

# 다이아몬드를 이용한 전자 Emitter

이 상 현 / 선문대학교 전자공학부 교수

현재 사용되고 있는 전자디바이스 소자의 기능은 급속도로 변화하고 있는 정보화 사회로의 진입이라는 시대적 요구와 함께 필요한 기능과 수요를 확보하기 위하여 지속적으로 발전하고 있다. 현재까지 연구개발 결과로 몰리브덴과 실리콘으로부터 전계에 의한 전자 방출을 응용한 Flat panel display (FPD)의 실현 가능성은 확보하였으나, 전극의 침예화를 기하는 기술이 아직 까지 개발 도상 단계에 있으며, 소자의 경량화와 저전압 구동의 실현을 위하여 해결하여야 할 많은 과제를 안고 있다.

구체적인 이유로는 음극 재료가 되는 몰리브덴과 실

리콘등의 일 함수와 전자친화력이 크고, 충분한 양의 전자방출을 가능하도록 하기 위하여는 고전압을 인가하여야 하는 구조적 문제점이 있다. 최근 다이아몬드의 전자친화력이 매우 작고, 조건에 따라 마이너스의 전자친화력( Negative Electron Affinity , NEA )을 나타내는 현상이 발견 되었으며, 다이아몬드를 전자 방출 원으로 사용하는 Flat panel display (FPD)의 상용화를 위한 연구가 세계적으로 급속도로 진행되고 있다.

전자친화력과 일함수는 전자가 외부로 방출됨에 따른 Potential barrier의 높이가 기준이 된다. 금속은 일함수가 적용되며, 반도체의 경우에는 전자친화력이 적

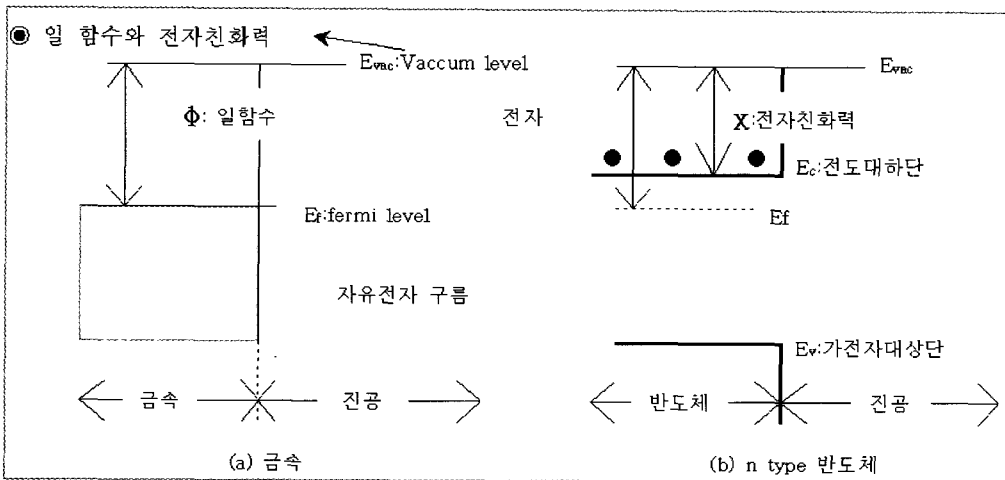


그림 1 일 함수와 전자친화력의 정의

용된다. 그림1에서는 각각의 정의를 나타내었다.

