



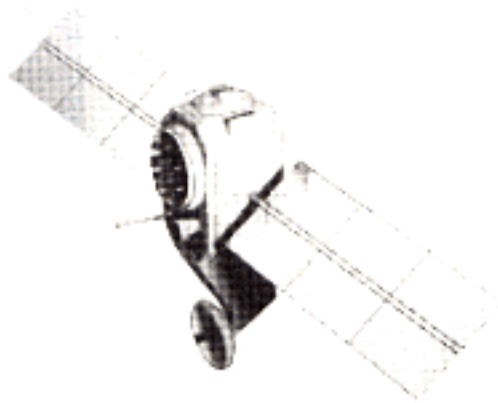
테크니컬
시리즈
TECHNICAL
SERIES

FED 기술강좌 (I)

진공 마이크로 일렉트로닉스(I)

전계방출 표시소자(FED : Field Emission Display)는 1990년대에 이르러 주목을 끌기 시작한 새로운 평판 표시기의 일종이다. 본 강좌에서는 FED 기술을 이해하고자 하는 이들을 위하여 관련 학문 분야로부터, 개발 및 제조 기술, 그리고 기술의 현황과 전망에 이르기까지를 다루어 보고자 한다. 본 강좌는 6회에 걸쳐 연재될 것이며, 제 1~2회에서는 FED라는 새로운 기술 분야가 탄생하는데 밑거름이 된 진공 마이크로 일렉트로닉스(Vacuum Micro Electronics) 분야를, 제 3~5회에서는 FED의 개발에 있어서 핵심 분야인 전계 방출 소자 어레이(Field Emitter Array : FEA) 기술, FED용 발광체 기술, 진공 패키징(Packaging) 기술, 그리고 FED의 구동 회로기술 등을 포함한 주요 공정 기술들을, 제 6회에서는 FED의 현황 및 향후 전망에 관해 기술할 것이다. <편집자주>

주병권, 오명환 / KIST 정보전자연구부



진공 마이크로 일렉트로닉스

열 이온 진공관이 전자 회로에 이용되던 시절부터 소자의 크기를 줄이고 전력 소모를 감소시키고자 하는 노력이 지속되어 왔으며, 실제로 그 크기를 1cm^3 이하로 만든 예도 없지 않았다. 그러나, 1955년에서 1965년에 이르는 10년여 동안 진공관은 고체 전자 소자(Solid-State Micro Electronic Device) 들로 급격히 대체되었는데, 이는 다음과 같은 주요한 연유에서 비롯되었다. 즉, 전자들을 진공으로 유입시킬 수 있도록 전자

원(Electron Source)을 가열시키는데 필요한 전력 낭비가 심하고 아울러 이로 인해 소자가 일정 규모 이하로 작아질 수 없다는 점, 열 이온 음극으로부터 얻을 수 있는 방출 전류의 양에 한계가 있다는 점을 꼽을 수 있다. 물론 오늘날에도 마이크로 웨이브 튜브나 CRT(Cathode Ray Tube) 표시기 분야에서 특수한 용도로 진공관이 사용되기는 하나, 대부분 트랜지스터 등의 고체 소자로 대체된 상태이다.

