

## 다이아몬드에 의한 차세대 전자에미터 개발현황

이 승 목, Toshimichi Ito  
(Seung Mock Lee, Toshimichi Ito)

### 1. 연구 배경

FED(Field Emission Display)는 현재의 액정평면표시소자가 지니고 있는 휘도, 시야각, 색채, 응답속도나 작동온도 등에 있어서의 여러가지 한계점을 극복할 수 있는 차세대 평면디스플레이 소자로서 그 실용화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. FED의 기본적인 진공마이크로 소자의 구조를 그림 1에 나타내었다. 현재 사용되고 있는 전계방출형 전자에미터는 몰리브덴(Mo) 이나 실리콘(Si) 을 이용한 Spindt형[2] microtip을 매트릭스화한 2차원 어레이로부터 진공중으로 전계방출된 전자를 가속하여 스크린상의 형광픽셀에 조사함으로써 원하는 색상 및 휘도를 얻는, 약 1 $\mu$ m 스케일의 집적회로시스템이다(그림 1a). 이러한 재료들은 표면에 강전계를 인가함에 따라 터널효과(tunneling effect)를 이용하여 일함수에 따른 전위장벽을 극복하고 고체표면으로 부터 전자를 방출시킬 수 있지만(그림 2), 이에 필요한 동작전압을 저하시키기 위해서는 국소전계  $E_m$ 을 매크로(평균)전계  $E$ 에 비해 상당량 증가시킬 수 있는 원추형의 tip 형상과 함께 소자의 어레이화가 요구된다(그림 1a). 그림 3은 tip 형상과 국소전계와의 관계를 나타내는 그래프로서, 국소전계증대인자  $\beta (= E_m/E)$ 의 형상의존성의 일례를 나타내고 있다[3]. 일반적으로 곡률반경이 약 20 nm정도인 tip이 사용되고 있으나, 그림 3에 나타낸바와 같이  $\beta$  값은 국소 구조에 강하게 의존하고 있으므로 각각의 tip을 높은 정밀도로 제작할 필요성이 있으며, 이는 FED 개발에 있어서 중요한 과제중의 하나로 인식되고 있다. 차세대 평면디스플레이로서 FED의 진공마이크로소

자는 그림 1(b)에 나타낸바와 같이 복잡한 공정의미세가공이 필요하지 않은 면방출형의 심플한 구조를 가진 저 코스트, 고효율의 시스템이 요구된다[4].

다이아몬드나 DLC (Diamond-Like Carbon), 나노튜브 등과 같은 탄소계 재료들은 비교적 낮은 매크로 전계강도에서의 전자방출이 관측되었으며, 화학적,

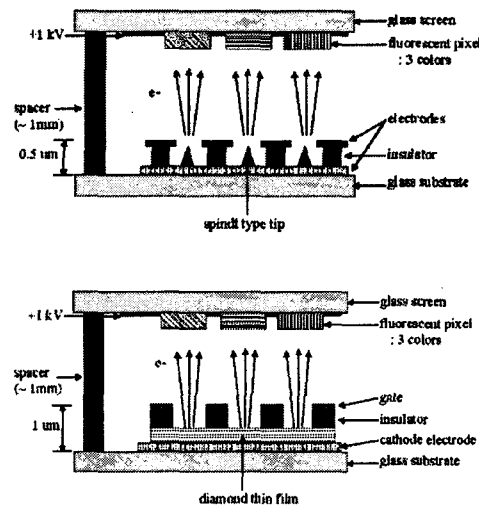


그림 1. spindt형 tip (a) 및 다이아몬드 박막(b)을 이용한 FED의 개념도

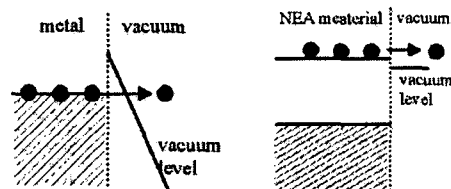


그림 2. 각종 전자에미터에 있어서 전자에너지 상태도. (a) 진공에 고전계를 인가하는 전계방사형, 및 (b) NEA특성을 이용한 내부여기형.