금속과 반도체에서 일함수  $\phi$ 는 진공준위와 Fermi level과의 차로 정의된다.

$$\phi = E_{VAC} - E_F \text{ ----- (1)}$$

금속의 경우 Fermi level에 위치하는 전자가  $E_{VAC} - E_F$ 에 해당하는 에너지를 얻게 되면 진공 준위로 역기되어 결정 밖으로 방출된다. 한편 반도체의 경우에는 Fermi level이 금지대 내에 존재하며, 전자는 Fermi level 보다 높은 전도대의 하단에 존재한다. 더욱이 일함수보다 적은 에너지 즉  $E_{VAC} - E_F$ 의 에너지를 얻게 되면 진공준위에 까지 역기 된다. 이러한 에너지를 전자 친화력이라 부르며, 다음과 같이 정의된다.

$$\chi = E_{VAC} - E_F \text{ ----- (2)}$$

금속으로부터 전자를 외부로 방출하는 극성의 전계 (V/cm)가 존재하며, 음극을 -로 양극을 +로 바이아스 전압을 인가하면 Potential barrier는 낮게되어 전자는 그 barrier를 터널효과로 투과하게 된다. 이경우의 방출 전류는

$$I \sim aE^2 \exp\left(-\frac{b\phi^{2/3}}{E}\right) \text{ ----- (3)}$$

이 된다. a와 b는 정수,  $\phi$ 는 일함수, E는 음극과 양극간의 평균 전계가 된다. (3)식은 Flower-Nordheim식으로서 우리에게 친숙한 식이다. 식(3)에서 지수함수에 부착된  $\phi$ 가 작게 되면 이 지수함수는 증가한다. 따라서, 일함수가 작은 재료를 음극으로 사용하면 커다란 방출 전류가 기대 된다. 반도체에서는 전자친화력이 일함수로 대체되는 물리량으로서 전자친화력이 작게되면 같은 결과를 기대할 수 있게 된다. 특히 NEA를 나타내는 다이아몬드를 사용하게 되면 전자 방출 특성은 현저하게 개선될 여지가 충분하다. 이러한 이점을 활용하고자 다이아몬드 표면에 전계를 집중시켜 방출전류를 보다 크게 할수 있도록 특수한 형태를 갖는 전계 전자방출의 전기적 특성을 측정하였다. 수소가

스에 체적비로 약 2%의  $C_2H_5OH$ , 아세톤 등의 유기 용제로 부터 휘발가스를 혼합하였다. 이 혼합가스에 2000°C 이상으로 가열한 필라멘트에 접촉시키면, 메틸 라디칼  $CH_3^*$ 가 발생한다. 이  $CH_3^*$ 가 필라멘트의 바로 밑에 배치된 다이아몬드 미립자로 처리한 Si 기판에 접촉되면, 기판 위에는 다이아몬드 막이 합성된다. 이러한 합성법을 열 필라멘트 CVD법이라 한다. 그러나 다이아몬드의 합성 메카니즘에 관하여는 명확하게 밝혀진 바는 없다. 다이아몬드박막을 열 필라멘트CVD법으로 합성할 경우에는, 특수한 형상의 Si 기판을 사용한다. 즉 기판에는 무수한 구멍이 있으며, 구멍의 깊이는 10  $\mu m$ 이며, 직경은 수  $\mu m$ 정도가 된다. 무수한 구멍이 있는 부분을 Porus Si 이라 하며, 양극 산화법으로 제작된다. 이러한 기판에 다이아몬드를 체적하면 그림2(a)에서 제시하는 형태가 된다.

다음으로 Si 기판에 HF,  $HNO_3$ ,  $CH_3COOH$ 의 혼합액으로 화학적으로 제거하게 되면 그림(b)에서 제시하는 화학적으로 내구성 있는 다이아몬드 막이 남게 된다. 그림3(a)는 실제로 합성된 주상 구조를 갖는 다이아몬

