

상압에서 제조한 포토캐소드의 전자방출 특성에 관한 연구

정호수^{1,a}

¹ 수원대학교 전자재료공학과

A Study on Electron Emission Characteristics of Photocathode Formed Under Condition in N₂ Atmosphere

Hyo-Soo Jeong^{1,a}

¹ Department of Electronic Materials Engineering, The University of Suwon, Hwaseong 440-746, Korea

(Received April 14, 2014; Revised April 21, 2014; Accepted April 23, 2014)

Abstract: Photoemission is a process in which photons are converted into free electrons. Photocathodes are the typical materials for the process. They emit electrons when a light is irradiated upon. The traditional method of manufacturing photocathodes is complicated, requires specialized equipment, and is limited very small sized samples. Cs₃Sb photocathode was formed on a substrate in N₂ atmospheric conditions. The photocathode formation was a gas phase reaction with the substrate. Vacuum devices were made to test electron emission characteristics of the formed photocathode. Visible light of wavelength 475 nm was used for the primary light source. The results showed high current density and long term stability of the photoelectron emission.

Keywords: Photocathode, Photoelectron, Primary light source, Photoemission, Sensitivity

1. 서론

포토캐소드 (photocathode)는 빛을 받으면 전자를 방출하는 소재로 광전자 방출에 이용된다. 광전자방출 메커니즘은 광전효과로 잘 알려져 있다. 일함수 (work function, eV)보다 많은 에너지를 가진 파장의 빛을 포토캐소드에 조사하면 기저상태에 있던 전자가 에너지를 받아 진공준위로 방출하게 된다. 광전효과에 의한 광전자방출 방정식은 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} h\nu &= E_{kin} + \phi \\ &= \frac{1}{2}mv^2 + \phi \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $h\nu$ 은 빛 에너지, E_{kin} 은 방출된 전자의 최대 운동에너지 (the maximum kinetic energy), ϕ 은 일함수, h 는 플랑크 상수 (Planck's constant), ν 은 빛의 진동수를 나타낸다. 이 식으로부터 빛 에너지 $h\nu$ 가 크면 클수록 전자의 운동에너지가 커져 기저상태의 전자가 더 많이 방출됨을 알 수 있다.

그림 1에 광전자방출의 band diagram이 나타나 있다. 포토캐소드에서 광전자방출을 유도하는 광원 (primary light source)으로는 일반적으로 에너지가 높은 UV광원 (ultra-violet light source)을 사용한다.

a. Corresponding author; hyosoo@suwon.ac.kr

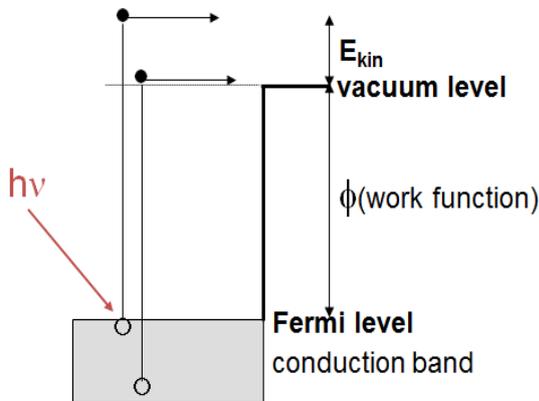


Fig. 1. Photoelectron emission from metal.

빛 에너지는 아래의 식으로 주어지므로

$$E = h\nu = \frac{h}{\lambda} \tag{2}$$

파장이 짧을수록 높은 에너지를 갖는다. 따라서 자외선 영역의 빛이 가시광선보다 높은 에너지를 갖기 때문에 광전자방출에 유리하다. 이것이 포토캐소드가 가시광선 보다는 자외선에 민감하게 반응하는 이유이기도 하다.

포토캐소드는 제작공정이 일반적으로 극고진공을 (10^{-10} torr 이하) 요구하기 때문에 매우 복잡하고 까다롭다 [1-3]. 또한 제작되는 면적도 작다. 이로 인하여 좋은 전자방출 특성을 가지고 있음에도 불구하고 그 응용이 일반적인 범용의 전자소자보다는 특수한 광전자소자에 한정되어 있다. 그러므로 포토캐소드의 전자방출 특성을 살려 일반적인 전자소자에 응용하기 위해서는 제작 공정이 복잡하지 않아야 하며 전자방출을 유발하는 광원이 자외선 영역보다는 가시광영역인 것이 필요하다.

