

나노전자원의 응용 및 기술개발 동향

Recent Trends on Application and Development of Nano Electron Source

정진우 (J.-W. Jeong) 나노전자원창의연구실 선임연구원
송윤호 (Y.-H. Song) 나노전자원창의연구실 실장

* 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행되었음.

가정의 전자레인지, 병원의 X-ray 영상, 그리고 군의 레이더 장비에 이르기까지 우리 주변에는 이미 오래 전부터 전자빔을 이용한 장비들이 무수히 많이 쓰이고 있다. 이런 장비들에는 대부분 고온으로 가열해서 전자를 방출시키는 열전자원이 보편적으로 사용되고 있으나 높은 소비전력 그리고 빠른 스위칭의 어려움 등의 단점 또한 존재한다. 이 한계를 극복하기 위해 전계방출원 기술, 특히 나노미터 크기의 나노전자원 기술의 연구가 오래 전부터 꾸준히 이어지고 있다. 본고를 통해 디지털 시대에 부합하는 나노전자원의 기본 개념 및 응용 분야 그리고 ETRI에서 개발 중인 나노전자원 응용 기술들을 소개한다.

정보통신 미래원천기술 특집

- I. 서론
- II. 나노전자원 기술 개요
- III. 나노전자원 기술 연구 동향
- IV. 결론

I. 서론

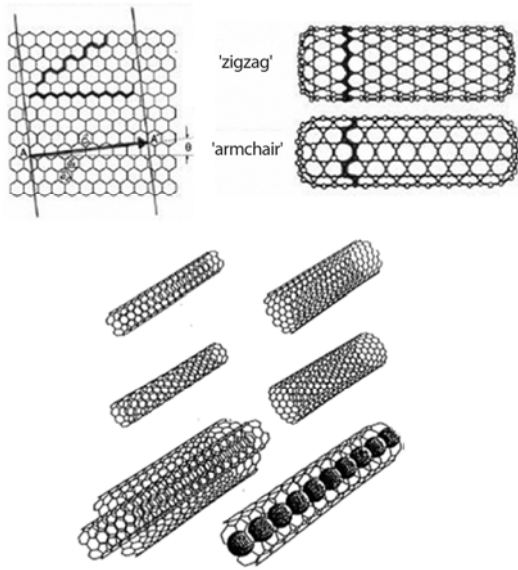
전자원(electron emitter)은 전자의 다발인 전자빔을 방출하는 물질 혹은 소자를 의미하는데, 흔히 특정한 운동 에너지를 가지고 방출되는 모습이 총과 유사하여 전자총(electron gun)이라 부르기도 한다. 이런 전자원은 LCD(Liquid Crystal Display)가 대중적으로 보급되기 전 TV나 모니터 등 대부분의 디스플레이에 사용되었던 CRT(Cathode Ray Tube)에서 흔히 발견되는데, 전자총에서 방출된 전자빔이 가속되어 유리 화면에 있는 형광체에 충돌할 때 발생하는 빛으로 영상을 표현한다. 이외에도 미세 구조를 관찰하는데 널리 사용되는 SEM(Scanning Electron Microscope) 장비나 얼마 전 힉스(higgs) 입자의 존재 증거를 발견하면서 유명세를 탄 거대강입자충돌기(LHC: Large Hadron Collider) 같은 입자 가속기에도 필요하다. 이 뿐만 아니라 전자원은 전자 레인지, X-선 장비, 레이더 등 우리 주변의 많은 분야에 응용되므로 그 수를 헤아리기가 어렵다. 전자빔은 대부분 전자 이동 경로에 불필요한 가스를 제거한 진공 분위기에서 동작되며 식품이나 물질의 특성을 변화시키기 위한 용도로 사용하기 위해 대기 중에 직접 전자빔을 방출시키는 장비도 있다.