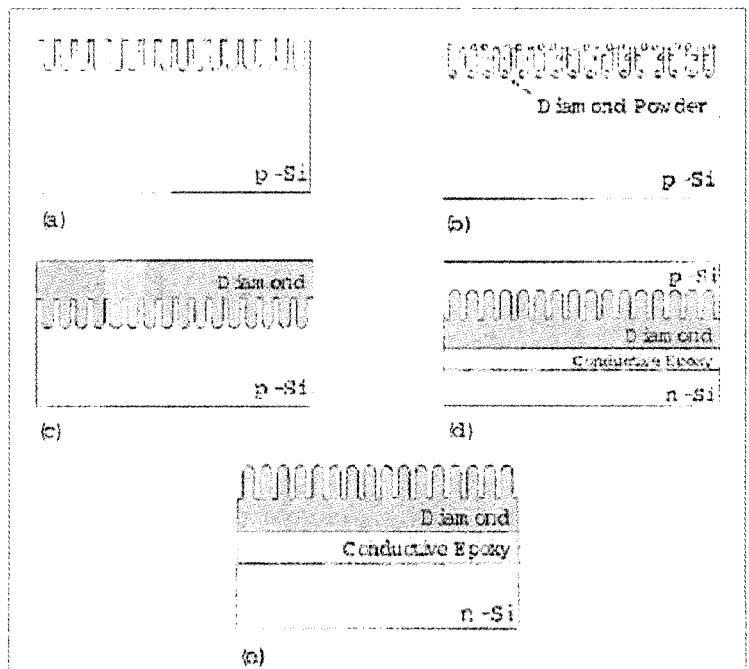


그림 2 주상 구조 전극의 제작 과정

드 막의 SEM사진을 나타낸다. 무수하고 미세한 다이아몬드가 합성되어 있다. 이러한 상태를 이후로 주상구조라 한다. 침단의 곡면의 반경은 약  $1.5\mu\text{m}$ 이며, 높이는 약  $8\mu\text{m}$ 이다. 이러한 주상 구조를 갖는 다이아몬드를 전자 방출원으로 사용하게 되면 침단에 전계가 집중하게 된다. 따라서 낮은 표면 전위 또는 NEA의 조건에 전계 집중이라는 또 다른 이상적인 조건이 중복되어 저전압구동이라는 조건에서도 다량의 전자 방출이 기대 된다.

그림3은 평탄한 Si 기판위에 합성한 다이아몬드박막을 나타낸다. 삼각형 또는 사각형의 블록이 관측되고 있으나, 각각의 블록은 단결정 다이아몬드이며, 이것이 모자이크상을 이루며 전체 박막을 구성하고 있다.

