

전계 방출을 이용한 디스플레이 및 조명기술 동향

박 규 창 (경희대학교 정보디스플레이학과)

I. 서 론

Field emission(전계 방출) 기술은 1968년 미국의 SRI(Stanford Research Institute)의 C. Spindt가 제안한 마이크로 크기의 에미터 제작 기술을 기반으로 하여 제작한 콘 형상의 뾰족한 금속팁을 이용한 전자의 생성 기술에 기반을 두고 있다.^[1] 진공 속에서의 전자의 방출은 강한 전계인가에 의한 터널링 전류의 생성에 기반 한다. 일반적으로 매끈한 표면에 3~6 V/nm 이상의 전압을 인가 시 금속의 표면으로부터 전자가 방출(field emission)하게 되며, 20~50 V/nm 의 강한 전계에서는 전계 이온화(field ionization)에 의한 전자가 방출되게 된다. 전계 방출 기술을 이용한 소자 제작 시 필요한 3~6 V/nm 의 전계는 매우 높은 전압을 인가하여야 함으로 현실적으로 매끈한 표면에서의 전계 방출 기술을 이용한 소자의 제작은 불가능하게 된다. 하지만 표면의 형상을 제어하여 피뢰침처럼 상대적으로 매우 높은 거칠기를 가지게 하면 전계 방출에 필요한 전계를 매우 낮출 수 있으며 이를 전계 증배 계수(field enhancement factor, β)로 표시된다. β 값을 크게 하려면, 1) 끝(tip)을 뾰족하게 하는 방법, 2) 가로(직경)대비 세로(높이)의 비를 크게 하는 방법, 3) 전자 방출원(electron emitter)의 밀도를 제어하는 방법 등이 이용되고 있다.

지금까지 전자 방출원에 이용된 재료로는 1) Molybdenum tip, 2) silicon tip, 3) carbon film, 4) amorphous and nano diamond, 5) carbon nanotube(CNT), 6) 나노와이어(nanowire) 및 7) graphene 등이 이용 되었다. 하지만

진공에서 전계를 이용한 전자 방출 시 높은 팁 끝 부분의 온도, 이온화된 가스에 의한 팁 손상, 주변 가스에 의한 산화 등으로 인하여 팁이 손상되는 특성을 보여 소자 응용에는 한계를 보여 주었다. 하지만 나노 다이아몬드와 탄소 나노 튜브는 구조적 안정성으로 인하여 아직도 전계 방출 소자 적용을 위한 다양한 연구가 진행 중이다.

전계 방출 에미터를 이용한 소자로는 전계 방출 디스플레이(field emission display), 전계 방출 램프(field emission lamp), 디지털 엑스레이(digital x-ray), 초소형 전자원(electron micro - column) 등이 있으며,^[2-5] 각각의 소자 응용을 위한 전계와 전류의 특성은 매우 다양하다. 본 고에서는 전계 방출 디스플레이 기술과 램프 기술 동향에 대하여 정리하고자 한다.