전자원은 전자를 방출하는 원리에 따라 물질의 온도를 높였을 때 방출되는 전자를 이용한 열전자원(thermionic emitter)과 강한 전계(electric field)를 걸었을 때 양자역학적터널링(quantum mechanical tunneling)으로 튀어나오는 전자를 이용하는 냉전자원(cold emitter) 등으로 크게 분류할 수 있다. 냉전자원은 전계방출원(field emitter)으로 불리기도 한다. 열전자원은 앞서 언급했던 CRT, 레이더, X-선원 등 전자빔을 사용하는 대부분의 장비에 널리 쓰이는 오래되고 안정된 기술이다. 하지만 온도를 1,000°C 이상 상승시켜야 전자가 방출되는 특징으로 인해 전력 소모가 상대적으로 크고 방출되는 전자빔을 완전히 차단하기 위해서는 가열된 열전자

원의 온도를 식혀야 하므로 빠르게 끄거나 켤 수 없다는 단점이 있다. 반면 전계방출원은 실온에서도 동작하고 전계를 제거하면 즉시 전자 방출이 중단된다는 점에서 열전자원과 비교되는 장점을 가진다. 하지만 기하학적으로 뾰족한 팁 형태를 가지는 전계방출원은 비교적 고진공 분위기에서 동작시켜야 하며 낮은 진공도에서는 수명이 짧아지는 약점을 가지고 있다. 하지만 열전자원에 비해 에너지 분포 범위가 좁고 공간 집속 특성이 좋아 전계방출원을 사용한 FESEM(Field Emission Scanning Electron Microscope) 장비는 기존 열전자원을 사용한 장비보다 더 높은 해상도의 이미지를 제공하기도 한다.

II. 나노전자원 기술 개요

근래에는 기존의 금속이나 반도체 팁 형태의 전계방출원 이외에 나노미터 크기의 물질도 전계방출원으로 사용될 수 있다는 것이 알려지면서 연구가 활발히 진행되고 있다. 나노전계방출원은 나노미터 크기의 물질이 끝이 뾰족한 형태를 가져 전계가 효과적으로 집속될 수 있는 것으로써, CNT(Carbon Nano Tube), CNF(Carbon Nano Fiber), CNW(Carbon Nano Wall), 그래핀(Graphene), 다이아몬드, 산화아연(ZnO) 나노구조물 등 그 종류는 수없이 많다. 그 중에서도 상대적으로 특성이 우수한 탄소나노튜브(CNT)가 가장 많이 연구되고 있다. CNT는 1991년에 NEC의 Thukuba 연구소의 S. Iijima가 고분해능 TEM(Transmission Electron Microscope)을 이용하여 두 개의 탄소 전극 간의 아크에 의해 발생된 탄소 부산물을 관찰하는 과정에서 발견되었다. 이 후 1992년에 NEC의 T. Ebbesen과 P. Ajayan이 CNT를 대량으로 제조할 수 있는 방법을 개발하였으며 현재는 일반적으로 아크-방전(arc-discharge) 및 화학기상증착(Cheical Vapor Deposition: CVD) 방법으로 제조되어 널리 사용되고 있다.