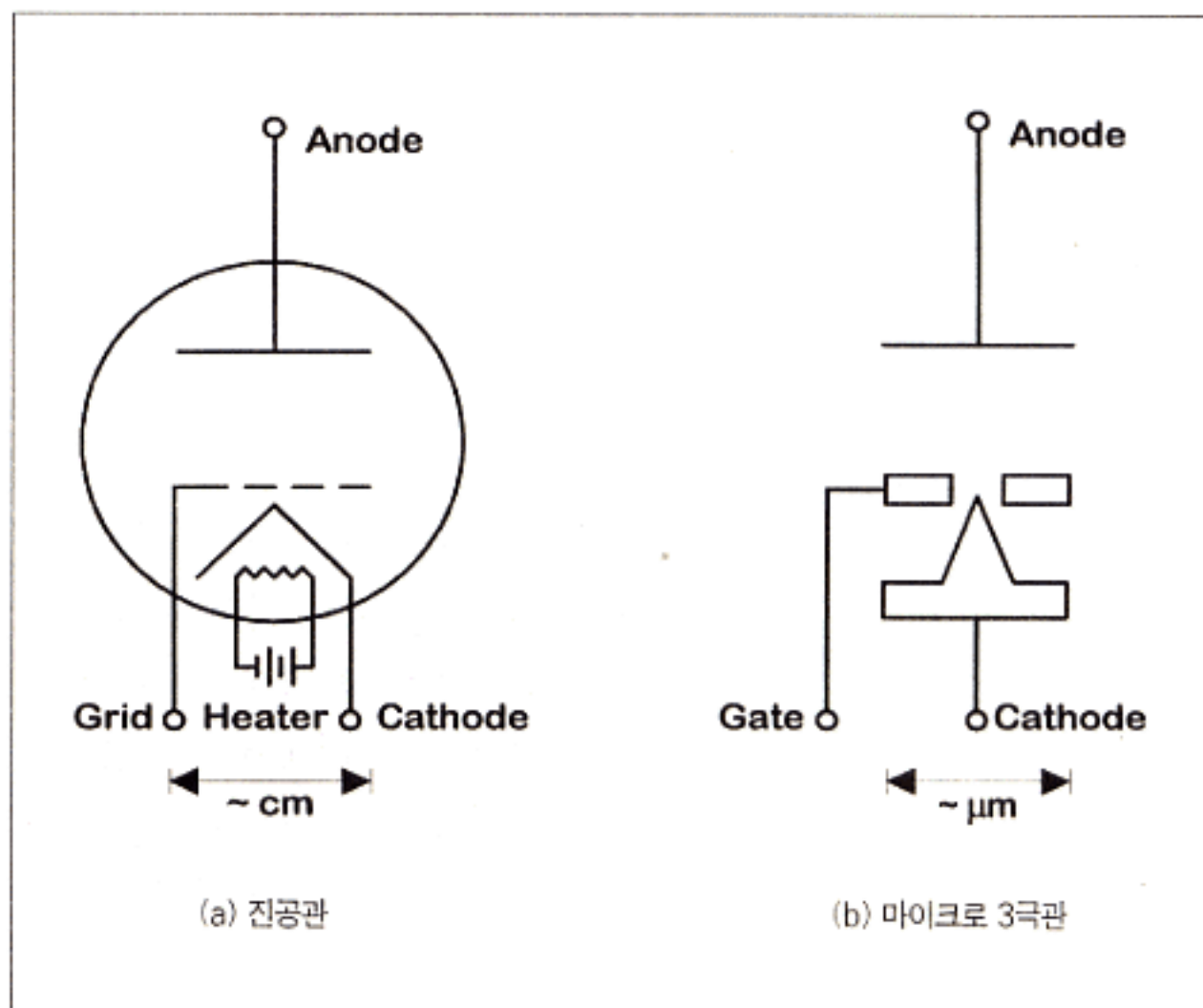
종래의 열 음극 진공관에 이용되던 전자의 최대 전류 밀도가 약 $0.5\text{A}/\text{cm}^2$



에 불과한 반면, 금속-반도체 접합을 갖는 고체 소자의 경우, 금속으로부터 반도체의 전도대 내로 주입될 수 있는 전류 밀도가 10^2A/cm^2 이상에 이르고 있다. 따라서 진공 소자가 고체 소자와 다시 한번 경쟁을 하기 위해서는 소자의 크기도 가능한 한 작아야 할 뿐만 아니라, 10^2A/cm^2 이상을 도출해 낼 수 있는 전자원의 등장이 가장 시급하다고 볼 수 있다. 이를 향한 가장 유망한 후보가 전계 방출 현상을 이용한 진공 소자라 볼 수 있다.

이상과 같이 가장 근본적이고도 주요한 개념을 토대로 하여, 1980년대 말부터 새로이 정립되기 시작한 학문 분야가 진공 마이크로 일렉트로닉스(Vacuum Micro Electronics)이며⁽¹⁾, 이는 진공 내의 전자 전송을 토대로 하는 새로운 기술임과 동시에 기존의 고체 상태 소자용으로 개발된 IC(Integrated Circuit) 기술을 응용하는 연구 분야로 정의될 수 있다. 진공 상태는 가장 이상적인 전자 전송 매체이므로, 이는 최고로 발달된 기술을 이용하여 최적의 소자를 제조한다고도 볼 수 있다.

