

논문 2000-9-3-05

## 표면 미세 가공된 측면형 전계 방출 소자를 이용한 초소형 진공 센서의 제작

朴興雨, 朱炳權, 李允熙, 朴廷浩, 吳明煥

Fabrication of Micro-Vacuum Sensor using  
Surface-Macromachined Lateral-type Field Emitter Device

Heung-Woo Park, Byeong-Kwon Ju, Yun-Hi Lee, Jung-Ho Park, Myung-Hwan Oh

## 요 약

미소 공간 내의 진공도를 측정하기 위하여 마이크로 진공 센서를 제작하였다. 동작 원리로서 전계 방출 전류가 진공도에 의존한다는 점을 이용하였고, 이를 위해 측면형 실리콘 전계 방출 소자를 제작하였다. 음극과 게이트, 그리고 양극을 분리하기 위하여 표면 미세가공을 이용하였으며, 제작된 소자는  $10^{-5} \sim 10^{-8}$  Torr 범위의 진공도에서 1.20~2.42  $\mu\text{A}$  범위의 방출 전류 변화를 보였다.

## Abstract

A micro-vacuum sensor was fabricated for the measurement of the vacuum level in micro-space. The fact that the field emission current was dependent on the environmental vacuum level was employed as an operating principle. The fabricated lateral-type field emitter triode with a cathode, a gate and an anode separated by using the surface micromachining process showed the emission current variation in the range of 1.20~2.42  $\mu\text{A}$  for the vacuum range of  $10^{-5} \sim 10^{-8}$  Torr.

## 1. 서 론

최근 들어 Fowler-Nordheim 터널링 현상을 이용하는 전계 방출 표시기(Field Emission Display: FED)와 MEMS (MicroElectroMechanical Systems) 소자 등과 같이 진공 공간 내에서 동작하는 소자들에 관한 연구가 활발해지면서 미소 공간 내의 진공도를 실시간으로 평가하기 위한 센서 소자들의 필요성이 증가하고 있다<sup>1-7)</sup>. 다결정 실리콘은 표준반도체 공정과 부합되고 LPCVD 등을 이용하면 대면적에 걸쳐 균일하게 막을 형성시킬 수 있다는 장점이 있어 전계방출소자의 전자

방출원 재료로 많이 사용되고 있다<sup>8-10)</sup>. 기존에 사용되어 오던 거의 모든 진공시스템에는 Pirani gauge와 같은 진공도 측정용 센서가 부착되어 있다. 피라니 게이지의 측정 범위는 대부분  $10^{-1}$ 에서 10 Torr 정도의 범위이며 열 전도를 이용한다. 피라니 게이지에는 열원과 wheat-stone bridge 형태의 신호 검출부가 있다. 주변 환경 변화에 따라 열원 주변의 열에 민감한 저항회로에 유기되는 온도 변화를 검출해내는 방식이다. 그러나, 피라니 게이지는 크기가 크며 500 ms 정도로 크며 불규칙한 응답시간을 갖고 있다는 단점이 있다. 이에 monolithic micromachining을 이용하는 진공센서들이 연구되고 있지만 이들은 0.1 mTorr 까지만 측정 가능하다는 단점을 가지고 있다<sup>11) 17)</sup>.

본 연구에서는 다결정 실리콘 측면형 전계 방출 소

한국과학기술연구원 정보재료소자연구센터(Electronic Materials & Devices Center, KIST)

\* 고려대학교 전자공학과 (Dept. of Electronics Eng., Korea University)

<접수일자 : 2000년 2월 9일>

자를 이용한 진공 센서를 제안하였다. 표면마이크로머 시닝법과 수평형 전계방출소자의 장점을 이용하여 초소형이고, 센서의 제조가 간단하며 공정이 균일하여 재현성을 얻을 수 있고, 동작 영역에 따라 공정 변수 및 기하학적 치수를 변경하기가 용이한 다결정 실리콘 전계방출소자를 제작하여 터널링 전류의 진공도 의존성을 확인함으로써 전계방출소자의 진공 센서 응용 가능성을 제안하였다.