II. 전계 방출 디스플레이 및 램프 기술

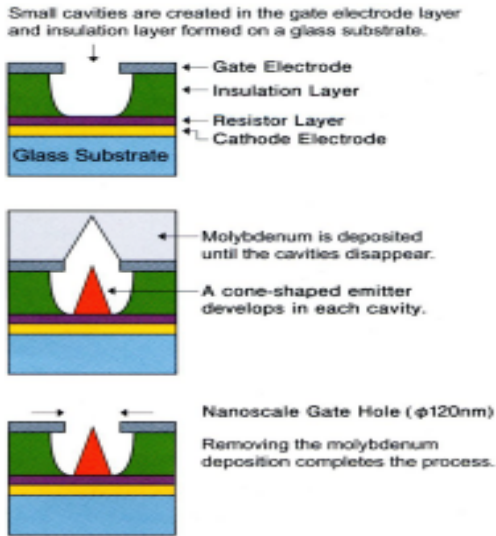
1. 전계 방출 디스플레이 기술

전계 방출 디스플레이는 1990년대 후반부터 한국, 일본, 미국 및 유럽의 다양한 기관에서 크게 Spindt 형 팁을 기반으로 한 디스플레이와 탄소 나노 튜브를 이용한 디스플레이 등으로 연구되어 왔다. Spindt 형 팁을 이용한 디스플레이는 가장 최근까지 일본의 소니사가 투자한 FET사(field emission technologies)에서 나노형의 팁을 이용한 디스플레이를 제작하여[그림 1] 판매를 하고자 하였으나 시장의 상황에 만족하지 못하여 대량 생산에는 다다르지 못하였으며, 2010년 사업을 대만의 AUO 에서 인수하였으나 이후 개발의 진척에 대한 정보는 부족한 상태이다.

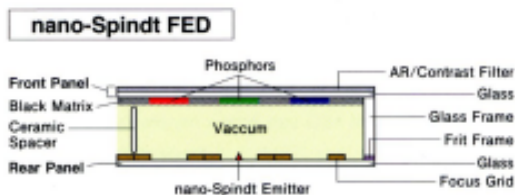


[그림 1] FET사에서 개발한 FED 시제품

나노 Spindt 팁을 이용한 디스플레이는 [그림 2]-(a)와 같은 팁 제작을 위한 나노 공정의 필요성으로 인하여 팁 제조 단가에 대한 부담감이 있었던 것으로 보이나 [그림 2]-(b)와 같이 구조적으로는 잘 알려진 공정으로 제작의 어려움은 적은 것으로 보였다. 하지만 시장에 진입을 하지 못하고 사라져가고 있으므로 안타까울 따름이다.



(a) 나노 Spindt 제작 공정

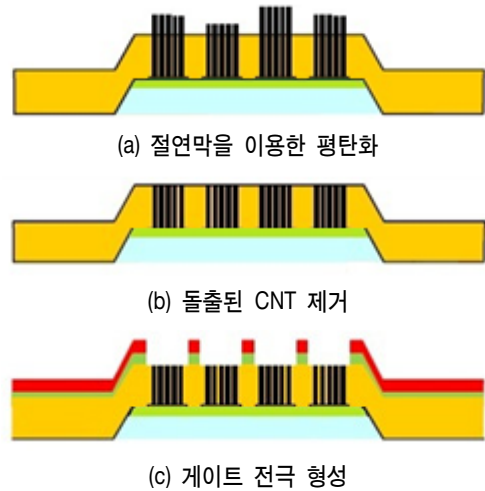


(b) 디스플레이 단면도

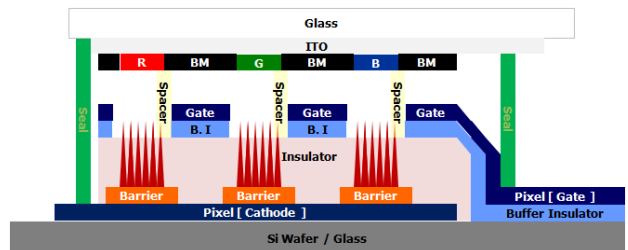
[그림 2] 나노 Spindt 제작 공정 및 디스플레이 단면도

최근 국내에서는 전계 방출 디스플레이를 전문적으로 연구, 개발 및 생산을 위한 벤처 기업인 (주) SNDisplay가 탄생하였다. SNDisplay에서는 경희대학교에서 개발된 RAP(resist-assisted patterning) 기술을 이용한 탄소 나노 튜브 성장 기술을 이용하여^[6-8] 에미터를 제조하고, 성장된 탄소 나노 튜브에 이 회사의 특허 기술인 두꺼운 절연막을 이용한 균질화 후처리 공정 [그림 3]을 통하여 디스플레이 균일도가 향상된 FED를 개발 중에 있다.^[9] [그림 4]는 SNDisplay에서 개발하고 있는 전계 방출 디스플레이의 단면 구조를 보이고 있다. 디스플레이의 해상도는 640×480 이며 단위 픽셀은 $32 \times 96 \mu\text{m}$ 의 크기를 가지고 있다. 디스플레이 제작을 위하여 4개의 마스크 공정이 필요하며 이는 현 액정 디스플레이에 이용되는 박막트랜지스터 제작 공정과 동일한 공정 마스크 수를 가지고 있다.