이러한 부류의 진공 마이크로 소자들은 종종 종래의 진공관과 비교되는데, 이를 살펴보면 그림 1과 같다. 그림 1(a)와 같은 종래의 열 음극 진공관의 경우, 전자를 진공으로 방출시킬 수 있도록 음극을 가열하는데 소모되는 전력이 크고, 소자의 규모를 줄이는데 제한이 있었으며(주로 cm 단위), 아울러 음극으로부터 진공 내로 주입될 수 있는 전류가 1A/cm^2 정도 이하로 제한된다.



그러나, 그림 1(b)에 보인 구조를 갖는 진공 마이크로 소자에 있어서는 양자역학적 터널링(Tunneling)에 의한 전계 방출 현상을 이용하므로 소모 전력이 매우 적고, 방출 전류도 수~수십 A/cm^2 이상에 이를 수 있다. 뿐만 아니라 그 크기도 수 μm 에 불과하다. 아울러 IC 공정을 이용한 일괄 대량 생산이 가능하며, 전자 회로와의 집적화도 용이하다는 등의 장점도 있다.

이와 같이 전계 방출 현상을 이용한 진공 소자의 경우, 높은 방출 전류 밀도를 얻을 수 있음은 물론, 다음과 같은 점들에서도 트랜지스터 등을 비롯한 기존의 고체 소자에 비해 상대적 우월성을 지니고 있다.

- 진공 소자에 있어서 전자 전송은 탄동 방식(Ballistic Mode)에 의하므로, 충돌(Collision)이 우세한 전송 방식을 갖는 반도체와는 달리 전송 매체 내에서 전력 소모가 일어

〈그림 1〉
진공관과 마이크로 3극관의 비교



전계 방출 현상을 이용한 진공 소자의 경우, 높은 방출 전류 밀도를 얻을 수 있음은 물론, 다음과 같은 점들에서도 트랜지스터 등을 비롯한 기존의 고체 소자에 비해 상대적 우월성을 지니고 있다.

- 나지 않는다. 이는 고전력 및 고주파용 소자에서 특히 중요하다.
- 반도체를 이용한 고체 소자의 경우 동작 특성이 온도에 크게 의존하나(즉, 저온에서는 절연체 쪽으로, 고온에서는 도체 쪽으로 향함), 진공 소자의 동작 특성은 온도의 영향을 받지 않는다.
- 아울러 반도체에서 일어나는 소프트 에러(Soft Error), 즉 방사선 입사 등에 의한 신호의 손상과 같은 현상이 일어날 우려가 적다. 전계 방출은 진공 내에서 금속 표면에 인가되는 전계가 $0.5\text{V}/\text{\AA}$ 이상일 때 일어나는데, 이는 전자가 금속 표면에서의 좁아진 전위 장벽을 뚫고 진공 내로 방출되는 양자역학적인 터널링(Tunneling) 현상을 기본 메커니즘으로 하고 있다. 이러한 과정은 아래와 같은 Fowler-Nordheim 식에 의해 수식적으로 묘사될 수 있다. 즉,

$$I = aV^2 \exp(-b\phi^{3/2}/V) \dots (1)$$

(1)식에서, a 와 b 는 특정 상수이고, I 는 방출 전류, V 는 금속 표면에 인가된 전압, 그리고 ϕ 는 금속의 일함수이다. 이 과정에서 얻어질 수 있는 전류는 10^6 에서 $10^{12}\text{A}/\text{cm}^2$ 에 이른다.

이상과 같이 매우 큰 전류를 얻을 수 있음에도 불구하고 최근에 이르기까지 전계 방출 이론이 실용적인 소자에 활발히 적용되지 못하고 있는데, 여기에는 다음과 같은 장애가 있다.

- 10^8cm^2 이상의 영역으로부터 균일한 전계 방출을 얻는 것이 불가능하게 여겨졌다. 넓

은 면적의 전극을 이용하더라도 $10\sim 15 \sim 10^8\text{cm}^2$ 범위의 불규칙한 영역에서만 전계 방출이 일어날 뿐이었다.

- 일반적인 진공관 정도의 진공하에서는 방출 전류의 변동 및 시간에 따른 감쇠가 매우 심하였다.
- $102\sim 103\text{V}$ 정도의 양극 전압에 의해 일정 거리만큼 떨어진 음극 표면에 $0.5\text{V}/\text{\AA}$ 이상의 전계를 도출하기 위해서는 바늘 모양의 팁의 방출부의 끝 반경(End Radius)이 약 $1\mu\text{m}$ 이하가 되어야만 하였다.