## 2. 제조 방법

측면형 전계 방출 소자를 제작하기 위한 기본 공정 순서는 그림 1과 같다. p-type (100) 실리콘 기판 위에 기판과 상부 구조물과의 전기적 절연 및 버퍼층으로써 실리콘 질화막을 0.3  $\mu\text{m}$  ( $\pm 2\%$ ) 두께로 증착하였다. 이 위에 게이트와 음극 및 양극의 전극들로 사용될 1차 다결정 실리콘 층을 증착하였다. 1차 다결정실리콘 막의 두께는 0.3  $\mu\text{m}$  ( $\pm 2\%$ ) 이며,  $\text{POCl}_3$ 를 이용하여 도핑 농도를  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 으로 조절하였고 면저항은  $30.0 \Omega/\square$  ( $\pm 2\%$ ) 이다. 사진 식각 공정에 의해 첫번째 다결정 실리콘 층을 패터닝 한 다음, 이 위에 희생층으로 사용될 PSG(phospho-silicate glass) 막을 2.04  $\mu\text{m}$  ( $\pm 5\%$ )의 두께로 증착하고 패터닝 하였다.

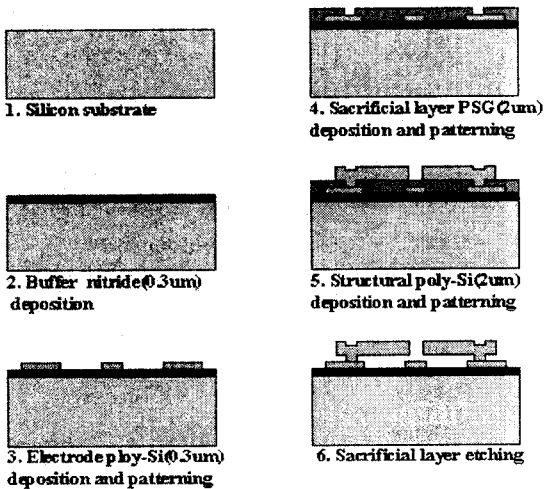


그림 1. 측면형 실리콘 전계 방출 소자의 제조 공정  
Fig. 1. Fabrication process of the lateral-type Si field emitter device

다음으로, 구조체로 이용될 2차 다결정 실리콘 층을

2.03  $\mu\text{m}$  ( $\pm 3\%$ ) 두께로 동일 농도를 갖도록 증착하고 패터닝 하였으며 면저항은  $8.1 \Omega/\square$  ( $\pm 3\%$ ) 이다. 이렇게 제작된 2차 다결정 실리콘 층의 residual stress, stress gradient, Young's modulus는 각각 3.296 MPa, 2.4 Mpa, 160 Gpa( $\pm 10\%$ ) 이다. 상기의 제 공정들은 서울대 마이크로 시스템 센터의 MPC 공정으로 수행되었다.

마지막으로 PSG 희생층을 제거하여 캔티레버 형태의 음극과 양극을 형성하였다. HF(49%)에 10분 처리하여 희생층을 제거한 후, 캔티레버와 기판의 점착(stiction) 방지를 위해 승화건조법(sublimation drying)을 적용하였다. 본 연구에서 사용한 승화건조법 처리순서는 HF dipping(상온, 10분) - D.I.Water Dipping(상온, 10분) - IPA dipping(80°C, 10분) - p-DCB dipping (80°C, 10분) - Cooling(상온, 10분) - 승화 ( $10^{-3}$  Torr, 20분) 이다. 점착 방지를 위해 사용되는 방법에는 본 연구에서 사용한 승화건조법 외에도 SAM (self-assembled monolayer) 코팅법, vapor phase etching법, evaporation method, 초임계건조법( $\text{CO}_2$  supercritical drying), polymerization 방법, 고온처리법, 접촉면적감소법, anti-stiction 구조를 이용하는 방법 등이 이용되고 있다<sup>18-31</sup>. 승화건조법은 세척액을 바로 기체로 증발시키는 과정에서 모세관 힘이 작용한다는 사실에 기초하여 세척액을 고체로 만든 후 액체 상태를 거치지 않고 바로 승화 시킴으로써 액체-기체 계면에 존재하는 표면장력이 발생하지 못하게 억제하고 따라서 모세관 힘에 의한 일시 점착을 방지하게 되는 방법이다. SAM 코팅법이 주로 모세관 힘의 감소에 초점이 맞추어진 반면 승화건조법은 모세관 힘의 제거에 그 목적이 있으므로 특성이 기존의 방법들에 비해 매우 우수하다. 본 연구에서는 승화물질로서 p-DCB(dichlorobenzene)를 이용하였으며, 로터리펌프가 장착된 진공시스템에서 약 20분 동안  $10^{-3}$  Torr 정도의 진공도를 유지시켜 주면 p-DCB가 모두 승화되고 sublimation drying 공정이 완료되어 완성된 소자가 얻어진다.