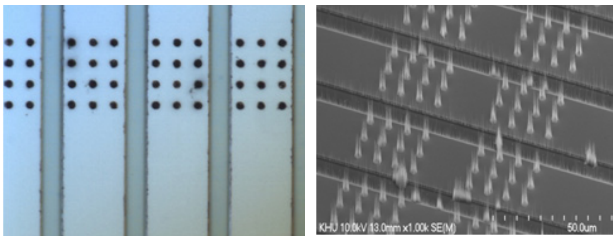
[그림 5]는 단위 픽셀의 광학 사진 (a)과 탄소 나노 튜브 성장 후 전자 현미경 사진 (b)을 보여주고 있다. 단위



[그림 3] Homogenizer Process



[그림 4] SNDisplay 3" 전계 방출 디스플레이 단면 구조



(a) 광학 사진 (b) 전자 현미경 사진

[그림 5] 탄소 나노 튜브 성장 후 단위 픽셀

픽셀에는 12개의 탄소 나노 튜브 성장을 위한 영역(dot)이 있으며 진공 갭 유지를 위한 스페이스 형성 공간을 충분히 확보하기 위하여 탄소 나노 튜브 에미터 형성 영역을 작게 가져가고 있는 특징이 있다. 하지만 탄소 나노 튜브의 전자 방출 전류가 충분하고 신뢰성이 높아 향후 에미터 형성 개수를 줄여 보다 해상도가 높은 디스플레이를 개발할 예정이다. 전계 방출 기술을 연구하는 연구자로서 빠른 기술 개발로 가격 경쟁력이 있는 FED가 디스플레이 강국인 우리나라에서 세계 최초로 상용화 되기를 기원한다.

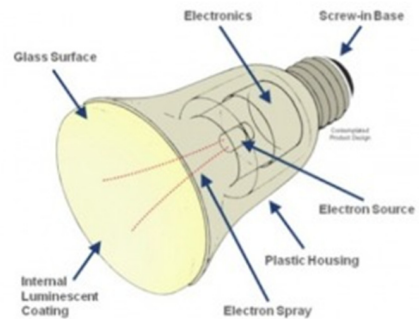
2. 전계 방출 램프 기술

전계 방출 램프는 기존의 FED 및 CRT (Cathode-ray tube) 제조 기술을 이용하여 제작이 가능하며 친환경적이고 인간 친화적인 기술로 주목을 받고 있다. 2000년대 초 일본의 다이아라이트(Dialight)사에서 탄소 나노 튜브를 이용한 전계 방출 램프(FEL, field emission lamp)를 개발하여 다수의 학회에 전시하였으나 상용화로는 진전을 하지 못하였다.^[10] 최근에 국내외에서 전계 방출 램프의 개발과 관련한 활발한 움직임들이 나타나고 있다. 우선 미국의 Vu1사에서는 ESL(electron stimulated luminescence) 기술을 이용한 60 와트 백열등과 동일한 성능의 램프를 개발 완료하였으며 소량의 제품을 판매하였다.^[11] 동 제품의 양산을 위하여 중국의 Huayi Lighting Company Ltd.와 제조 계약을 체결 하였으며, 현재 생산을 위한 제조 공정을 미세 조정하고 있는 것으로 알려졌다. 또한 제품의 미국 내 판매를 위하여 미국의 대형 생활 소품 유통점인 LOWE's 공급 계약 체결이 완료된 상태이다. ESL 기술은 우리에게 잘 알려진 전계 방출을 이용하여 전자를 생성

시키고 생성된 전자를 가속하여 형광체가 코팅된 표면과 충돌하여 빛을 내는 음극 발광(cathode luminescence) 기술이다. 현재까지 사용되는 에미터 재료는 알려져 있지 않다.

