 방출 소자를 열처리 했을 경우 (a) 구동전류 I_{ps} 및 방출 전류 I_e 와 (b) 방출 효율의 변화.

Fig. 7. Change of (a) driving current I_{ps} and emission current I_e , and (b) emission efficiency of Pt/Ti OPPS field emitter which has the addressing electrode.

3.4 k Ω 에서 958 Ω 으로 현저히 감소하여 전압강하가 줄어들어 효율적으로 전계가 인가됨에 의한 것으로 확인된다.

그러나 400 °C에서 30분간 열처리를 하면 면저항이 4.1 k Ω 으로 급격히 증가하게 되어 효율적인 전계 인가가 힘들어지게 되어 특성이 나빠지는 것으로 판단된다. 그리고 addressing 전극이 있는 경우가 없는 것에 비해 구동전류 50 mA/cm²에서 57 mA/cm²으로 약간 증가하였지만, 방출전류는 888 μ A/cm²에서 1.3 mA/cm²로 크게 증가한 것을 알 수 있다. 이는 addressing 전극에 의해서 직렬저항이 감소함에 따라 전압 강하가 줄어들어 OPPS 에미터 전극 전체에 균일하고 효율적으로 전계가 인가되었음을 보여주는 결과이다. 그림 7(b)는 열처리 시간에 대한 방출 효율을 나타낸 그래프이다.

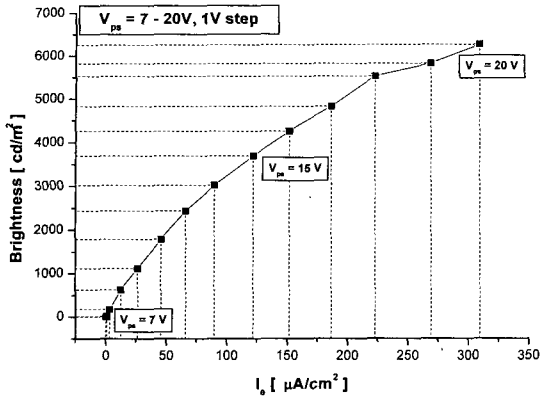


그림 8. V_{ps} 와 I_e 변화에 대한 Pt(5 nm)/Ti(2 nm) OPSS 전계 방출 소자의 P22G 형광체 밝기 변화
 Fig. 8. Variation of brightness of Pt/Ti OPSS field emitter as the I_e and V_{ps} is increased.

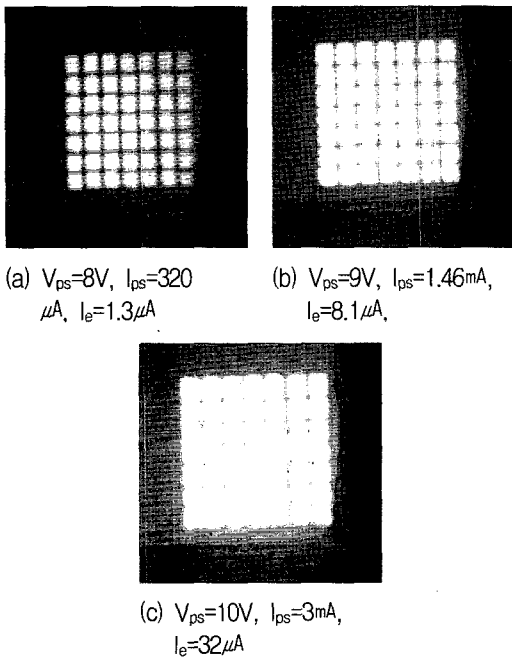


그림 9. Pt/Ti OPSS 전계 방출 소자의 P22G 형광체 발광 특성
 Fig. 9. Excitation of P22 green phosphor using Pt/Ti OPSS field emitter.

Addressing 전극을 포함하고 300 °C-1hr 열처리한 Pt/Ti의 에미터의 경우 $V_{ps}=12 V$ 에서 최대 2.98 %의 높은 효율이 나타났으며, 350 °C-1hr 열처리한 경우 $V_{ps} = 16 V$ 에서 효율이 3.37 %로 가장 높은 효율을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 이는 350 °C-1hr이상의 열처리 온도에서 방출 가능 영역의 감소로 인해 방출 전류가 약간 감소하여 효율이 증가하였다. 반면에 400 °C-30 min에서는 방출 가능 영역이 상 변형으로 인해 결선이

제대로 이루어지지 않아 효율이 가장 낮은 특성을 보였다.

그림 8에는 Pt/Ti를 증착한 OPSS 전계방출 소자에 대해 CS-100A 휘도계를 사용하여 상부전압을 8~20 V로 점진적으로 증가하면서 방출전류에 대한 휘도 측정 결과이다. 이 경우 15 V에서 3600 cd/m^2 , 20 V에서 6000 cd/m^2 이상의 높은 휘도를 나타내었다.