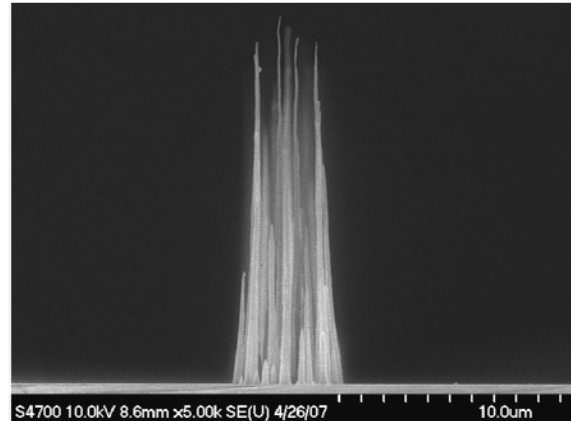


(그림 1) 탄소나노튜브(CNT) 구조

CNT의 구조는 (그림 1)과 같이 탄소 원자들이 육각형으로 배열된 판 형태의 그래핀을 동글게 말아서 형성된 것으로 생각할 수 있다. 이 때, 말린 방향에 따라 끝부분이 지그재그(zigzag) 형태와 팔걸이 의자(armchair) 형태를 띌 수 있는데, 이렇게 말려서 형성된 탄소 관이 하나의 벽을 가지면 SWCNT(Single Wall CNT), 다수 개의 벽을 가지면 MWCNT(Multi Wall CNT)가 되며, MWCNT가 다발로 구성된 형태로도 존재한다. 기술이 발전함에 따라 이러한 구조를 임의로 조절할 수 있게 되었으며 모양 및 구조에 따라 기계, 전기, 화학적인 특성이 달라 다양한 분야에서 활용이 가능하다.

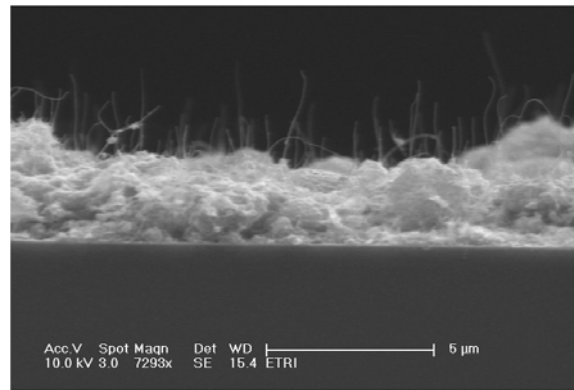
CNT는 그 직경이 수 nm이면서 길이는 수~수십 μm 로 일반적인 반도체 공정으로는 구현하기 어려운 높은 종횡비(aspect ratio)의 특징을 가진다. 이로 인해 전기장이 인가될 경우 CNT의 끝단에 전기장이 집중되어 전자의 양자역학적인 터널링이 매우 쉽게 일어날 수 있어 고성능 전자원으로 활용할 수 있다.

CNT를 전자 소스 또는 전계 에미터로 사용하기 위해서는 일반적으로 음(-)의 전극(캐소드, cathode)에 CNT를 부착시키는 공정이 필요하다. 이러한 공정은 (그림



<자료>: 경희대, 2007.

(그림 2) 기판에 직접 성장시킨 CNT 에미터



<자료>: ETRI, 2005.

(그림 3) 페이스트 방법으로 형성된 CNT 에미터

2)와 같이 캐소드 전극에 CNT를 직접 성장시키는 방법이나 (그림 3)과 같이 CNT 파우더를 페이스트(paste)화하여 전극에 프린팅하는 등 다양하게 존재한다. 직접 성장법의 경우 일반적으로 화학기상증착법이 많이 쓰이고 있으며 특성이 좋은 CNT를 얻을 수 있다는 장점이 있으나 대면적 공정에 제약이 따르며 공정 비용이 비싸다는 단점이 있는 반면 페이스트 형태로 제작할 경우 저가의 대면적 공정이 용이하다는 장점이 있다.

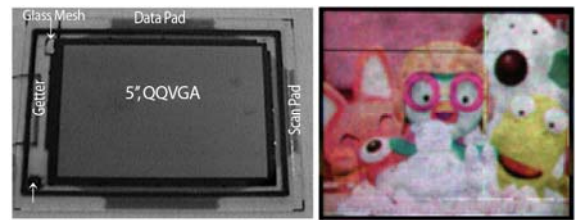
페이스트 방법에 의한 CNT 에미터는 일반적으로, CNT 파우더를 유기 바인더(binder), 필러(filler), 용매 등과 섞어 페이스트로 만드는 단계와, CNT 페이스트를 스크린 인쇄(screen printing) 방법으로 캐소드 기판에

형성하는 단계, 소성 공정을 거쳐 불필요한 유기 물질들을 태우고 난 후 CNT를 표면에 수직으로 노출시키는 표면처리 단계로 이루어진다. 특성이 좋은 CNT 에미터를 제작하기 위해서는 페이스트의 제조뿐만 아니라 프린팅 및 후처리 공정이 적절하게 최적화되어야 한다. CNT 에미터는 낮은 문턱 전압(threshold voltage)과 균일한 전계방출 및 열화가 없는 안정된 방출 특성을 얻는 것이 중요하다.

