

논문 2001-10-5-03

자장 세기 측정용 진공 센서의 제작 및 패키징

박흥우*, 박윤권*, 이덕중*, 김철주**, 박정호***, 오명환*, 주병권*

Fabrication and packaging of the vacuum magnetic field sensor

Heung-Woo Park*, Yun-Kwon Park*, Duck-Jung Lee*,
Chul-Ju Kim**, Jung-Ho Park***, Myung-Hwan Oh*, Byeong-Kwon Ju*

요 약

본 연구에서는 수평형 전계 방출 소자를 제작하고 그 특성을 측정하였다. 이를 진공자장 센서에 이용하기 위하여 Lorentz 원리를 응용하여 센서를 설계하고 제작하였다. $\text{POCl}_3(10^{20} \text{ cm}^{-3})$ 도핑된 다결정 실리콘을 전계 방출 소자의 음극 및 양극 재료로 이용하였으며 그 두께는 각각 $2 \mu\text{m}$ 였다. PSG(두께 $2 \mu\text{m}$)를 희생층으로 사용하여 최종 단계에서 불산을 이용하여 제거하고 승화건조법을 이용하여 소자의 기관 점착 현상을 방지하였다. 제작된 소자를 유리기관 #1 위에 silver paste로 고정시키고 Cr 전극 패드와 와이어본딩 한 뒤 진공내에서 양극접합공정을 이용하여 소자를 1.0×10^{-6} Torr에서 진공 실장하였다. 실장 후 게터를 활성화하여 내부진공도를 향상시켰다. 이렇게 패키징된 소자는 두달여 기간 동안 특별한 특성저하 없이 잘 동작되었으며 그 이상의 기간에 대해서는 확인하지 못하였다. 패키징된 자장 센서는 패키징하기 전 진공챔버 내에서 보인 특성치와 별다른 차이 없이 잘 동작되었으며 단지 약간의 전류 감소 현상만이 관찰되었다. 측정된 센서의 감도는 약 $3 \%/T$ 로서 작은 값이었으나 그 가능성을 확인할 수는 있었다.

Abstract

This work reports the tunneling effects of the lateral field emitters. Tunneling effect is applicable to the VMFS(vacuum magnetic field sensors). VMFS uses the fact that the trajectory of the emitted electrons are curved by the magnetic field due to Lorentz force. Polysilicon was used as field emitters and anode materials. Thickness of the emitter and the anode were $2 \mu\text{m}$, respectively. PSG(phospho-silicate-glass) was used as a sacrificial layer and it was etched by HF at a releasing step. Cantilevers were doped with $\text{POCl}_3(10^{20} \text{ cm}^{-3})$. $2 \mu\text{m}$ -thick cantilevers were fabricated onto PSG($2 \mu\text{m}$ -thick). Sublimation drying method was used at releasing step to avoid stiction. Then, device was vacuum sealed. Device was fixed to a sodalime-glass #1 with silver paste and it was wire bonded. Glass #1 has a predefined hole and a sputtered silicon-film at backside. The front-side of the device was sealed with sodalime-glass #2 using the glass frit. After getter insertion via the hole, backside of the glass #1 was bonded electrostatically with the sodalime-glass #3 at 10^{-6} torr. After sealing, getter was activated. Sealing was successful to operate the tunneling device. The packaged VMFS showed very small reduced emission current compared with the chamber test prior to sealing. The emission currents were changed when the magnetic field was induced. The sensitivity of the device was about $3 \%/T$ at about 1 Tesla magnetic field.

1. 서 론

- * 한국과학기술연구원 디스플레이 및 나노소자 연구실(Display & Nano Devices Laboratory, Korea Institute of Science and Technology)
** 서울시립대학교 전자공학과
(School of Electronics Engineering, University of Seoul)
*** 고려대학교 전자공학과(Dept. of Electronics Engineering, Korea University)
<접수일자 : 2001년 4월 7일>

현대인들에게 가장 많이 사용되는 교통수단인 자동차, 지하철, 항공기 등은 센서의 집합체라 해도 과언이 아닐 만큼, 우리들의 생활 속에는 앞으로도 수많은 센서들이 파고들 것이다. 이런 현상을 놓고 유명한 미래학자는 앞으로 센서 공해가 문제가 될 것이라고 말할 정도이다. 외국

의 유명한 조사기관의 자료에 의하면, 지난 1980년대에는 microprocessor로 대변되는 personal computer의 'processing' 시대였고, 1990년대에는 laser로 대변되는 world wide web과 internet의 'access' 시대였으며 앞으로 다가올 10년은 센서를 이용한 'interaction'의 시대가 될 것이라고 보고하고 있다⁽¹⁾. 이 중에서, 자장의 크기를 측정하는 자장 센서(MFS: magnetic field sensor)에는 1879년 E. H. Hall이 Hall 효과⁽²⁾를 발견한 이래 이를 이용한 센서가 주로 사용되어 왔다. Hall 소자 제작에는 주로 GaAs나 InAs와 같은 복합반도체 소자와 Si-CMOS 소자 등이 사용되고 있다⁽³⁾.