오사카 산업기술연구소  
Eail : smlee27@hotmail.com  
Fax: +81-90-9706-0277  
Technology Research Institute of  
Osaka perecture, Micro-Device Center,  
Ayumino 2-7-1, Izumi, Osaka 594-1157,  
Japan.

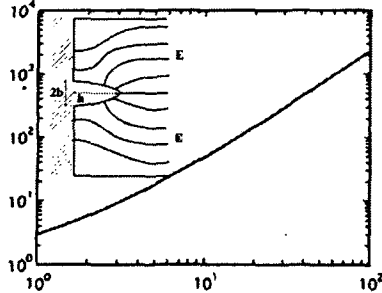


그림 3. microtip의 국소전계증대인자  $\beta (= Em/E)$ 의 형상의존성. X축은 microtip의 단축에 대한 장축의 비( $h/b$ ).

물리적으로도 안정된 구조를 지니고 있어 FED의 에미터 소자재료로서 기대를 모으고 있다[4]. 본고에서는 다이아몬드를 중심으로 전자방출소자의 특성과 문제점, 최근의 개발현황 등을 살펴보기로 한다.

## 2. 전자에미터로서의 다이아몬드

고체중의 전자는 그 구조의 안정화에 기여하고 있기 때문에 고체로부터 진공중으로 전자를 방출시키고자 할 경우 에너지장벽(일함수: 통상 2 ~ 5 eV)이 존재하게 된다. 따라서 실용레벨의 전자를 고체로부터 진공중으로 방출하는데는 안정된 표면을 가진 낮은 일함수의 재료로부터 가열에 의한 열전자방출이나 고전계인가에 의한 전계전자방출의 두가지 방식이 통상적으로 사용되어 왔다. 종래에는 텅스텐 등의 금속을 고온으로 가열하여 전자를 방출시키는 고온음극이 전자방출법으로서 널리 이용되어 왔으며, 최근에도 CRT등에서 사용되고 있다. 고온음극은 비교적 용이하게 전자를 얻을 수 있으나, 전자방출을 위해 투입되는 전력의 대부분이 열로 변환되기 때문에, 방출효율이 매우 낮다고 할 수 있으며, 소형화가 용이하지 않다는 단점이 있다. 따라서 고효율, 저비용이 요구되는 차세대 디스플레이 기술로서, 실온에서 전계에 의한 전자방출이 가능한 냉음극기술이 최근들어 주목받고 있다.

종래재료(실리콘(Si) 혹은 몰리브덴(Mo))를 이용한 냉음극의 경우, 전자방출에 필요한 전계(통상  $10^6$  V/cm)를 얻는데는 1  $\mu$ m 정도의 공간과 그의 약 1/100 사이즈 (10 nm)의 원추형상을 높은 정밀도로 제작하여 어레이화 하지 않으면 안 된다. 또한, 이러한 재료의 표면에서는 고전계에 의한 원자이동(증발)도 무시할 수 없는데, 이는 방출전류의 불안정성

의 원인으로 작용할 수 있다. 따라서 새로운 개념의 차세대 전자방출원의 개발이 요구되고 있으며, 다이아몬드 박막은 이러한 고효율, 고휘도화를 가능하게 하는 면방출형 전자에미터 재료로서 주목받고 있다.