이렇게 제작된 에미터에 충분한 전계를 인가하면 CNT의 끝 단에 전계가 집중되어 전자가 방출된다. (그림 4)는 CNT 에미터에 전계를 인가하여 전자빔을 방출시키기 위한 전극 배치의 예를 보여준다. (그림 4a)와 같은 2극 구조의 경우, 캐소드보다 높은 전위를 가지는 양(+)극(아노드, anode)에 의해 전계가 인가되고 에미터에서 방출된 전자빔은 아노드 쪽으로 이끌리게 된다. 2극 구조는 간단하게 전자빔을 발생시킬 수 있으나 방출된 전자빔의 양과 에너지를 각각 제어하기 어렵다는 단점이 있다. 이는 아노드 전압의 크기에 따라 방출되는 전자빔의 양과 에너지가 동시에 바뀌기 때문이다. 즉, 적은 양의 높은 에너지의 전자빔, 혹은 많은 양의 낮은 에너지의 전자빔을 발생시키는 것은 곤란하다. 따라서 전자빔의 양과 방출된 전자빔의 에너지를 각각 제어하기 위해서는 (그림 4b)와 같이 아노드 전극 이외에 게이트(gate) 전극이 추가로 설치된 3극 구조가 용이하다. 여기서 아노드는 방출된 전자빔의 에너지를 제어하고 게이트는 전자의 양을 제어할 수 있게 한다. (그림 4)의 구조에서 아노드 전극에 형광체가 형성된 경우는 전계방출 디스플레이(Field Emission Display: FED), 전계방출 백라이트 유닛(Field Emission Back Light Unit: FEBLU), 혹은 전계방출 램프(Field Emission Lamp: FEL)로, 텅스텐(W), 몰리브덴(Mo) 등의 금속 타겟이 형성된 경우는 X-선 소스 등으로 응용될 수 있다. 이 밖에 나노전자원은 X-선 현미경, THz 소스, 제전기 등 다양한 응용 분야에 대해 상용화 연구가 진행 중이다.

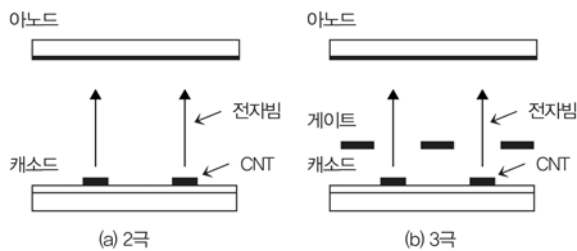
III. 나노전자원 기술 연구 동향

ETRI 나노전자원창의연구실에서는 나노전자원 기술의 상용화를 위해 오랫동안 나노에미터 제작 기술부터 진공패키징 및 구동 기술에까지 전 방위에 걸친 연구를 진행하고 있다. (그림 5)는 2007년에 개발된 CNT 에미터를 이용한 5인치급 능동구동형 전계방출 디스플레이(FED)를 보여준다. 스크린 프린팅된 CNT 에미터를 사용하였고 유리 기판에 형성된 박막 트랜지스터(Thin Film Transistor: TFT)를 이용하여 능동적으로 픽셀의 휘도를 제어하는 구조이다.

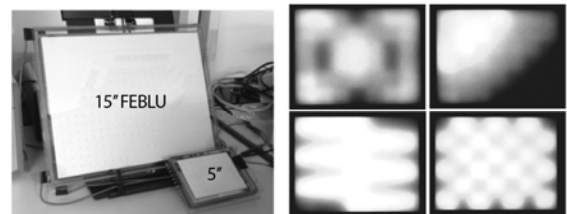


<자료>: ETRI, 2007.

(그림 5) 5"급 능동구동형 전계방출 디스플레이



(그림 4) 전계방출 장치의 전극 구조



<자료>: ETRI, 2008.