완성된 소자는 그림 2에 보인바와 같은 UHV(ultra high vacuum) 챔버 내에서 테스트되었다. UHV 챔버에는 챔버 내부의 압력을 낮추기 위한 로터리펌프와 터보펌프, 이온펌프가 연결되어 있으며 다이오드와 트라이오드 구조에 전압을 인가하고 전류를 측정하기 위한 프로브 스테이션이 장착되어 있다. 인가전압-전류

데이터는 각 프로브에 연결되어 있는 Kiethley 236-7 SMU(Source & Measure Unit)를 이용하여 측정되고 저장되었으며 실시간 모니터링 되었다.

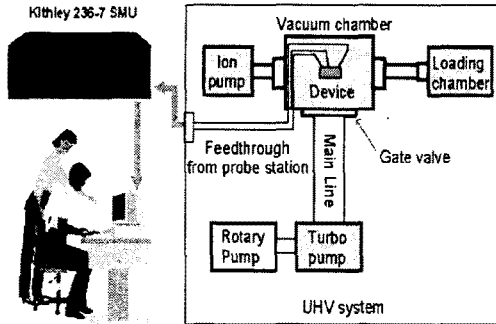


그림 2. UHV 측정시스템 개략도

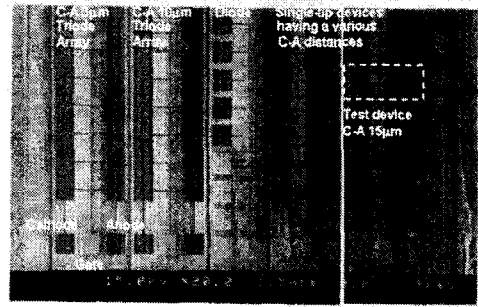
Fig. 2. Schematic diagram of the UHV test system

### 3. 결과 분석

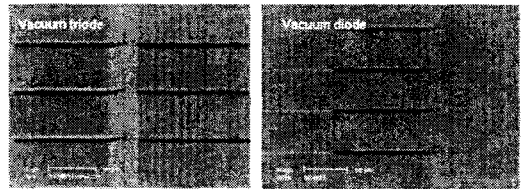
#### 3-1. 소자의 모양

그림 3(a)는 제조된 칩의 전체 사진으로서, 여러 규격의 소자들로 구성되어 있다. 즉, 그림 3(a)에서 음극-양극간 거리를 3  $\mu\text{m}$ 로 한 트라이오드 어레이(C-A 3  $\mu\text{m}$  Triode Array), 음극-양극간 거리를 10  $\mu\text{m}$ 로 한 트라이오드 어레이(C-A 10 $\mu\text{m}$  Triode Array), 다이오드형 단일소자들(Diode), 음극-양극간 거리를 변화시킨 트라이오드형 단일 소자들(Single-tip devices having a various C-A distances)이 이에 해당한다.

그림 3(b)와 (c)는 각각 음극 팁-바닥에 형성된 게이트-양극으로 이루어진 트라이오드형 소자와 음극 팁-바닥에 형성된 양극들로 이루어진 다이오드형 소자들을 보인 것이다. 떠 있는 음극 팁 구조물과 음극용 전극간의 전기적 연결 부분을 그림 3(d)에 보였으며, 트라이오드형 소자의 동작 부분인 음극 팁과 게이트 그리고 양극 부분을 확대한 모양을 그림 3(e)에 나타내었다. 트라이오드형 소자의 음극과 양극의 떠 있는 부분의 크기는 30  $\mu\text{m} \times 120 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$  이며, 음극과 양극간의 거리는 3~100  $\mu\text{m}$ 로 정의되어 있다. 캔틸레버 모양의 떠 있는 부분의 크기는 MEMS MPC 측에서 제공한 미세구조물의 용력 분포 시뮬레이션을 참조하여 설계하였다. 캔틸레버 모양의 경우, 구조물로 사용

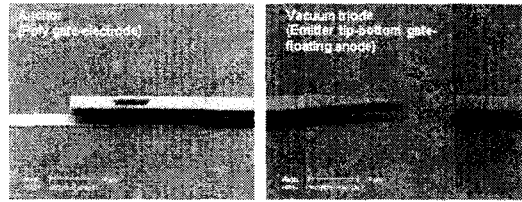


(a)