그러나, 최근에는 앞의 방법과 다른 방법으로 터널링 현상을 이용하는 각종 센서가 연구되고 있다^(4,5). 터널링 효과를 디스플레이에 적용하려는 연구는 이미 상당부분 보고되고 있으며, 본 연구에서는 터널링 현상을 센서 제작에 활용하기 위한 기반 실험을 수행하였다. 터널링 센서는 그 특성상 감지도가 매우 우수하여 앞으로 많은 응용이 기대된다.

지난 연구에서는 다결정 실리콘 측면형 전계 방출 소자를 이용한 진공도 측정용 센서를 제안하였다⁽⁶⁾. 표면마이크로머시닝법과 수평형 전계 방출 소자의 장점을 이용하여 초소형이고, 센서의 제조가 간단하며, 동작 영역에 따라 공정 변수 및 기하학적 치수를 변경하기가 용이한 다결정 실리콘 전계 방출 소자를 제작하여 터널링 전류의 진공도 의존성을 확인함으로써 전계 방출 소자의 진공 센서 응용 가능성을 제안하였다. 그러나, 지난 연구에서 제작된 소자에서는 설계 오류 및 공정상의 제약으로 인하여 측정상 문제점들이 제기되었다. 금번 연구에서는 한층 향상된 공정 조건과 구조를 바탕으로 기존의 실험에서 제기되었던 문제점들을 보완하여, 수정된 구조의 진공 트라이오드를 제작하였다. 또한, 진공 트라이오드의 응용으로서, 전계 방출 효과를 이용하는 진공 자장 센서(VMFS: vacuum magnetic field sensor)를 제안하였다. 대부분의 자장 센서는 크기가 수십 인치에 이르기까지 크기가 크며 소비 전력도 큰 반면, 터널링 자장 센서는 소형, 저전력, 저가이며 집적화 가능하다는 장점이 있다. 또한, 수평형 전자 방출원을 사용한 자장 센서는 기생 성분이 작아 고속 응답 특성이 필요한 소자에 사용될 수 있다는 장점이 있다.

현재 사용되고 있거나 연구되고 있는 자장 센서에는 약 11여 종류가 있으며 각각의 감지 범위는 표 1에 보인바와 같다. 자장 센서는 감지 범위에 따라 세 가지 종류로 나눌 수 있으며 표 2에 보인바와 같이 지구 자장의 세기인 10^{-1} G를 기준으로 분류한다. 센서의 감지 범위가 지자장 보다 커서 지자장의 영향을 무시할 수 있는 작은 감도대의 응용, 지자장 근처의 감지 범위를 가져 지자장의 영향을 고려해야 하는 중간 정도 감도대의 응용, 감지 범위가 지자장 보다 매우 작은 고감도 센서에서의 응용 등이 있다⁽⁷⁾.

자장 센서의 응용에는 나침반(compass)을 비롯한 자동차 주차 시스템, 잠수함 위치 추적, 비접촉 스위칭/검출/계수, 자화 메모리의 판독, 자동차 점화 시기 조절용 센서, 자동판매기 지폐 인식 센서, 뇌 기능 촬영(SQUID 센서의 경우, Superconducting QUantum Interference Device) 등 무수히 많으며 우리들의 생활과 밀접한 관련이 있다.

2. 동작 원리

기존의 반도체형 자장 센서는 감도가 낮고 온도 의존성이 큰 단점이 있다. 이를 극복하기 위한 방법의 하나로서 전계 방출 소자를 이용한 진공 자장 센서가 1993년에 Y. Sugiyama, J. Itoh, S. Kanemura 등에 의하여 최초로 보고되었다⁽⁸⁻¹²⁾.

터널링 자장 센서는 기판의 상부 양측에 음극 전극과 제 1 양극, 제 2 양극이 각각 형성되고 그 사이에 게이트가 위치한 구조로 되어 있다. 게이트에 전압을 인가하면 음극 팁 끝에 강한 전계가 형성되어 전자가 방출된다. 이때, 외부 자장이 없으면 제 1 양극과 제 2 양극에 도달하는 전자의 개수가 같으므로 제 1 양극과 제 2 양극에 흐르는 전류는 동일하다($I_{a1} = I_{a2}$). 그러나, 외부 자장이 인가되면 음극에서 방출된 전자가 양극으로 이동하는 도중에 이동 경로에 대해 수직 방향으로 자장에 의한 힘을 받게 되므로 두 개의 양극 중 하나로 더 많은 전류가 흐르게 된다. 따라서, 제 1 양극과 제 2 양극에 흐르는 전류의 차이가 자장의 세기에 비례하게 되며, 이 전류의 차이를 이용하여 자장의 세기를 측정할

표 1. 자장 센서의 비교

Table 1. Comparison of the magnetic field sensors (10⁴ Gauss = 1 Tesla)