(그림 6) 5" 및 15"급 로컬디밍 전계방출 백라이트



〈자료〉: 희성전자(주), ETRI, 2011.

(그림 7) 32"급 전계방출 백라이트 및 이를 채용한 32"급 LCD TV

(그림 6)과 (그림 7)은 LCD 백라이트(back light)용으로 개발된 로컬디밍(local dimming) FEBLU를 나타낸다. 로컬디밍은 화면 각 위치의 영상 밝기에 따라 백라이트가 부분적으로 밝기를 제어하는 기술이며, 나노전자원의 빠른 응답특성으로 보다 선명한 영상을 제공할 수 있다.

최근 여러 우수한 특성으로 인해 광원으로 각광받고 있는 LED는 방출되는 빛의 스펙트럼 영역이 좁아 적, 녹, 청 세 가지 색의 조합으로 색상을 구현하는 LCD의 백라이트로 사용될 때 매우 뛰어난 색 재현성을 보여준다. 하지만 조명에 적용할 경우에는 넓은 파장 영역의 빛을 방출하지 못하므로 일반적으로 연색성(color rendition)이 떨어진다. FED 및 FEBLU는 기술적 문제 및 시장 상황 등으로 상용화는 중단된 상태이나 FEL은 LED 등 기존 조명에 비해 연색성이 우수하여 고급 인테리어 조명 등에 이용될 수 있으므로 일부 기업에서 상용화를 진행 중이다. (그림 8)은 고급 인테리어 조명으로 응용될 수 있는 색가변형 전계방출 램프의 예를 보여준다.



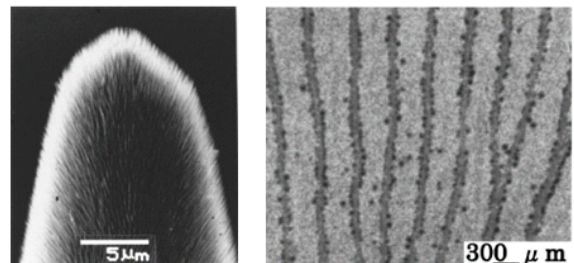
〈자료〉: ETRI, 2008.

(그림 8) 색가변형 전계방출 램프

나노전자원은 전자빔을 가시광으로 변환하는 응용뿐 아니라 금속 타겟을 이용하여 X-선 장치로 활용할 수 있다. 나노전자원을 사용한 X-선 튜브는 기존 열전자원을 사용한 것에 비해 실온 구동 및 빠른 스위칭이 가능하여 디지털적으로 제어할 수 있다. 즉 임의의 X-선 세기를 정확한 시간범위 내에서 제어가 가능하다. 또한 나노전자원의 장점을 살려 평면 X-선원의 개발도 가능하다. 나노전자원 X-선 튜브는 의료 분야의 영상, 진단 및 근접 치료뿐 아니라 산업 분야의 비파괴검사, 보안검색, 제전기 및 XRF(X-Ray Fluorescence) 등 폭 넓은 분야에 응용될 수 있다.

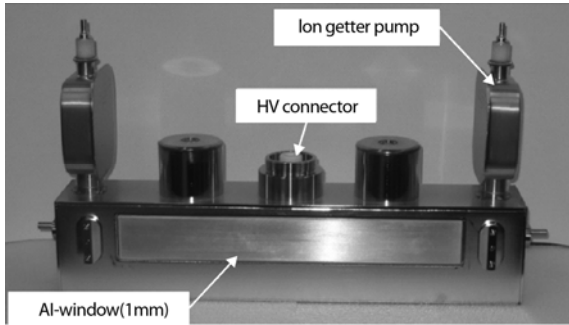
일본의 Okuyama 그룹은 (그림 9)와 같이 폴리브텐 팁 끝에 CNF를 성장시킨 나노전자원을 사용하여 직경 5mm의 X-선 튜브를 제작하였다[1]. 제작된 X-선 튜브는 진공 챔버에 연결되어 약 2×10^{-5} Pa 조건에서 X-선 이미지를 획득할 수 있었다.