(b)

(c)



(d)

(e)

그림 3. 제조된 측면형 전계 방출 소자에 있어서 전체 칩(a), 트라이오드 (b), 다이오드(c), 전기적 연결 부분(d), 그리고 동작 부분(e)의 모양

Fig. 3. Entire chip(a), triode(b), diode(c), electrical -connector(d) and active area(e) for the fabricated lateral-type field emitter

되는 2차 다결정 실리콘의 두께를 2  $\mu\text{m}$ , 빔의 폭을 3  $\mu\text{m}$ , 희생층으로 사용하는 PSG의 두께를 2  $\mu\text{m}$ , 다결정 실리콘의 밀도를 2330  $\text{Kg/m}^3$ , 다결정 실리콘의 Young's Modulus 값을 160 Gpa로 할 경우, 500  $\mu\text{m}$ 의 빔 길이 이하에서는 자중에 의한 처짐이 거의 없는 것으로 보고되었다(MEMS MPC 제공). 자중에 의한 처짐으로 기판과 빔이 붙는 빔의 최대 길이는 대략 2.5 mm 정도이다.

금속 배선층이 제공되지 않은 공정상의 제약에 의하여, 소자의 전기적인 측정은 UHV 챔버내에서 프로브들을 이용하여 위의 그림 3(d)와 같이 연결되어 있는

각 해당 패드에 직접 전압을 인가함으로써 이루어졌다. 1차 다결정 실리콘이 전극 배선 및 패드 재료로 이용되었으며, 1차 다결정 실리콘과, 음극과 양극으로 사용되는 캔티레버의 재료인 2차 다결정 실리콘은 그림 1의 4번 공정에서 정의된 anchor 부분에서 직접 연결되어 있다. 이 연결부분에는 1차 다결정 실리콘의 어닐링 시 자연산화막이 형성되어 접촉저항이 존재하나, 5 V 이상의 구동전압을 사용하면 자연히 절연과피가 일어나 접촉저항으로 인한 영향은 무시할 수 있다(MEMS MPC 제공).

**3-2. 전계 분포 시뮬레이션**

제조된 측면형 전계 방출 소자에 있어서 3차원 전자기 시뮬레이터인 Vector Field Tool을 이용하여 팁에 인가되는 전계의 분포를 모사하였다. 그림 4(a)는 소자를 그래픽으로 나타낸 모양으로서 사용된 mesh를 보여주며, 팁을 갖는 음극과 하부의 게이트 전극, 팁과 마주보고 있는 양극 및 바닥의 게이트 전극을 나타내고 있다. Mesh는 팁 근처에서 세밀하게 하여 이 부분의 값이 보다 정확하도록 하였다. 그림 4(b)는 팁의 끝 부분과 양극에서의 전계 분포를 나타낸 것으로 팁의 끝 부분과 양극 끝의 가운데 부분에 강한 전계가 형성되어 있음을 알 수 있다. 그림 4(c)는 게이트에 전압이 인가되지 않은 경우에 팁 끝에 대해 두께 방향으로의 전계 분포를 모사한 것으로 팁의 가장자리, 즉 팁의 상부와 하부의 끝 부분에서 강한 전계가 형성되며 전체적으로 대칭성을 띄고 있다. 그림 4(d)는 게이트에 전압이 인가된 경우의 전계 분포로 비대칭적으로 나타나는데, 게이트에 가까이 있는 부분, 즉, 팁의 하부 끝 부분에 최대 전계가 형성되며, 상부 끝 부분에서의 전계도 하부에 비해서는 작으나 중간 영역들보다는 큼을 알 수 있다. 따라서, 음극과 양극 만을 사용한 다이오드형 구동시에는 상부와 하부 끝 부분에서, 음극과 양극 그리고 게이트를 사용하는 트라이오드형 구동시에는 주로 팁의 하부 끝 부분에서 전자가 방출될 것임을 예측할 수 있다.