다이아몬드 냉음극 연구는 수소흡착된 다이아몬드 표면이 NEA (Negative electron affinity)특성[5], 즉 다이아몬드 전도대 최하단의 에너지위치가 진공의 최저준위인 진공준위보다 높은 상태임이 밝혀진 이래로(그림 2), 활발한 연구가 진행되어 오고 있다[6]. 이러한 방법은 종래의 전계방출소자와 같은 미세가공이 필요하지 않은 면방출형이며, 전자방출효율도 높을 것으로 기대되고 있으나, 가장 큰 문제는 다이아몬드의 전도대에 주입 가능한 전자전류의 절대량이 작기 때문에 높은 방출전류밀도가 요구되는 경우 문제가 될 가능성이 있다는 것이다. 또한, 실용적인 진공중에서는 전자충돌에 의해 이온이 생성되어 인가된 고전계에 의해 가속되어 에미터 표면에 충돌할 수 있으므로 안정한 전자방출의 지속여부도 해결해야 할 과제중의 하나이다. 따라서 실용적인 견지에서 본다면 이온생성 및 이온충돌에 의한 에미터의 표면 손상이 발생하지 않을 정도의 낮은 전압, 예를 들면 5 V이하 정도에서 적절한 효율을 낼 수 있는 에미터의 개발이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 전형적인 냉음극소자에서는 가속전압이 2 kV 정도일 경우 0.1 mA/cm<sup>2</sup> 정도의 에미션 전류밀도가 필요한 것으로 알려져 있으며[1], 이는 실용적인 디스플레이소자용 전자원으로서의 판단기준이었지만, 최근 이를 상회하는 연구결과가 다이아몬드를 포함한 탄소계박막으로부터 나오기 시작한 것은 상당히 고무적인 일이라 할 수 있다.

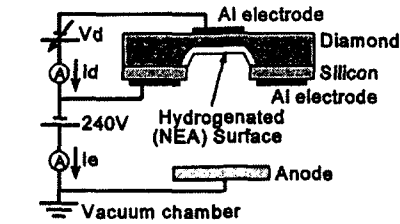
## 3. 다결정 CVD다이아몬드 전자에미터

다이아몬드 박막제작에 있어서 안정적인 저(低)저항의 n-type의 박막제작은 아직까지 실현되지 않고 있으며, 이에 따라 pn접합 다이오드에 의한 전자주입방식의 시스템은 기대하기 어렵다. 그러나, 전자를 다른 방식으로 다이아몬드의 전도대에 주입할 수 있다면, 표면의 NEA특성을 이용한 고효율의 다이아몬드 전자에미터의 제작이 가능할 것이다. 예를 들면, 쇼트키접합을 이루는 전극으로부터의 직접적인 주입이나, 반도체 헤테로접합을 이용한 전자주입을 생각해 볼 수 있다.

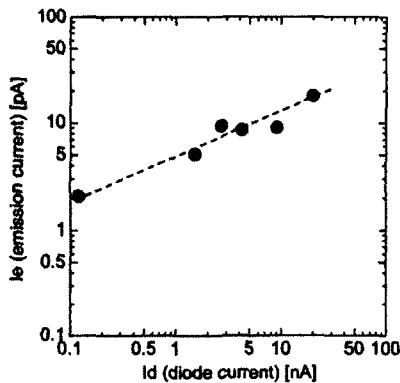
다결정 다이아몬드에서의 전자방출은 입자사이즈에 반비례하는데, 이는 입계의 전도성에 강하게 의존하기 때문인 것으로 알려지고 있다[4]. 따라서 가장 낮은 일함수의 매크로 전계는 나노미터 사이즈의

미결정(微結晶) 다이아몬드 박막에서 관측된다. 한편, 자외광 여기에 의해 방출되는 광전자전류의 2차원분포와 전계에 의한 전자방출의 2차원분포가 완전히 다른 경향을 나타내었는데, 이로부터 다이아몬드 박막재료의 전자방출은 막 전체로부터 균일하게 발생되지 않고 불균일하게 존재하는 국소적인 전자방출점(에미션사이트)으로부터 발생된다는 것이 명확해졌다. 또한, 디스플레이소자로서 이용가능한 전자원(電子源)이 되기 위해서는  $10^6$  sites/cm<sup>2</sup> 이상의 에미션사이트 밀도가 필요하다는 보고도 있다[4]. Xu 등은 유전체인 다이아몬드 내부에 형성된 도전성채널을 통해서 기판으로부터 전자방출면으로 전자가 공급되는 모델을 제안하고, 이러한 도전성 채널은 다이아몬드박막 내부에 산재하는 그래파이트(graphite) 영역과 관련이 있을 것으로 추정하였다[7].

본 연구그룹에서는 다결정 CVD다이아몬드 박막을 이용한 다이오드형 전자에미터를 제작하였으며, 소자구조의 모식도와 방출전자전류의 다이오드 전류의 존성을 측정한 결과를 그림 4에 나타내었다.