2011년 미국 XinRay system과 North Carolina 대학의 Otto Zhou 그룹은 (그림 10)과 같이 31개의 CNT X-선원이 내장된 DBT(Digital Breast Tomosynthesis)용 X-선원을 개발하였다[2]. 기존의 mammography 시스템이 단일 X-선원을 환부 주위로 움직이며 X-선 이미지를 획득하고 이를 컴퓨터 합성하여 3차원 이미지를 얻는 방식이었다면, (그림 10)의 선형으로 배열된 X-선원은 기계적인 움직임 없이 여러 개의 X-선원에서 얻어진 이미지를 합성하므로 시스템이 간단하고 빠르며,



〈자료〉: Okuyama 그룹, 2004.

(그림 9) Mo 팁 상에 성장시킨 CNF 나노전자원과 이를 이용한 X-선 튜브로 획득한 이미지



〈자료〉: 미국 XInRay system, North Carolina 대학의 Otto Zhou 그룹, 2011.

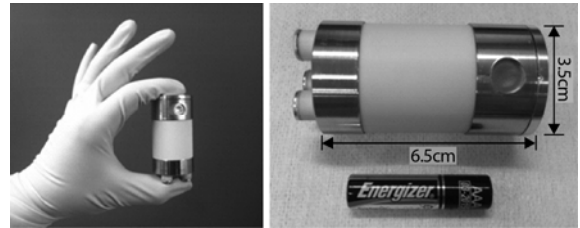
(그림 10) 31개 X-선원이 내장된 CNT X-선원

기계 움직임에 대한 영상의 흐려짐을 방지할 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 전자빔은 진공 분위기에서 발생되어야 하며, 만약 잔류 가스 등에 의해 진공도가 나빠질 경우 전자빔 충돌에 의한 가스의 이온화로 아크-방전 등의 부차적인 반응이 일어나 전자원이 손상되는 문제가 생길 수 있다. 따라서, 나노전자원을 이용한 장치는 반드시 내부가 최소한 10^{-6} torr 이하의 진공이 유지된 밀폐 용기 형태가 되어야 한다. 나노전자원을 이용한 진공 디바이스는 열전자원의 경우보다 더 높은 진공도를 요구하므로 진공 밀봉 기술이 매우 중요하다. 지금까지 FED, FEL 등 나노전자원을 이용한 디바이스들이 상용화에 성공하지 못한 가장 큰 이유는 진공 밀봉 후 충분한 수명특성을 발휘할 수 없었기 때문이다.

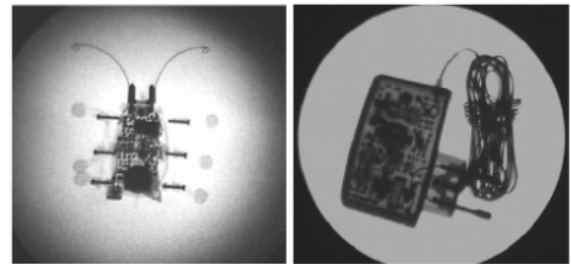
현재까지 발표된 고전류를 방출하는 나노전자원을 사용한 X-선원들은 대부분 진공 펌프에 연결되어 구동되거나 (그림 10)처럼 진공 펌프가 장착된 형태가 대부분이었다. 이는 앞서 언급한 것처럼 나노전자원이 진공 분위기에 매우 민감하기 때문인데, 초기에 매우 높은 진공도로 패키징이 이루어졌다 할지라도 시간이 지남에 따라 내부에서 발생하는 가스들에 의해 내부 진공도는 쉽게 나빠질 수 있고 이로 인해 나노전자원은 쉽게 손상될 수 있다.

최근 ETRI에서는 (그림 11)과 같이 CNT 나노전자원을 사용하면서 진공 펌프 없이 완전 진공 밀봉된 마이크



〈자료〉: ETRI, 2012.