위의 시뮬레이션 결과는 음극에 0 V, 양극에 10 V, 게이트에 5 V를 인가하여 얻어진 것이다. 이때, 음극 팁 끝부분에서의 전계의 세기는 최대 115 MV/m로서 기존 수직형 트라이오드 전계방출소자에서 얻어지는 약 160 MV/m 정도의 값 보다는 작은 값이다. 본 모의 실험을 통하여 대체적인 경향을 알아볼 수 있으며 실

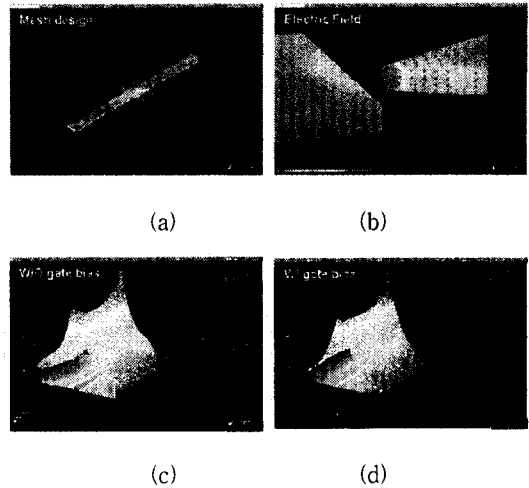


그림 4. 소자의 그래픽 표현 및 mesh design(a)과 전계 방향(b), 게이트 전압이 없는 경우(c)와 게이트 전압이 있는 경우의 팁 끝 부분(d)에서의 전계 분포

Fig. 4. Graphic representation and mesh design(a) and electric field distributions of the device(b), near the tip apices without(c) and with(d) gate bias in the device

제 소자의 양극 인가 전압인 270 V 정도를 적용하면 보다 큰 전계 값을 얻을 수 있다. 또한, 바닥에 있는 게이트에 전압을 인가함으로써 음극 팁 위아래 끝부분의 전계 세기가 달라지는 현상을 확인할 수 있었으며 게이트에 위치한 쪽의 팁 끝 부분이 반대쪽 끝 부분보다 약 20~30 MV/m 정도 더 전계의 세기가 큰 것을 알 수 있었다. 위의 그림 4(c)와 (d)의 밑면에 보이는 히스토그램은 정사영과 같이 2차원으로 맵핑된 전계의 세기를 보여주는 것이다.

**3-3. 동작 특성 평가**

측면형 전계 방출 소자를 고진공 프로브 스테이션 내에 넣고 진공도를 변화시켜 가면서 전계 방출 전류를 측정하였다. 그림 5와 그림 6에는 게이트 전압이 소자의 전기적인 특성에 미치는 영향을 측정한 결과를 보였다. 그림 5에서 알 수 있듯이, 게이트 전압이 0 V에서 서서히 증가함에 따라 양극 전류가 증가하여 20 V에서 가장 큰 값을 얻을 수 있었다. 게이트 전압이 20V 이상이 되면 양극 전류는 점점 줄어들고 게이트 전류는 점차 증가하는 현상을 관찰할 수 있었다. 이는,

그림 6에 보인 바와 같이 게이트 전압을 증가시키에 따라 게이트 전류가 증가하는 현상과 일치하였다. 게이트 전압을 5 V 단위로 증가시켰을 때, 20 V까지는 게이트 전류에 별로 영향이 없었으나 25 V 이후부터는 게이트 전류가 급격히 증가하는 현상을 관찰할 수 있었다. 이 전류는 음극에서 방출된 전자가 양극으로 집속되지 못하고 보다 더 가까운 게이트에 집속됨으로써 양극 전류 기여분의 일부를 뺏음으로서 얻어진 것이다.

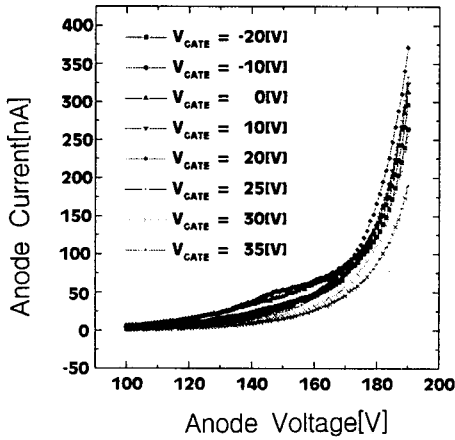


그림 5. 게이트 전압에 따른 양극전류-양극전압 변화 그래프

Fig. 5  $I_{ANODE}$  versus  $V_{ANODE}$  plot under various  $V_{GATE}$  bias (at  $1.0 \times 10^{-7}$  Torr)