응용 분야는 방출된 전자를 이용하는 분야 [4] (electron source), 소재의 반도체 성질을 이용하는 분야 [5], 그리고 방출된 전자와 다른 소재와 융합하는 분야로 크게 나눌 수 있다.

본 논문에서는 Cs_3Sb 포토캐소드를 진공이 아닌 상압 조건에서 제작하였고, 제작된 포토캐소드의 전자방출 특성을 측정하였다.

2. 실험 방법

2.1 포토캐소드 제작

그림 2에 포토캐소드를 형성하는 glove box 장치를 개략적으로 나타내었다. 전체 시스템은 load lock chamber, box coater가 딸린 process chamber, oven으로 구성되어 있으며 작업을 위하여 glove가 부착되어 있다. Chamber의 소재는 stainless steel로 되어 있으며 앞면에 투명한 quartz 유리가 부착되어 쉽게 작업을 할 수 있다. Glove는 공기의 투과를 차단할 수 있는 상용화된 특수한 재질로 되어 있다.

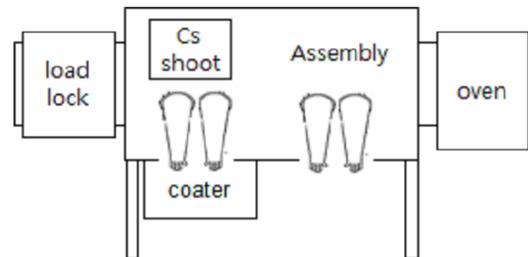


Fig. 2. Glove box system for photocathode thin film deposition in N_2 environment.

포토캐소드와 소자를 제작하는 공간인 process chamber에는 불활성 기체인 Ar 또는 N_2 를 공급하여 O_2 와 H_2O 의 농도가 각각 0.01 ppm 이하로 유지되게 하였다.

포토캐소드는 알카리 금속계열 중 상대적으로 양자 효율이 높은 [6] Cs_3Sb 를 선택하였다. Box coater에서 금속박막을 제작하고, Cs shoot zone에서 Cs_3Sb 포토캐소드를 형성하였다. Thermal evaporation 방식으로 기체 상태인 Cs vapor를 Sb 과 반응시켜 Cs_3Sb 포토캐소드를 형성하였다. 기상 (gas phase) 반응식은 아래와 같다.



원형으로 형성된 포토캐소드는 지름이 3.2 cm이며 면적은 8 cm^2 이다. 이것은 소자에서 음극 역할을 한다.

2.2 소자 제작

소자는 anode plate, cathode plate, 그리고 frame으로 구성되어 있다. Frame은 anode plate와 cathode plate의 간격을 일정하게 유지시켜 주는 spacer 역할을 한다. 소재는 모두 소다라임 유리이며 두께는 5 mm이다. Frame은 중간부분을 제거한 사각형 모양의 구조물로 높이가 5 mm이다. Anode plate에는 전류를 측정하기 위하여 Cu 박막이 증착되어 있으며 cathode plate에 포토캐소드가 형성되어 있다.

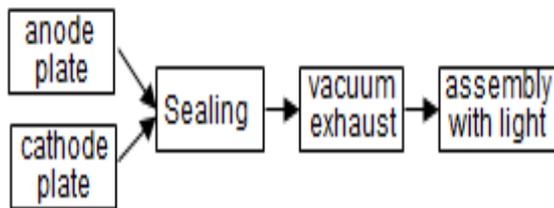


Fig. 3. Manufacturing process of photocathode device.

그림 3에 포토캐소드 소자의 제작 순서가 나타나 있다. Cathode plate 위에 frame을 놓고 그 위에 anode plate를 정렬시켜 소자를 제작하였다. 일반적인 진공소자 제작 방법으로 진공 패키징을 하여 소자의 내부가 진공상태를 유지하도록 하였다.

2.3 전류 측정

그림 4에 전류측정을 위하여 완성된 포토캐소드 소자가 도식적으로 나타나 있다. 전자방출을 유발시키는 광원으로는 청색 LED 면광원을 사용하였다. 청색 영역이 가시광 중 에너지가 가장 높은 영역이기 (3.0 ~ 3.1 eV) 때문이다. 광원은 파장이 달라지면 빛 에너지가 달라지기 때문에 전자방출에 직접적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 청색 광원으로 주파수 475 nm의 단일 파장을 사용하였다.