Gomer⁽²⁾는 음극 팁의 끝 반경이 r 이고 일정 거리만큼 떨어진 양극에 걸리는 전압이 V 일 때, 팁 끝에서의 전계 E_t 가 약 $V/5r$ 로 근사화 됨을 보였다. 이 경우, 팁의 끝 반경을 $0.2\mu\text{m}$ 정도로 가늘게 하여도 전계 방출을 유도할 수 있는 전압은 5kV 정도나 되며, 이렇게 높은 전압 하에서는 두 전극간에 양이온들이 발생하여 팁을 스퍼터링(Sputtering)하게 된다. 이러한 문제점은 10^{-14}torr 이상의 고진공하에서는 해결될 수 있으나, 이는 현실적으로 실현 불가능한 일이다. 따라서 실용적인 진공하에서는 전계 방출 특성이 불안정하고 아울러 동작 수명이 매우 짧아지는 문제가 발생하게 된다.

$10^{-5}\sim 10^{-9}\text{torr}$ 범위의 실용적인 진공하에서 동작이 가능한 전계 방출 소자는 Buck와 Shoulder^(3,4)의 아이디어를 토대로 하여 Spindt⁽⁵⁾에 의해 최초로 제조되었다. Spindt는 전계 방출 소자를 제조하기에 매우 유용한 미세 공정 기술을 고안하였는데, 이 소자는 그림 2에 보인 바와 같이 금속 팁(높이 $1\mu\text{m}$, 팁 반경



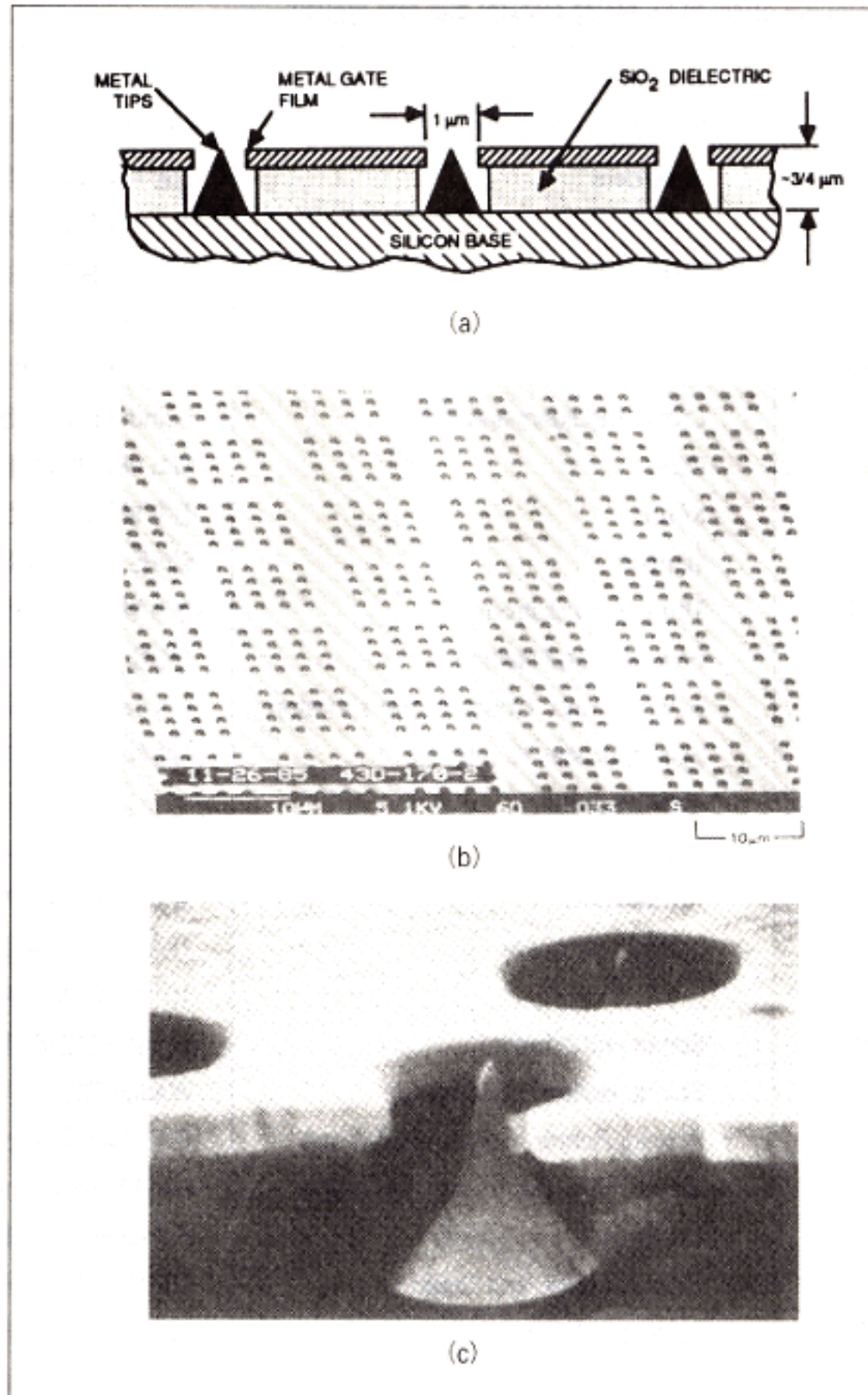
300Å), 이로부터 0.5μm 정도 떨어진 게이트 전극 등으로 구성되어 있다.