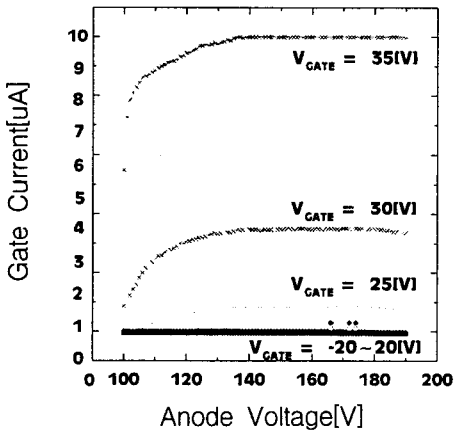


그림 6. 게이트 전압 변화에 따른 게이트전류-양극전압 변화 그래프

Fig. 6  $I_{GATE}$  versus  $V_{ANODE}$  plot under various  $V_{GATE}$  bias (at  $1.0 \times 10^{-7}$  Torr)

그림 7은 진공도 변화에 따른 전계 방출 특성으로, 다이오드형 소자에 대해 양극 전압을 0~270 V로 변화시키면서 15  $\mu\text{m}$  떨어진 음극으로부터 방출되는 양극 전류를 측정 한 결과이다. 이로부터 진공도가 증가할수록 방출 특성도 향상(동작 개시 전압의 감소, 방출 전류의 증가)됨을 알 수 있었다. 이러한 진공도-방출 전류간의 의존 현상은 진공도 변화에 따른 팁 표면 일함수의 변화에 기인하는 것으로 추측된다<sup>[1]</sup>.

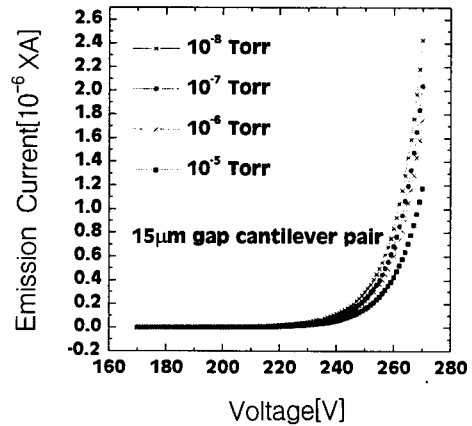


그림 7. 다이오드형 전계 방출 소자에 있어서 진공도 변화에 따른 전류-전압 특성 곡선

Fig. 7. I-V curves of the diode-type field emitter as a function of vacuum level

그림 8은 다이오드형 소자의 동작 특성으로서 일정한 양극 전압에 대해 진공도와 방출 전류의 관계를 도시한 것이다. 이를 살펴보면, 양극 전압이 270 V일 때  $10^{-5} \sim 10^{-8}$  Torr 범위의 진공도 변화에 대해 1.20~2.42  $\mu\text{A}$  범위의 방출 전류 변화가 나타남을 알 수 있다. 절연체의 절연특성 관계로 보다 높은 전계까지의 측정을 하지 못하였으며, 제작된 소자는 300 V 이하에서 절연과피 현상을 보였다. 같은 연유로 인해, long term stability 측정도 할 수 없었다. 고전계까지 견딜 수 있도록 절연막 두께를 증가시키고 특성을 향상시킴으로써 보다 높은 감지도를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서, 전자방출원 재료로 이용된 다결정 실리콘은 grain boundary 개수가 많고 관련 공정이 복잡하다는 단점이 있다. 현재는, 다결정실리콘 전자방출원으로 제작된 센서 소자의 사용 중에 일어날 수 있는 전

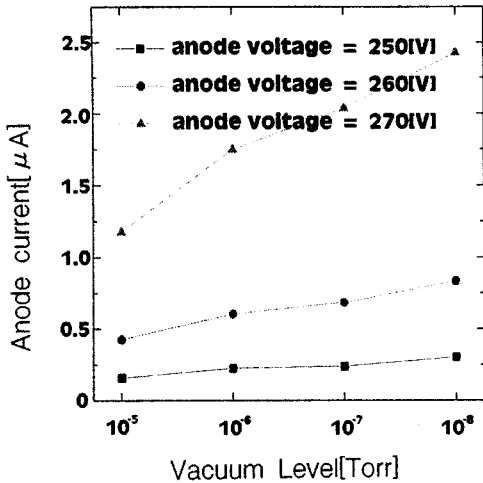


그림 8. 측면형 전계 방출 소자를 이용한 마이크로 진공 센서의 동작 특성

Fig. 8. Operating property of the micro-vacuum sensor using lateral-type field emitter