높은 전계를 형성하여 가능한 많은 전류를 이끌어 내기 위하여 anode 전압을 일정한 값인 10 kV로 고정시키고 전류를 측정하였다. 또한 시간이 경과함에 따라 전류의 변화가 어떻게 일어나는지를 함께 측정하였다.

포토캐소드가 광원에서 나온 빛을 받으면 전자를 방출하고, anode에 전압을 걸어주면 소자 내부에 전계가

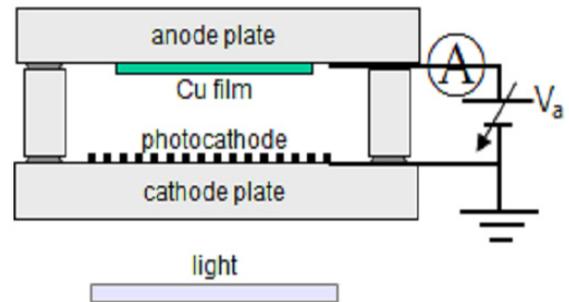


Fig. 4. Schematic diagram of photocathode device test structure.

형성되며, 이 때 방출된 전자가 anode로 가속된다. 고전압은 20 kV까지 인가할 수 있는 가변형 전력공급기를 사용하였다. 전류는 전압을 인가할 때 동시에 측정된다.

3. 결과 및 고찰

시스템 내의 분위기 조절을 위하여 Ar과 N_2 를 각각 사용하여 초기에 Cs_3Sb 포토캐소드를 형성한 후 전류를 측정할 결과 전류 측정치에 큰 변화가 없었다. 이에 따라 모든 작업을 N_2 분위기 하에서 진행하였다. 모니터 상에 나타난 O_2 와 H_2O 의 농도는 모두 0.01 ppm 이하로 엄격하게 제어되었다. 이 조건에서 형성된 Cs_3Sb 포토캐소드는 O_2 와 H_2O 의 영향을 거의 받지 않는다는 것을 확인하였다.

Table 1. Average measured anode current depending on applied anode voltages.

Applied voltage	Average measured current
5 kV	88 μA
10 kV	106 μA
15 kV	118 μA

표 1은 anode 인가전압에 따른 전류 측정치이다. 광원과 소자의 이격거리를 0으로 하여 측정된 전류값이다. 고전압을 인가할 때 전계가 너무 강하여 절

연과피가 일어나면 방전현상이 일어날 수 있다. 그림 4에서 15 kV의 전압을 음극에 인가하면 전계강도가 3 kV/mm가 된다. 음극과 양극간의 거리 1 mm에서 10 kV를 인가하는 고전압 전계방출소자와 비교하면 전계강도가 3분의 1 이하로 아주 낮은 편이다. 상대적으로 낮은 전계강도로 인하여 측정 시 어떤 arcing 현상도 일어나지 않았다.

표 1은 전압이 높게 인가 될수록 강한 전계가 형성되어 방출된 전자를 더 많이 anode로 가속시킴을 나타낸다. 그러나 측정치가 직선적으로 비례하지 않음을 알 수 있다. 이것은 높은 전계가 포토캐소드의 경우 전자방출을 유발하지 않는다는 사실과 소자내의 진공도와 이에 따른 전자의 scattering과 관련이 있을 것으로 본다.

Cs_3Sb 포토캐소드는 화합물반도체이다 [7]. 포토캐소드의 전자방출 메커니즘은 W. E. Spicer의 3단계 이론으로 잘 설명되어 있다 [8]. 포톤이 포토캐소드에 충격을 가하면 가전자대에 있는 전자가 포톤의 에너지를 흡수하여 전도대로 여기된다. 여기된 전자는 포토캐소드의 표면 근처로 확산되며, 이 때 전자가 진공장벽을 극복할 수 있는 충분한 에너지를 가지고 있으면 진공으로 방출된다. 양자효율은 아래의 식으로 표시된다.

$$\eta(\nu) = (1 - R) \frac{\alpha_{PE}}{\alpha} \left(\frac{1}{1 + 1/\alpha L} \right) p_s \quad (4)$$