그림 9(a) 사진은 V_{ps} 에 8 V가 인가되었을 때의 발광 사진이다. 누설 전류는 320 μA 고, 방출 전류는 1.3 μA 가 흘렀다. 이때의 휘도는 60 cd/m^2 를 나타내었다. 그림 9(b)의 사진은 V_{ps} 가 9 V 인가되었을 때의 발광 사진이다. 누설 전류는 1.46 mA고, 방출 전류는 8.1 μA 가 흘렀다. 휘도는 350 cd/m^2 를 나타내었다. 그림 9(c)는 V_{ps} 에 10 V가 인가되었을 때의 발광 사진이고 누설 전류는 3 mA, 방출 전류는 32 μA 가 흘렀다. V_{ps} 를 8 V에서 10 V까지 변화 시켰을 때 누설 전류는 10배 정도 증가하는데 반해, 방출 전류는 24배의 증가율을 보여 효율이 증가함을 알 수 있다. 이때의 휘도는 1100 cd/m^2 를 나타내었다. 위의 사진에서 보듯이 실제로 수십 μA 로 방출전류가 흐르면 직진성이 매우 우수하여 전자빔의 분산이 적어 별도의 집속전극을 사용하지 않고 밝은 빛을 내는 것을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 다양한 에미터 금속 재료를 형성하여 산화된 다공질 폴리실리콘 전계방출 소자를 제조하였으며 다양한 열처리 효과가 산화된 다공질 폴리실리콘 전계방출소자의 특성에 미치는 영향에 대해서 조사하였다. 구동전극(addressing electrode)을 가지면서 300 °C-1hr 열처리한 Pt/Ti 에미터는 방출효율이 최대 2.98 %의 높은 효율을 나타내었으며, 350 °C-1hr 열처리를 실시한 경우 $V_{ps} = 16 V$ 에서 3.37 %의 가장 높은 효율을 나타내었다. 이는 열처리를 통해 OPSS 표면의 다수의 결정립 경계와 무수한 미세 다공질 간의 흡착성을 개선 시켜 면 저항을 감소시키는 것으로 확인되었다. 그리고 OPSS 전계 방출 소자를 디스플레이소자로 적용하기 위해 형광체 발광 특성을 조사해 본 결과, 900 °C-50 min의 산화 후 Pt(5 nm)/Ti(2 nm) 에미터 전극을 사용하여 제조된 OPSS 전계방출소자의 경우 20 V에서 6000 cd/m^2 이상의 높은 휘도를 나타내었다.

참고 문헌

- [1] C. A. Spindt, I. Brodie, L. Humphrey, and E. R. Westerberg, "Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones," *J. Appl. Phys*, Vol. 47, pp. 5248-5263, 1976.
- [2] Kusunoki. T., and Suzuki. M., "Increasing emission current from MIM cathodes by using an Ir-Pt-Au multilayer top electrode," *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 47, pp. 1667-1672, 2000.
- [3] S. Uemura, T. Nagasato, J. Yotani, T. H. Kurachi, and H. Yamada, "Large Size FED with Carbon Nanotube Emitter," *SID'02 Digest*, p. 1132, Sanjose, USA, 2002.
- [4] N. Negishi, T. Chuman, S. Iwasaki, T. Yoshikawa, H. Ito, and K. Ogasawara, "High Efficiency Electron-Emission in Pt/SiOx/Si/Al Structure," *J. Appl. Phys.*, Vol. 36, p. 939, 1997.
- [5] M. Okuda, S. Matsutani, A. Asai, A. Yamano, K. Hatanaka, T. Hara, and T. Nakagiri, "Electron Trajectory Analysis of Surface Conduction Electron Emitter Displays (SEDs)," *SID Symposium Digest 29*, p. 185, California, USA, 1998.
- [6] Y. Nakajima, A. Kojima and N. Koshida, "A solid-state light-emitting device based on excitation of ballistic electrons generated in nanocrystalline porous poly-silicon films," *Jpn. J. Appl. Phys*, Vol. 41, pp. 2707-2709, 2002.
- [7] T. Komoda, Y. Honda, T. Hatai, Y. Watabe, T. Ichihara, K. Aizawa, Y. Kondo, and N. Koshida, "Fabrication of Ballistic Electron Surface-Emitting Display on Glass Substrate," *SID'01, Technical Digest*, p. 428, 2000.
- [8] Seong-Chan Bae, Sang-Kug Han, and Sie-Young Choi, "Oxide-thickness effects on the field-emission characteristics of an oxidized porous poly-silicon field emitter," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 43, pp. 1053-1055, December 2003.
- [9] S. K. Han, S. I. Kwon, S. C. Bae, and S. Y. Choi, "Effects of the thermal annealing on the field emission characteristics of an oxidized porous poly-silicon field emitter," *IDW'04*, pp. 1233-1236, Niigata, Japan, 2004.

저 자 소 개



한 상 국(정회원)
 2003년 호남대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 2005년 경북대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 2005년 3월~현재 매그나칩
 반도체 제품개발 DDI
 3팀 근무.

<주관심분야 : 디스플레이 구동 IC>



박 근 용(정회원)
 1998년 상주대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 2001년 경북대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 2005년 경북대학교 전자공학과
 박사 졸업.

<주관심분야 : 반도체 소자, 디스플레이, 바이오
센서>



최 시 영(정회원)
 1972년 경북대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1974년 경북대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 1986년 일본 동북대학교 반도체
 공학과 박사 졸업.

1986년~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부
교수

<주관심분야 : 디스플레이, 수소센서, 바이오센서,
구리전기도금>