자방출원의 오염이나 파괴와 같은 열화현상에 대한 문제점이 남아 있다. 공정상의 제약으로 인해 다결정실리콘을 이용하였으나, 추후 연구에서는 보다 물리적, 화학적으로 안정한 물질을 전자방출원으로 이용해야 할 것이다. 현재, 터널링 센서 소자의 전자방출원으로는 Cr(Ti)/Pt/Au 의 순으로 물질을 순차적으로 코팅하여 최종적으로는, 물리화학적으로 안정한 물질인 Au를 전자방출원 표면재료로 이용하고 있는 추세이다<sup>[34-36]</sup>. 또한, 전자방출원의 오염으로 인한 일함수 변화는 터널링 전류의 전체적인 감소를 유기시켜 턴 온 전압을 증가시키는 문제를 발생시킨다. 이 문제를 해결하기 위해서는 페루프 제어회로가 필요하다<sup>[34-36]</sup>. 페루프 보상회로를 이용하면 터널링 센서가 안고 있는 문제점인, 절대적인 신호 센싱에 있어서의 전자방출원 오염이나 열화현상 등으로 인한 에러를 줄일 수 있다.

현재는, 절연막의 두께를 증가시키고, 금속 배선층을 추가하여 패드와의 와이어 본딩을 통해 소자의 전기적 특성을 측정하고 있다. 진공시스템 내에서 특성이 측정된 소자는 진공패키징 기술<sup>[37]</sup>을 이용하여 진공 실장된 미소공간 내에 장착하여 내부의 진공도를 측정할 계획이다. 또한, 트라이오드 특성의 향상을 위하여 게이트의 위치와 폭을 수정하였다<sup>[38]</sup>.

#### 4. 결 론

미소 공간 내의 진공도를 평가하기 위한 수단으로서 터널링 현상을 이용한 마이크로 진공 센서를 제조하고 다이오드 및 트라이오드 특성을 평가하여 보았다. 표면 마이크로머시닝을 이용하여 제조된 센서는 설계와 제조가 용이하였다. 동작 특성을 살펴 볼 때, 다이오드 형의 경우 양극 전압이 270 V일 때 10<sup>-5</sup>~10<sup>-8</sup> Torr 범위의 진공도 변화에 대해 1.20~2.42 μA 범위의 방출 전류 변화가 있는 것으로 나타났다. 현재, 본 소자 제작 및 측정에서 제기된 문제들을 보완하는 연구를 수행중이며, 터널링 현상을 이용하는 기타 센서로서 가속도 센서 및 전자장 크기를 측정하는 센서(vacuum magnetic field sensor)를 제작하여 측정중이다. 또한, 마이크로 터널링센서 응용에 있어 필수기술인 진공패키징에 대한 연구도 병행하여 수행되고 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부와 산업자원부가 주관하는 초소형 정밀기계 선도기술개발사업의 연구비 지원과 서울대 마이크로 시스템 센터의 제2차 MEMS MPC 공정 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] R.H.Fowler and L.W.Nordheim, Proc. R. Soc., London A 119, p.173 (1928)
- [2] I.Brodie et al., Proc. IEEE, vol. 82, no. 7, p.98 (1994)
- [3] C.A.Spindt et al., IEEE Trans. Electron Devices, vol. 38, no. 10, p.2355 (1991)
- [4] C.A.Spindt et al., IEDM'95, p.389 (1995)
- [5] Hyoung Soo Uh et al., Proc. of IVMC'97, p.2515 (1997)
- [6] Jeong-In Han et al., Proc. of IVMC'97, p.706 (1997)
- [7] S.J.Kwon et al., Proc. SID'98, Anaheim, USA, p.873 (1998.5.17-22)