[그림 6]은 ESL 램프의 구조를 나타낸 것으로 전극 연결을 위한 E26 형의 베이스, 구동부, 전자원(electron source), 진공 유지를 위한 하우스, 그리고 형광체가 코팅된 아노드 유리로 구성되어 있다. [그림 7]은 Vu1사에서 제작한 R65 램프로써 11,000 시간의 수명, 31lm/W 급의 효율과 2,800K의 색온도를 가지고 있다. 동 램프의 특성은 [그림 8]에 나타나 있는 것처럼 부드러운 색감과 자연에 가까운 색상을 들 수 있다. 특히 연색지수인 CRI(color rendering index) 값은 90 이상으로 LED 조명에 비하여 매우 높음을 알 수 있다. 동 램프는 휘도 조절이 용이하며(dimmmable), 색상 조절이 가능하며, 인체에 유해한 수은을 사용하지 않으며, 발열로 인한 문제가 없다는 등의 장점이 있다.

일본에서는 최근 Kochi FEL사가 설립되어 전계 방출



[그림 6] Vu1에서 제작한 ESL 램프 구조



[그림 7] Vu1에서 제작한 ESL 램프

램프를 개발하고 있다. 특히 동사는 전계 방출 램프를 식물 성장에 이용하는데 초점을 두고 개발을 진행하였으며 식물의 발육에 전계 방출형 램프가 유리하다는 결과를 획득하였다고 설명하였다. 전계 방출형 램프는 인체 및 식물 성장에 유해한 빛의 성분(자외선)이 나오지 않으므로 인체와 식물 성장에 유리하다는 설명이었다. [그림 9]는 현재 연구 중인 전계 방출 램프의 구조를 나타낸 것으로 FED의 구조와 동일한 평판형 (a) 과 CRT의 구조와 유사한 편널형으로 나뉠 수 있으며, 전극의 개수에 따라 다이오드형과 트라이오드형으로 나뉠 수 있다. [그림 10]은 Kochi FEL에서 개발한 다이오드형 전계 방출 램프의 구동 사진이다. 램프는 60lm/w의 효율을 보이고 있으며 전계 방출 전류의 조절에 따른 휘도 조절이 용이한 특성을 가지고 있다. 특히 이 램프의 구동을 위하여 사용된 에미터는 나노 구조의 다이아몬드를 사용하였다. 나노 다이아몬드는 구조적 안정성은 높으나 구동 전압이 상대적으로 높은 단점을 가지고 있으나 Kochi FEL 사에서는 이를 극복하고 높은 효율을 갖는 램프의 개발에 성공하였다. 동



[그림 10] FEL 다이오드형 전계 방출 램프

사에서는 전계 방출 램프의 사용화가 곧 다가 올 것임을 강조하였다.^[12]

이상의 기술 개발 현황을 살펴볼 때 전계 방출 기술을 이용한 디스플레이 및 램프 개발은 아직도 꾸준히 진행되고 있음을 알 수 있다. 특히 전계 방출 디스플레이는 극한 환경(예, 항공기 조정 모니터, 우주선 등) 하에서도 매우 잘 동작할 수 있는 기술로 평가되고 있으며 상대적으로 쉬운 제조 공정을 가지고 있는 장점이 있으므로 특별한 스펙이 요하는 장치에 이용되는 날이 멀지 않음을 알 수 있다. 또한 램프 기술은 최근에 부각되기 시작하는 기술로 곧 상용화 제품이 시장에 나올 것으로 사료된다. 전계 방출 기술을 기반으로 한 램프는 친환경 기술로 인체 친화적인 조명으로 크게 부각될 것으로 기대를 모으고 있다. 이러한 시기에 우리나라에서도 조명과 관련된 연구에 보다 많은 지원이 있기를 바라는 바이다.