(a)



(b)

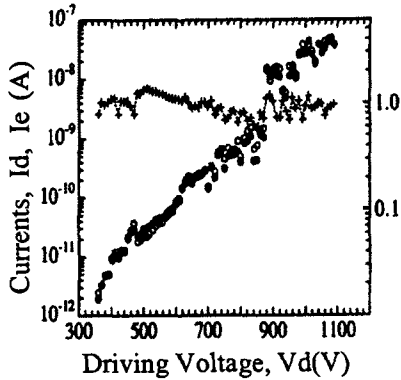
그림 4. (a) 다결정 다이아몬드 박막을 이용하여 제작된 다이오드형 전자에미터 소자구조의 모식도와 (b) 소자의 다이오드구동 전류 ( $I_d$ ) 방출전자전류 ( $I_e$ ) 특성.

방출전자전류는 비교적 낮게 나타났으며, 방출효율(방출전류/다이오드전류)은 0.1 nA ~ 20 nA의 다이오드 전류에 대해 2 ~ 0.2 % 정도에 지나지 않음을 확인할 수 있었다[8]. 이러한 저효율의 주요 원인은 밴드갭 내부에 입계등에 의한 불순물준위나 결함이 존재함에 따라, 전도대를 통과하는 전자들이 낮은 에너지의 갭 내부 준위로 이동하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 전자방출의 효율향상을 위해서는 CVD다이아몬드 박막의 고품질화가 가장 중요한 관건인 것으로 판단된다.

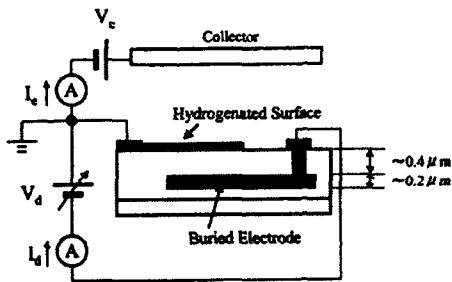
#### 4. 단결정 CVD다이아몬드에 의한 고효율 전자에미터의 제작

본 연구그룹에서는 MIS (Metal-Insulator Semiconductor)형식의 소자구조에 고품질의 단결정 다이아몬드 박막을 이용하여 다이아몬드의 전도대에 전자주입이 가능한 전자방출소자의 개발을 시도하였다. 여기서 M은 저저항전극층, I는 undoped 다이아몬드, S는 수소화 p형 다이아몬드로 구성된다. I층에 필요한 고전계는 M층과 S층과의 사이에 전압을 인가함에 따라 얻을 수 있으며, S층은 NEA 표면을 지니고 있기 때문에 전자방출면으로서의 역할도 겸하고 있다. I층으로서 박막 결정질이 현재 가장 좋다고 생각되는 호모에피택셜 단결정 다이아몬드를 이용하여 그림 5에 나타낸 것과 같은 MIS구조의 소자를 제작하였다. 여기서 M층은 이온주입과 박막성장 기술을 관련시켜, 내부에 저(低)저항층을 형성하였다. p-type의 buried electrode와 수소화된 표면 사이에, 다이아몬드 박막의 높은 breakdown voltage를 이용하여,  $\sim 10^7$  V/cm 정도의 고전계를 걸어주면, I층에 buried electrode로부터 주입된 홀은 impact ionization 효과에 의해 전자-홀 쌍을 만들 수 있는 충분한 에너지를 지니게 되며, 이렇게 형성된 전자들은 전도대로 올라가 전계에 의해 진공중으로 방출되게 된다. 또한, 이렇게 형성된 전자와 홀들은 고전계에 의해 가속되어 전자방출효율향상에 기여하는 것으로 생각된다. 결과적으로 얻어진 에미션 효율은 가장 좋은 경우 100 %에 도달하였으며, (그림 6) 방출전류는 0.2  $\mu$ A, 전류밀도는 20  $\mu$ A/cm<sup>2</sup> 정도로서 비교적 낮았다. 앞으로 방출 전류밀도의 안정성을 더욱 향상시켜야 할 필요가 있을 것으로 생각되며,  $10^9$  V/m 정도의 보다 높은 고전계에 견딜 수 있는 우수

한 결정질의 다이아몬드 박막을 이용한 전자방출 다이오드(Electron Emitting Diode, EED)에의 전개도 기대된다.