$\eta(\nu)$: 양자효율

R : 반사계수

α : 포톤의 광 흡수계수

α_{PE} : 전자가 진공 준위보다 높은 에너지 준위로 여기될 때의 흡수계수

L : 전자의 확산 거리

p_s : 전자가 진공으로 방출되는 확률

ν : 빛의 진동수

위의 식은 광 흡수, 전자의 확산 및 방출의 3단계를 잘 나타내 주고 있다. 반도체는 금속과 비교하여 반사계수가 작고, 가전자대에서 광 흡수계수가 커서 양자효율이 매우 높다. 식 (4)의 물리학적 의미는 여기된 전자가 충분한 운동에너지를 가지면 표면으로 확산될 때 상대적으로 확산거리 (L)가 길어도 격자

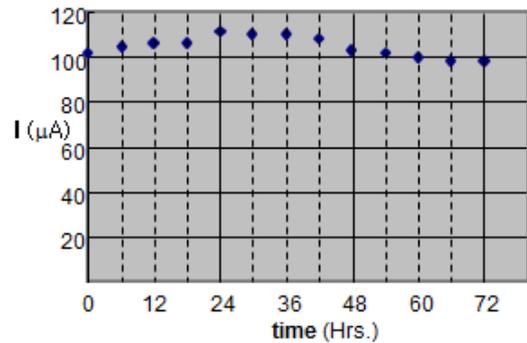


Fig. 5. Stable electron emission characteristics of photocathode formed in N_2 atmospheric conditions.

와 충돌하지 않고 바로 방출에 기여한다는 것을 나타내준다. 그러므로 전자가 높은 운동에너지를 가지기 위해서는 에너지가 높은 광원을 이용하거나 또는 주어진 광원에 포토캐소드가 민감하게 반응하는 특성이 필요함을 알 수 있다.

그림 5는 질소 분위기 하에서 제작된 Cs_3Sb 포토캐소드의 전자방출 특성곡선이다. 광원과 소자의 이격거리를 0으로 하여 측정한 전류 값이다. 형광체를 적용한 소자의 발광테스트는 그림 6에 나타나 있다.

Anode 전압을 10 kV로 고정하고 전류를 측정하였을 때 평균적으로 $100 \mu A$ 정도의 전류 값을 나타내었다. 이것을 전류밀도로 환산하면 포토캐소드의 면적이 8 cm^2 이므로 약 $12.5 \mu A/\text{cm}^2$ 가 된다. 전계방출소자로 anode에 동일한 10 kV를 인가하고 휘도 $10,000 \text{ cd}/\text{m}^2$ 의 면광원을 제작할 때 평균전류밀도가 $12 \mu A/\text{cm}^2$ 정도가 된다 [9]. 이렇게 볼 때 Cs_3Sb 포토캐소드로 얻은 전류밀도가 매우 높은 수준임을 알 수 있다. 이것은 또한 Cs_3Sb 포토캐소드가 파장 475 nm의 청색 영역의 광원에 대하여 민감하게 반응한다는 것을 나타낸다.

그림 5는 또한 72시간 연속적으로 전자방출을 측정하였을 때 전류가 어떻게 변하는 지가 나타나 있다. 중간 부분에 약간의 변화가 나타나지만 오차범위 안에 있다. 전체적인 측정 전류는 큰 변화 없이 장시간 일정한 값을 유지한다는 것을 알 수 있다. 이것은 Cs_3Sb 포토캐소드에서 연속적인 전자방출이 안정적으로 일어난다는 것을 의미한다. 장시간 안정적인 전자방출은 에미터(emitter)에 요구되는 가장 중요한 특성 중 하나이다.

전체적인 연구 결과는 3가지 중요한 의미를 지닌다.

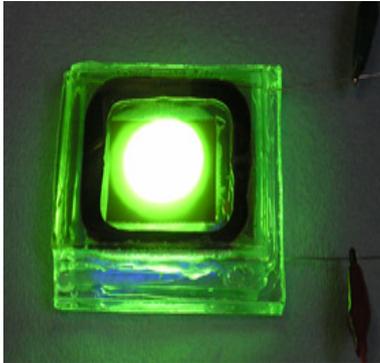


Fig. 6. Light emission of photocathode device with green phosphor at anode voltage of 10 kV.