(그림 11) 완전 밀봉형 CNT 마이크로포커스 X-선 튜브



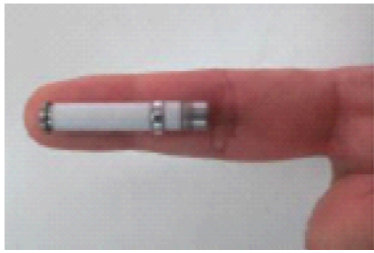
〈자료〉: ETRI, 2012.

(그림 12) CNT X-선 튜브로 획득한 X-선 이미지

로포커스 X-선원을 개발하였다[3]. CNT 나노전자원에서 방출된 전자빔은 두 개의 집속 전극에 의해 아노드 타겟에 직경 0.3~0.4mm의 크기로 집속되고 Mo 윈도우를 통해 X-선이 방출되는 구조로 최대 관전류는 50mA이다. (그림 12)는 개발된 X-선 튜브로 획득한 이미지이다.

진공 펌프 없이 완전 밀봉 구조의 X-선 튜브에서 20시간 동안 나노전원 특성의 열화가 전혀 없이 안정적으로 동작됨을 확인하였다. 이는 진공 밀봉 직후 초기 내부 진공도가 매우 우수하며 구동 중에도 진공도를 악화시킬 내부 가스 발생이 미비하다는 것을 의미한다. 진공 펌프 없이 소형으로 완전 진공 밀봉된 X-선원은 사용자의 요구 사항에 따라 다양한 장비에 응용될 수 있는데, 특히 낮은 소비전력의 소형장비에 응용이 가능할 것이다.

특히, (그림 13)에 나타난 바와 같이 ETRI에서 제작된 직경 6mm의 초소형 CNT X-선원은 인체 내부에 삽입하여 X-선 영상을 얻거나 수술 중 암 조직에 직접 X-

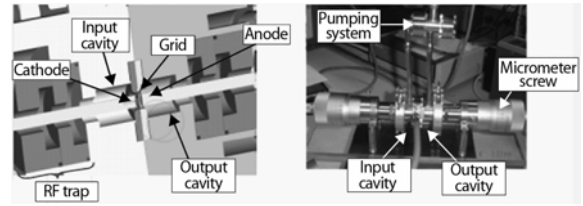


〈자료〉: ETRI, 2012.

(그림 13) 직경 6mm 초소형 CNT X-선원

선을 조사하여 정상 조직의 방사선 피폭을 최소화하면서 암 치료를 할 수 있는 근접 치료에 활용될 수 있다[4].

이외에 나노전자원은 진공증폭기에도 적용될 수 있는데, SSA(Solid-State Amplifier)에 비해 부피가 크지만 안정적으로 고출력을 낼 수 있다는 장점이 있다[5]. 수십 GHz의 주파수를 수십 와트의 출력으로 발생시킬 수 있는 분야에서는 진공증폭기와 SSA가 경쟁하고 있으나 SSA가 더 선호되고 있는 추세이다. 하지만 더 높은 주파수가 필요한 영역, 예를 들어 인공위성 등에는 높은 출력의 파워와 긴 수명이 필요하므로 TWTs (Traveling-Wave Tubes)에 관심이 집중되고 있다. TWTs는 대부분 열전자원을 사용하고 있으며 연속모드에서는 $1\sim 2\text{A}/\text{cm}^2$, 일반적으로는 $50\sim 150\text{A}/\text{cm}^2$ 의 매우 높은 전류밀도가 요구된다. 열전자원을 사용할 경우 발생 메커니즘상 방출된 전자빔을 수 GHz 이상의 주파수로 조절할 수 없으므로 구조물에 상호작용시켜 주파수를 높여야 한다. 따라서 TWTs의 길이나 무게가 심각하게 커질 수 밖에 없어서 오래 전부터 사람들은 냉음극을 사용하면 작고 효율이 높은 진공증폭기를 만들 수 있을 것이라는 생각을 해왔고, 최근 CNT 등의 나노전자원을 이용한 개발이 여러 곳에서 진행 중이다. (그림 14)에 Cambridge-Thales에서 제작한 CNT 삼극 구조의 32GHz modulation을 나타내었다. CNT 어레이(array)가 $1.25\times 1.25\text{mm}^2$ 크기의 캐소드에 형성되어 있으며 $1.2\text{A}/\text{cm}^2$ 의 최고 전류밀도로 32GHz, 8W의 출력을 얻을 수 있었다.