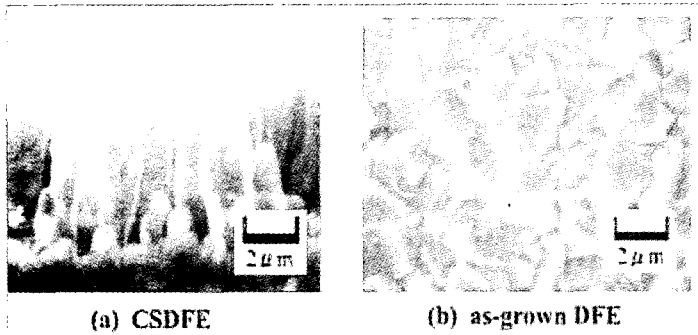


그림 3 다결정 다이아몬드의 표면

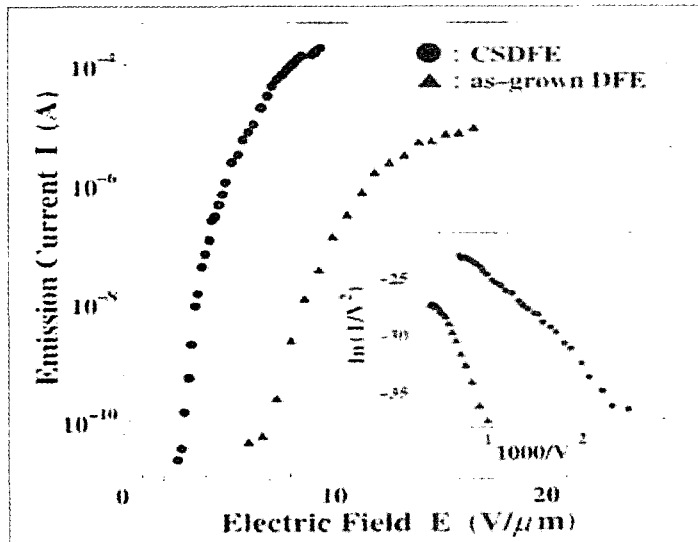


그림 4 다이아몬드로부터의 전계 전자 방출 특성

따라서 이 다이아몬드 박막은 다결정이 된다. 현저한 요철을 갖지 않는 그림3에서 제시한 박막과 주상구조를 이루고 있는 박막에 의한 전계 전자 방출 특성을 비교한 결과를 그림4에 제시한다. 그림4는 그림2에서 제시된 주상구조를 갖는 면을 음극면으로 한 결과와 평탄한 면을 음극면으로 하여 전계 전자 방출특성을 비교한 결과이다. 주상구조의 시료에 대한 특성 (●)에서는 전계가  $2\text{V}/\mu\text{cm}$ 가 되면 급격한 전류의 증가를 볼 수 있다.  $10^6\text{A}$ 의 전류를 얻기 위하여 전계는 불과  $5\text{V}/\mu\text{cm}$  만 필요하다. 한편 평탄한 면을 음극으로 사용 한 경우 에는 약  $6\text{V}/\mu\text{cm}$ 에서 전류는 증가되었으며,  $10^6\text{A}$ 의 전류를 얻기 위하여 전계는  $10\text{V}/\mu\text{cm}$  가 필요하여, 주상구조의 박막과 비교하여 높은 전압으로 구동하여야 한다.

전계 E에 대한 방출전류 I의 의존성은 (3)식으로 나타낼 수 있다. 인가 전압 V를 음극-양극간의 거리 d로 나눈 량을 평균 전계 E라고 하면,  $E=V/d$ 로부터 식(3)은

$$I = \frac{a}{d^2} V^2 \exp\left(-\frac{bd\phi^{3/2}}{V}\right) \quad (4)$$

(4)식의 양변을  $V^2$ 으로 나누고, 자연 로그를 취하면,

$$\ln \frac{I}{V^2} = \ln \frac{a}{d^2} - bd\phi^{3/2} \frac{1}{V} \quad (5)$$

이 된다.

$a/d^2$ 과  $bd\phi^{3/2}$ 는 일정하므로  $1/V$ 에 대하여  $\ln(I/V^2)$ 를 plot하면 그림4의 삽입도와 같은 직선을 얻을 수 있다. 주상구조 및 평탄한 시료로부터 전계 전자 방출 현상이 발생하고 있음을 알 수 있다. 그림5는 Spindt형 전극구조, 즉 양극에 glass/ITO/형광막 이라고 하는 다층구조를 이용하여 침상형태의 음극으로부터 방출된 전자가 형광막을 발광 시킨 상태를 조사하였다. 이 결과를 그림6에 제시한다. 명확하게 주상구조의 박막이 발광하고 있는 면적이 크며, 전자를 방출하고 있는 사이트도 많은 것을 시각적으로 확인할 수 있었다.

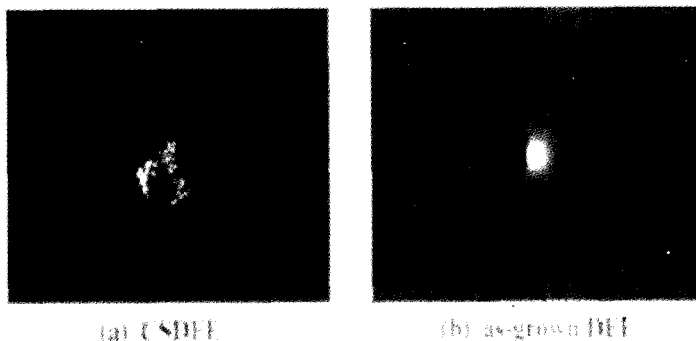


그림 5 방출전자에 의한 형광막의 발광.  
 (a) 주상구조를 갖는면을 음극으로 사용한 막의 발광.  
 (b) 평탄한면을 음극으로 사용한 막의 발광.