팁과 게이트 전극간에 300V의 전압을 인가하게 되면 팁 한개당 1~10μm 정도의 방출 전류를 얻을 수 있다. 최근에는 소자의 공정 기술 등을 더욱 향상 시킴으로써 100V 이하의 게이트 전압에 대해 팁 당 100μA 수준의 전류를 얻을 수도 있으며, 아울러 패키징 밀도(Packaging Density)를 10^7 tips/cm²까지 증가시켜 어레이당 1000A/cm²의 전류 밀도를 얻을 수 있다. 또한 게이트 및 양극 전압이 현저히 낮아짐으로써 양이온에 의한 팁의 스퍼터링 현상을 방지할 수 있고, 수명도 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ torr의 진공도에서 75,000 시간 이상에 이르기까지 입증된 바 있다⁽⁵⁾.

Spindt의 연구를 토대로 하여, 최근에 이르기까지 미세 전계 방출 소자에 관한 연구는 지속적으로 수행되어 오고 있는데, 주로 다음과 같은 점들을 중점적으로 고려하고 있다.

- 가격, 수율, 생산량 등과 같은 경제적인 요인
- 패키징 밀도나 방출부의 구조 개선을 통한 방출 전류 밀도의 증가
- 낮은 일함수를 갖는 방출 재료를 이용하거나 혹은 게이트 전극을 팁에 더욱 근접시키는 방법을 통한 동작 전압의 감소
- 어레이식 배열을 위한 단위 소자들간의 균일도 향상
- 소자의 동작 수명 향상을 위한 팁의 구조 및 재료적 개선

이상과 같은 소자의 개선 과정을 통해 얻어진 연구 결과들 중에서 대표적



인 것들을 표 1에 년도 순으로 나타내어 보았다.

〈그림 2〉
Spindt형 전계 방출 소자 어레이의 모양⁽¹⁾

FEA의 특성 평가

특수한 목적의 소자를 설계하기 위해서는 소자의 특성을 정량적으로 이해하는 것이 매우 중요하다. FEA에 있어서 고려되어야 할 설계 요소는 다음과 같다.