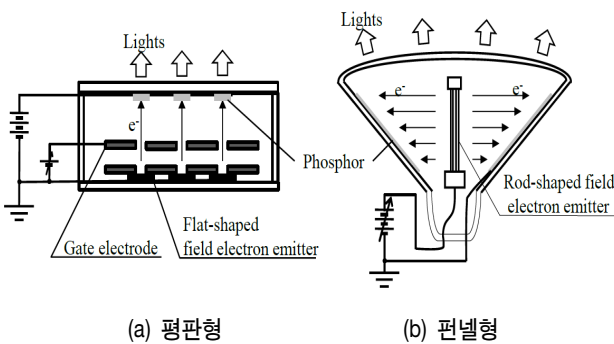


[그림 8] ESL 램프 특성

III. 맺음말

전계 방출 디스플레이는 특별한 응용 시장에서 우수한 특성을 보이는 기술로 상용화 가능성이 점점 부각되고 있다. 이러한 시기에 맞춰 국내에서 새로운 벤처 업체의 출현은 해당 분야의 연구자로서 매우 반가운 일이며 빠른 상용화가 이루어 질 수 있도록 국가의 많은 지원이 있었으면 하는 바람을 가지고 있다.

전계 방출 램프는 미국에서는 상용화 모델이 개발 완료되었으며 소량 판매가 이루어지고 있으며, 양산을 위한 체계를 중국에 설립하여 전계 방출 램프의 시대를 알리고



[그림 9] 전계 방출 램프 구조

있다. 일본에서는 식물 공장에 필요한 광원으로 제품의 개발이 이루어졌으며 향후 양산이 기대되고 있다.

현재 전계 방출을 기반으로 하는 소자 기술에서 우리나라가 앞서가는 경향을 보이고 있다. 이러한 국내의 연구 기반을 바탕으로 향후 전개될 나노 기술을 이용한 전계 방출 디스플레이 및 램프 시장에서 우리의 기업이 시장을 주도해 나가길 바란다.

참고문헌

- [1] Spindt, C. A., Journal of Applied Physics, 39, (7), 3504 (1968).
- [2] N. S. Lee, D. S. Chung, I. T. Han, J. M. Kim, et al., Diamond and Related Materials, 10, 265 (2001).
- [3] W. S. Chang, H. Y. Choi and J. U. KIM, Japanese Journal of Applied Physics, 45(9A), 7175 (2006).
- [4] Yuan Cheng, Otto Zhou, Comptes Rendus Physique, 4, 1021 (2003).
- [5] Zejian, Liu, Guang Yang, Jianping Lu, Otto Zhou, et al., Applied Physics Letters 89, 103111 (2006).
- [6] Kyu Chang Park, Je Hwang Ryu, Jin Jang, et al., IMID/IDMC 2006, Technical Digest, 1229 (2006).
- [7] Kyu Chang Park, Je Hwang Ryu, Jin Jang, et al., Journal of Vacuum Science & Technology B, 25, 1261 (2007).
- [8] Kyu Chang Park, Je Hwang Ryu, Jin Jang, et al., Journal of Vacuum Science & Technology B, 26, 856 (2008).
- [9] Kyu Chang Park, Young Ju Eom, Su Woong Lee, Chee Young Kim, Choon-Rae Lee, SID, 857 (2012).
- [10] Hirohisa Hiraki, Hideki Harazono, Takuya Onozawa, Masayuki Nkamoto, Akio Hiraki, IMID, 1591 (2008).
- [11] <http://www.vu1corporation.com/>
- [12] K. Nishimura, H. Sasaoka, H. X. Wang, N. Jiang, IVNC, 330 (2012).

저 자 약 력

박 규 창



- 1990년 : 경희대학교 물리학과
- 1997년 : 경희대학교 물리학과 (이학박사)
- 1997~2002년 : Hynix (주) (구 현대전자) 선임/책임연구원
- 2002년~현재 : 경희대학교 정보디스플레이학과 교수

- 2006년 : Visiting researcher, Shizuoka University
- 2009년 : University of North Carolina at Chapel Hill 방문교수
- 2011년~현재 : (일)시즈오카대학 객원교수
- 관심 분야 : 디지털 전자빔 제작 기술, 나노기술 기반의 디스플레이 소자 및 재료, 전자방출을 이용한 엑스레이 소스 제작, 박막 트랜지스터 제작, Lighting technologies