### 맺음말

본고에서는 음극으로부터 열적으로 방출된 전자를 이용하여 브라운관의 대체 기능으로서 주목되고 있는 Flat Pannel Display에 대하여 기술하였다. 전계에 의한 전자방출 메커니즘에 대하여 해설하였으며, 고체 표면에서 potential barrier 즉 일함수 및 전자친화력이 작은 재료 일수록

전자방출량이 커지는 현상을 개략적으로 설명하였다. 일례로서 전자 친화력이 작은 다이아몬드를 음극으로 하여 얻어진 전계 전자 방출현상을 나타내는 실제의 낮은 전계에서 전자가 방출되는 현상을 소개하였다. 방출된 전자가 양극으로 배치되어 있는 형광막을 발광시키는 현상을 확인 하였고, Flat Pannel Display의 가능성을 설명하였다.

### 참고문헌

[1] B.Pate, Diamond Electronic Properties and Applications, eds. L. S. Pan and D.R.Kania (Kluwer Academic Boston, 1995) Chap.2.  
 [2] K.Hayashi, S.Yamanaka, H.Watanabe, T.Sekikuchi, H.Okushi, and K.Kajimura, J.Appl. Phys.Lett., Vol. 81, p.744, 1997.  
 [3] J. van der Weide and R.J.Nemasish, J. Vac. Technol., Vol.B10, p.1940, 1992.  
 [4] R.F.Flower and L.W.Nordheim, Proc. R. Soc.

London, Vol.A119, p.173, 1928.  
 [5] R.Sratton, Proc. R. Soc. London, Vol. B68, p.746, 1955.  
 [6] C.A.Spindt and W.Aberth, Proc. 27th Int. Feild Emission Symp. Tokyo Japan 1977.  
 [7] I.Yashima, M.Yamagata, H.Sato, and Y.Saito, New Diamond, Vol. 9, p.28, 1993  
 [8] Y.Gurbuz, W.P.Kang, J.L.Davision, D.L.Kinser and D.V.Kems, Sensor and Actuator, Vol .B33, p.1183, 1982.  
 [9] K.Kobayashi, K.Nishimura, Y.Kawate, and T. Horikuchi, Phys. Rev., Vol. B38, P.4067, 1988.

[10] T.Ando, K.Yamamoto, M.Ishii, M.Kamo, and Y.Sato, J. Chem. Soc. Faraday Trans., Vol. 89, p. 3635, 1993.  
 [11] J.Shirafuji, and T.Sugino, Diamond and Related Material, Vol. 5, p.706, 1996.  
 [12] K.Miyata, and K. Kobayashi, J. Mater. Res., Vol.11, p.296, 1996.  
 [13] F.J.Himpfel, J.A.Knapp, J. A. Van Vechten, and D. E. Eastman, Phys. Rev., Vol. 20, P.624, 1979.  
 [14] B.B.Pate, P.M.Stefan, P.J.Jupiter, M.L.Shelk, I.Lindau, and W.E.Spicer, Vac. Sci. and Technol. Vol.19, P.349, 1993.  
 [15] J. van der Weide and R.J.Nemasish, Appl. Phys. Lett., Vol. 62, p.1878, 1993.  
 [16] K.Okano, S.Koizumi, S.Rabi, P.Silva, Gehan, and A.J.Amaratunga, Nature, Vol. 381, p.140, 1996.  
 [17] T.Sugino, K.Kuriyama, S.Kawasaki, T.Iwasaki, and J.Shirafuji, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.37, p.413, 1998.  
 [18] K.Okano, New Diamond, Vol.11, p.26, 1995.  
 [19] J.Shirafuji, and T.Sugino, Diamond and Related Material, Vol. 5, p.706, 1996.  
 [20] S.R.Silva, A.J.Amaratunga, and J.R.Barnes, Appl. Phys. Lett., Vol.71, p.1477, 1997.  
 [21] R.Stratton, Proc. Phys. Soc., Vol.B68, p.746, 1995.