(a)



(b)

그림 5. (a) MIS다이오드형 단결정 다이아몬드 전자에미터의 구동전류  $I_d$ (○), 에미션전류  $I_e$ (●) 및 에미션 효율  $I_e/I_d$  (+)의 구동전압  $V_d$ 의 존성. (b) 제작된 전자방출소자의 개념도

### 5. 앞으로의 전망

와이드밴드갭 반도체인 다이아몬드는 전기·전자 재료로서 매우 우수한 장점들을 지니고 있음에도 불구하고, p-type 박막은 보론도핑에 의해 안정적으로 얻어지는 반면, n-type 박막제작이 실현되지 않아 그 적용에 많은 제한이 따른다. 예를 들면, n-type 다이아몬드가 가능하다면, pn접합 다이오드형 전자에미터에 적용하므로써 고효율의 전자에미터 제작이 가능하게 될 것이며, 그 이외에도 여러종류의 다이아몬드 전자디바이스나 전기화학분야를 포함하여 실

로 그 응용가능성은 무궁무진하다고 할 수 있다. 따라서 이러한 n-type다이아몬드 박막에 대한 연구가 활발하게 전개되고 있으며, 그 성과도 최근 들어 많은 진전을 보이고 있다. 여기에는 화학적 도핑이나 ion implantation등에 의한 구조적인 전자전도 이외에도 전자공급원으로서 이중박막의 헤테로 에피택셜 성장에 관한 연구도 진행되고 있다[9]. 앞으로도 n-type박막제작에 관한 연구는 다이아몬드 연구분야의 가장 큰 이슈의 하나로서 좀 더 활발하게 진행될 것으로 생각되며, 가시적인 성과가 멀지 않은 미래에 나타날 것으로 기대된다.

본 연구에서는 호모에피택셜 CVD다이아몬드 박막을 이용한 다이오드형 전자에미터에서 쇼트키 전극을 이용한 고전계 전자여기에 의해 거의 100%에 가까운 고효율로 약  $10^{-7}$  A(평균  $10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>)의 전류량의 전자방출을 얻을 수 있었다. 작동전압의 저감, 특성의 안정화 등은 이후 해결해야할 문제로 남아 있으나 다이아몬드를 이용한 전자방출다이오드(Electron Emitting Diode)의 고효율 전자에미터의 가능성을 처음으로 실증하였다. 앞으로 디바이스물리에 입각한 소자구조의 최적화와 함께 실용레벨의 특성을 지니는 전자에미터의 기초기술에 대한 연구가 좀 더 이루어져야 할 것으로 사료된다.

### 참고 문헌

- [1] J. E. Jaskie, MRS Bulletin, Vol. 21 (3), p. 59, 1996.
- [2] C. A. Spindt, I. Brodie, L. Humphrey and E. R. Westerberg, J. Appl. Phys., Vol. 47, p. 5248, 1976.
- [3] F. Rohrbach, CERN Report, 71-5/TC-L, 1971.
- [4] J. Robertson, Diamond Films and Technol., Vol. 8, p. 225, 1999.
- [5] F. J. Himpsel, J. A. Knapp, J. A. van Vechten and D. E. Eastman, Phys. Rev. B, Vol. 20, p. 624, 1979.
- [6] A. Hiraki, T. Ito, A. Hatta, Oyo Buturi, Vol. 66, p. 235, 1997.
- [7] N. S. Xu, R. V. Latham and Y. Tzeng, Electron Lett., Vol. 31, p. 74, 1995.
- [8] A. Hatta, K. Ogawa, N. Eimori, M. Deguchi, M. Kitabatake, T. Ito and A. Hiraki, Appl Surf. Sci., Vol. 117/118, p. 592, 1997.
- [9] S. M. Lee, H. Murakami, T. Ito., J. Mat. Res. to be published.