첫째, 상압 분위기 조건에서 Cs_3Sb 알카리 금속의 포토캐소드를 제작할 수 있다는 점이다. 일반적으로 알려진 대부분의 포토캐소드는 극고진공에서 제작된다. 연구결과는 진공이 아닌 상태에서 엄격히 상압 분위기를 제어하면 포토캐소드를 제작할 수 있다는 것을 나타낸다. 이것은 극고진공 조건과 비교할 때 공정조건과 공정이 경우에 따라 매우 단순해질 수 있다는 것을 나타낸다.

둘째, 상압 분위기 조건에서 제작된 Cs_3Sb 포토캐소드가 우수한 성능을 나타낸다는 점이다. 그림 3에 나타난 전자방출 특성은 포토캐소드의 성능이 상압 분위기 조건에 영향을 받지 않고 열화 (degradation) 되지 않는다는 것을 나타낸다. 이것은 양질의 우수한 포토캐소드를 고가의 진공장비가 아닌 일반장비로 저렴하게 제작할 수 있다는 것을 나타내 준다.

셋째, 상압 분위기 조건에서 제작된 Cs_3Sb 포토캐소드가 선택적인 가시광영역에서 감지도 (sensitivity) 가 좋다는 점이다. 일반적으로 대부분의 포토캐소드는 전자의 운동에너지를 최대한 높이기 위하여 UV광원을 사용한다. 가시광에 대한 감지도가 좋다면 까다로운 UV광원을 굳이 사용할 필요가 없다. UV광원 사용은 포토캐소드의 일반적인 전자소자 응용에 걸림돌이 되는 원인 중 하나이다. 따라서 포토캐소드의 응용을 확대하기 위해서는 가시광영역에서 안정적인 전자방출을 유도하는 최적의 광원을 찾는 것이 중요하다.

4. 결론

진공이 아닌 질소 분위기 하에서 알카리 금속을 기본으로 하는 Cs_3Sb 포토캐소드를 제작하였다. 소자를 제작하여 전자방출 특성을 측정하였다. 전자방출을 유도하는 광원으로는 가시광영역인 475 nm의 LED 면광원을 사용하였다. 전자방출은 장시간 (72시간 이상) 매우 안정적으로 지속되었으며 전류밀도는 $12.5 \mu A/cm^2$ 이었다. 이것은 전계방출소자로 면광원을 제작할 때 평균전류밀도와 비교되는 우수한 전자방출 특성이다.

결론적으로 연구 결과를 요약하면 상압에서 질소 분위기 조건에서 제작된 Cs_3Sb 포토캐소드는 일반적인 포토캐소드 제조와 비교할 때 제작공정이 단순하여 저렴하게 제작할 수 있고, 선택적인 가시광영역의 광원에 감지도가 좋은 특성을 나타내었다. 이런 장점과 특성을 살리면 전자원 (electron source) 뿐만 아니라 광원 등 일반적인 전자소자로 응용이 더욱 확대될 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 2013학년도 수원대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 논문임.

REFERENCES

- [1] S. H. Kong, D. C. Nguyen, S. J. Russell, C. A. and Timmer, *Nucl. Instrum. Methods A*, **358**, 272 (1995).
- [2] P. Michelato, *Nucl. Instrum. Methods A*, **393**, 455 (1997).
- [3] J. W. J. Verschuur, B. M. Van Oerle, G. J. Ernst, D. Bisero, and W. J. Witteman, *Nucl. Instrum. Methods B*, **139**, 541 (1998).
- [4] A. W. Bett, F. Dimroth, G. Stollwerck, and O. V. Sulima, *Appl. Phys.*, **69**, 119 (1999).
- [5] S. Donati, *Photodetectors* (Prentice Hall PTR, 2000).
- [6] A. H. Sommer, *Photoemissive Materials* (John Wiley & Sons, New York, 1968) p. 130.
- [7] A. Natarajan, A. T. Kalgatgi, B. M. Baht, and M. Satyam. *J. Appl. Phys.*, **90**, 6434 (2001).
- [8] W. E. Spicer, *Phys. Rev. Lett.*, **11**, 243 (1963).
- [9] J. O. Choi, H. S. Jeong, D. Pflug, A. I. Akinwande, and H. I. Smith, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 3050 (1999).