〈자료〉: Cambridge-Thales, 2005~2008.

(그림 14) CNT 삼극 구조의 32GHz Modulation 장비

IV. 결론

FED를 통해 붐이 일었던 나노전자원 연구는 최근 몇 년간 LCD 및 LED 기술의 폭발적인 발전에 밀려 주춤하고 있는 추세이다. 하지만 나노전자원의 신뢰특성이 향상되면서 X-선 튜브 등의 진공 소자에 나노전자원의 접목이 시도되고 있어 반가운 분위기이다. 앞으로 나노전자원이 고밀도의 전류를 안정적으로 인출할 수 있는 기술이 확보될 때 응용할 수 있는 분야는 무궁무진하게 많다. 이를 위해 ETRI 나노전자원창의연구실에서는 양자극한의 영역에서 구동하는 초고밀도 전계방출 에미터 기초 기술 및 응용 기술을 개발하기 위해 노력 중이다.

용어해설

양자역학적터널링 고전적인 물리학 관점에서는 일어날 수 없는, 장벽을 입자가 통과하는 양자역학적인 현상

화학기상증착법(Chemical Vapor Deposition: CVD) 고순도의 고체 물질을 만드는 화학공정. 반도체 공정에서 박막을 만드는데 흔히 쓰임.

연색성 연색지수(color rendition index)라고도 불리며 광원이 이상적인 광원 혹은 자연광원에 비해 물체 고유의 색을 표현하는 능력을 의미함.

Mammography 30kV의 낮은 에너지를 가지는 X-선 을 이용하여 유방암을 진단하는 영상의학기술

약어 정리

| | |
|-----|-------------------|
| CNF | Carbon Nano Fiber |
| CNT | Carbon Nano Tube |
| CNW | Carbon Nano Wall |
| CRT | Cathode Ray Tube |

| | |
|-------|----------------------------------|
| CVD | Chemical Vapor Deposition |
| DBT | Digital Breast Tomosynthesis |
| FEBLU | Field Emission Back Light Unit |
| FED | Field Emission Display |
| FEL | Field Emission Lamp |
| FESEM | Field Emission SEM |
| LCD | Liquid Crystal Display |
| LHC | Large Hadron Collider |
| MWCNT | Multi Wall CNT |
| SEM | Scanning Electron Microscope |
| SSA | Solid State Amplifier |
| SWNT | Single Wall CNT |
| TEM | Transmission Electron Microscope |
| TFT | Thin Film Transistor |
| TWTs | Traveling Wave Tubes |
| XRF | X-Ray Fluorescence |

참고문헌

- [1] S. Senda et al., "Super Miniature X-ray tube," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, no. 23, 2004, pp. 5679-5681.
- [2] F. Sprenger et al., "Stationary Digital Breast Tomosynthesis with Distributed Field Emission X-ray Tube," *Proc. SPIE*, vol. 7961, 2011, pp. 79615I-1-79615I-6.
- [3] J.-W. Jeong et al., "A Dramatic Improvement in the Lifetime of the Fully Vacuum-sealed Micro-focusing X-ray Tube for Stationary Digital Breast Tomosynthesis," *Proc. IVNC*, 2012, pp. 392-393.
- [4] S. Choi et al., "A Novel Gate Structure for a Miniature X-ray Tube Based on CNT Emitters," *Proc. IVNC*, 2012, pp. 390-391.
- [5] Y. Saito et al., *Carbon Nanotube and Related Field Emitters*, Ed., Y. Saito, Wiley-VCH, 2010.