- [8] S.E.Huq et al., Proc. of IVMC'97, p.412 (1997)
- [9] E.C.Bodwell et al., Proc. of IVMC'95, p.181 (1995)
- [10] Moo-Sup Lim et al., Proc. of IVMC'98, p.113 (1998)
- [11] C.H.Mastrangelo and R.S.Muller, IEEE J. Solid State Circuits 26, p.1998 (1991)
- [12] A.M.Robinson et al., Rev. Sci. Instrum. 63, p.2026 (1992)
- [13] P.K.Weng and J.S.Shie, Rev. Sci. Instrum. 65, p.492 (1994)
- [14] A.W.Van Herwaarden and P.M.Sarro, Sensors and Actuators 8, p.187 (1985)
- [15] A.W.Van Herwaarden and P.M.Sarro, J. Vacuum Sci. Technol., A 5, p.2454 (1987)
- [16] A.W.Van Herwaarden and P.M.Sarro, J. Phys. E 21, p.1162 (1985)
- [17] A.W.Van Herwaarden and P.M.Sarro, Sensors and Actuators 14, p.259 (1985)
- [18] 만도기계중앙연구소, Yaw Rate 센서 기술 개발에 관한 연구(2차년도 연차보고서) pp. 102-107 (1997)
- [19] Allyson Hartzell et al., Proc. Of IEEE 37th Annual Internation Reliability, p. 202 (1999)
- [20] Bong-Hwan Kim et al., Proc. Of MicroElectroMech. Systems, p.181 (1999)
- [21] Uthara Srinivasan et al., Proc. Of Transducers '97, p.1399 (1997)
- [22] S.L.Miller et al., Microelectronics Reliability, vol. 39, p.1229 (1999)
- [23] Uthara Srinivasan et al., J. of Microelectromechanical Systems, vol. 7, no. 2, p.252 (1998)
- [24] Young-II Lee et al., J. of Microelectromechanical Systems, vol. 6, no. 3, p.226 (1997)
- [25] M.A.Rosa et al., Microelectronics Reliability, vol. 39, p.139 (1999)
- [26] K.Komvopoulos and W.Yan, J. of Tribology, vol. 119, p.391 (July 1997)
- [27] F.Michael Serry et al., J. of Applied Physics, vol. 84, no. 5, p.2501 (1998)
- [28] S.T.Patton et al., Proc. Of IEEE 37th Annual International Reliability, p.179 (1999)
- [29] Abhijeet Kolpekwar et al., Proc. Of IEEE International Test Conf., p.551 (1998)
- [30] Mark J. Mescher et al., Advances in Electronic Packaging, vol. 1, p.435 (1997)
- [31] Jong Hyun Lee et al., Proc. of IEDM, p.30.1.1 (1996)
- [32] Michael R. Houston et al., Proc. Of Transducers'95 Eurosensors IX, p.210 (1995)
- [33] 김성운 외, '99 Conf. Of the Korean Sensors Society, p.260 (1999)
- [34] R.L.Kubena et al., IEEE Electron Devices Letter, vol. 17, no. 6, p.306 (1996)
- [35] Howard K.Oockstad et al., Sensors and Actuators A, vol. 53, p.227 (1996)
- [36] Yongjun Yang et al., Part of the Conference on Electronics and Structures for MEMS, SPIE vol. 3891, p.121 (1999)
- [37] 주병권 외, 전기학회논문지 제 48권 9호, p.656 (1999)
- [38] Hai-Xiao Wang et al., Proc. of IVMC'95, p.378 (1995)

著 者 紹 介



박 홍 우 (朴 興 雨)

1970년 10월 3일생. 1993년 서울시립대학교 전자공학과 졸업, 1995년 서울시립대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사), 1995년~현재 고려대학교 대학원 전자공학과 박사과정 및 KIST 정보재료·소자

연구센터 학생연구원,

주관심분야 : MEMS 터널링센서, FED, Bonding & Packaging

주 병 권 (朱 炳 權)

『센서학회지 제7권 3호』 논문 98-7-3-09, p.211 참조  
현재 KIST 정보재료·소자연구센터 선임연구원.



이 윤희 (李 允 熙)

1963년 2월 5일생. 1988년~현재 KIST 정보재료·소자연구센터 선임연구원, 주관심분야 : TFEL 소자, 탄소나노튜브, FED.



박 정 호 (朴 廷 浩)

1987년 Univ. of Delaware 공학박사, 1987년~1990년 LG 중앙연구소 연구실장, 1990년~현재 고려대학교 전기전자전파 공학부 교수, 주관심분야 : 광전자소자, MMIC

오 명 환 (吳 明 煥)

『센서학회지 제3권 1호』 논문 94-3-1-02, p.7 참조  
현재 KIST 정보재료·소자연구센터 책임연구원 및 부원장.