〈표 1〉 진공 마이크로 일렉트로닉스 분야에 있어서의 주요 연구 결과들¹⁾

년 도	인 명	주요 결과
1958	Buck and Shoulders	1μm-scale급 소자 제조 기술을 최초로 제안
1961	Shoulders	진공 마이크로 일렉트로닉스 분야를 창안 전계 방출원을 이용한 미소 3극관을 제안
1968	Spindt	반도체 기술과 금속 팁을 이용하여 제조된 전계 방출 소자 및 그 동작 특성을 최초로 보고(TFFEC 혹은 Spindt FEA)
1969	Williams and Simon	순방향 바이어스된 Si p-n junction으로부터의 전자 방출 현상을 입증
1970	Crost, Shoulders and Zinn	Spindt FEA를 이용한 평판 표시 소자를 제안
1971	Cline	미소 바늘 어레이를 만들기 위한 Directional Solidification 기술을 고안
1971	Kohn	전자 방출을 위해 전자 친화력이 음(-)의 값인 물질을 사용
1972	Geppert	열이온 방출 소자를 이용한 Lateral 미소 진공 3극관을 최초로 보고
1974	Thomas, Wickstrom, Schroder, and Nathanson	전계 방출용 실리콘 팁 어레이의 제조 기술과 동작 특성을 최초로 보고
1976	Smith, Judge, Trongello and Thomson	p-n Junction을 갖는 실리콘 전계 방출 소자를 보고
1976	Spindt, Brodie, Humphrey and Westerberg	대면적 TFFEC 어레이 및 물성에 관한 논문
1976	Brodie	Spindt FEA와 Microstrip Line을 이용한 Microwave 소자를 제안
1978	Hoeberechts	결정 의존성 식각 기술을 이용한 Si-tip FEA를 보고
1979	Brodie and Spindt	12A/cm ² 의 전류 밀도로 25,000 시간 이상 동작하는 Spindt FEA를 입증 10 ⁻⁶ torr에서도 소자 동작 진공도가 가능함을 입증
1980	Spindt and Alberth	화산형 이온원을 최초로 보고
1983	Spindt, Holland and Stowell	Wedge 모양의 금속 팁 FEA를 보고
1983	Bennig, Rohrer, Gerber and Weibel	원자 분해능을 갖는 STM을 보고
1985	Meyer, Ghis, Rambaud, and Muller	단색 Matrix-addressed FED를 최초로 보고
1986	Lally, Mack, and Spindt	Spindt FEA를 이용한 Microwave Tube를 최초로 보고
1986	Gray, Campisi, and Green	실리콘 FEA를 이용한 Lateral 미소 3극관을 보고
1986	Curtis and Hsieh	Spindt FEA를 이용하여 질량 분석기에 응용될 수 있는 Electron Impact Ionizer를 보고
1987	Holland, Spindt, Brodie, Mooney, and Westerberg	비교적 높은 분해능(300화소/인치)과 3색광을 내는 FED를 보고
1988	Chairman: Gray and Spindt	제 1회 IVMC 개최(Williamsburgh, VA, USA)
1989	Makhov	10V 이하에서 전계 방출을 얻음
1990	Betsui	실리콘 방출 소자로부터 50μA/tip의 방출 전류를 얻음
1990	Marcus, Ravi, Gmitter, Chin, Liu, Orvis, Diavlo, Hunt, and Trujilo	실리콘을 재료로 하여 Subnanometer 크기의 팁을 가공
1990	Spindt, Holland, Rosengreen, and Brodie	FEA로부터 1,000A/cm ² 의 전류를 얻음
1990	Ghis, Meyer, Levy, Rambaud, and Leroux	완전 동작이 가능한 FED를 발표
1992	Spindt	1GHz 이상에서 동작하는 미소 진공 전자 소자를 발표



기본 특성 요소

- 전류-전압 특성
- 최대 방출 전류치
- 방출 전자의 에너지 분포
- 공간 전하 효과
- 방출 신호의 표동 및 잡음 등.

공학적인 고려 요소

- 수명 예측 (Arc 및 Sputtering)
- 전류 조절용 저항
- 팁-게이트 간의 누설 전류
- 팁-양극 간에 있어서 전자의 궤적
- 최적 조립 공정
- 정전 용량 및 방출 전류의 변조 등.

맺음말

본고에서는 진공 마이크로 일렉트로닉스에 관한 첫번째 내용으로서, 이의 이론 및 기술적 개요와 현재까지의 연구 동향을 다루어 보았다. 제 2회에서는 이에 관한 두번째 내용으로 FED를

비롯하여 이 분야의 응용도 및 소자 등에 대해 서술하고자 한다.

참고 문헌

- [1] I. Brodie et al., "Vacuum microelectronic devices", Proc. of IEEE, vol. 8, no. 7, p. 98(1994)
- [2] R. Gomer, Field Emission and Field Ionization, Cambridge, MA : Harvard Univ. Press, (1961)
- [3] D. A. Buck et al., "An approach to microminiature systems", Proc. Estem Joint Computer Conference, AIEE, New York, p. 55(1958)
- [4] K. R. Shoulder, "Microelectronics using electron beam activated machining techniques", Adv. Comput., F. L. Alt, ED., vol. 2, p. 135(1961)
- [5] C. A. Spindt, A thin film field emission cathode, J. Appl. Phys., J. Appl. Phys., vol. 39, p. 3504(1968)

이전안내

주소: 서울시 강남구 논현2동 81-9 동보B/D 102호

TEL: 518-5181

FAX: 515-6092

리치코코리아(주)