Magnetic sensor technology	Detectable field (gauss)				
	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁶	10 ⁻²	10 ²	10 ⁶
1. Search-coil magnetometer	-----				
2. Flux-gate magnetometer	-----				
3. Optically pumped magnetometer	-----				
4. Nuclear-precession magnetometer	-----				
5. SQUID magnetometer	-----				
6. Hall-effect sensor	-----				
7. Magnetoresistive magnetometer	-----				
8. Magnetodiode	-----				
9. Magnetotransistor	-----				
10. Fiber-optic magnetometer	-----				
11. Magneto-optical sensor	-----				

표 2. 자장 센서의 응용 범위에 따른 분류

Table 2. Categorization of magnetic field sensor applications

10 ⁻⁵ G		10 ⁰ G	
High sensitivity	Medium sensitivity	Low sensitivity	
Definition	Definition	Definition	
<ul style="list-style-type: none"> Measuring field gradients or differences due to induced(in Earth's field) permanent dipole moments 	<ul style="list-style-type: none"> Measuring perturbations in the magnitudes and/or direction of Earth's field due to induced or permanent dipoles 	<ul style="list-style-type: none"> Measuring fields stronger than Earth's magnetic field 	
Major applications	Major applications	Major applications	
<ul style="list-style-type: none"> Brain function mapping Magnetic anomaly detection 	<ul style="list-style-type: none"> Magnetic compass Munitions fuzing Mineral prospecting 	<ul style="list-style-type: none"> Non-contact switching Current measurement Magnetic memory readout 	
Most common sensors	Most common sensors	Most common sensors	
<ul style="list-style-type: none"> SQUID gradiometer Optically pumped magnetometer 	<ul style="list-style-type: none"> Search-coil magnetometer Flux-gate magnetometer Magnetoresistive magnetometer 	<ul style="list-style-type: none"> Search-coil magnetometer Hall-effect sensor 	

수 있다^[8-12].

터널링 센서는 전계 방출 전류가 지수 함수적인 특성상 감지도가 매우 우수하여 앞으로 많은 응용이 기대된다. Silicon 및 GaAs를 이용하는 반도체 소자의 경우 감지도가 각각 약 15 %/T 와 46 %/T 정도인데 비해 터널링 자장 센서의 감지도는 약 1000 %/T 정도에 이를 것으로 예상되고 있다^[10].

터널링 자장 센서의 감도는 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$sensitivity = \left| \frac{\Delta I(B)}{I} \times \frac{1}{B} \right| \quad (1)$$

$\Delta I(B)$: differential current from two anodes.

B : magnetic field

감도는 음극과 양극간 거리가 멀수록, 동작 전압이 낮을 수록 크다. 센서의 감도는 인가된 자장의 크기에 따라 변하며 선형적인 영역에서만 소자를 동작시켜야 한다. 그러나, 무한정 인가 전압을 낮추고 거리를 멀게 할 수는 없으며 전계 방출 개시 조건인 $E > 1 \text{ V/nm}$ 를 만족시키면서 동작 조건을 조절해야 한다.

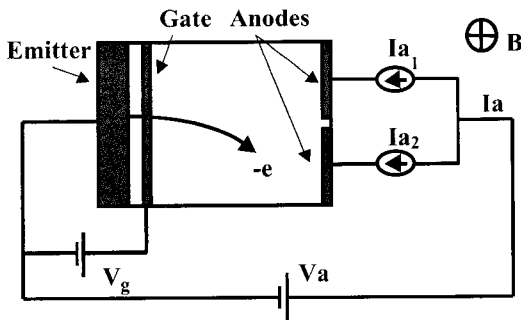


그림 1. 터널링 자장 센서의 동작 개념도

Fig. 1. Schematic diagram of a vacuum magnetic field sensor operation

진공 자장 센서는 그림 1에 보인 바와 같은 Lorentz 원리를 이용한다. 이때, 여러 양극간 전류의 차이로서 인가된 자장의 세기를 검출하는 원리로 동작하며, 인가된 전계에 의해 음극으로부터 방출된 전자는 자장에 수직한 방향으로 힘을 받아 경로가 휘게 된다. 인가된 전계에 의하여 다결정 실리콘 팁으로부터 방출된 전자는 플레밍의 왼손 법칙으로부터 어느 방향으로 힘을

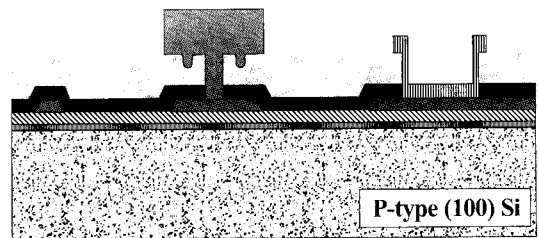
받을 것인지 예측 가능하다.

3. 소자 제작 공정 및 희생층 제거

3.1 소자 제작 공정

소자는 그림 2 에 보인 단면도와 같은 구조로 제작되었다. (100) p-type 실리콘 기판을 이용하였으며, 공정 순서를 간략히 설명하면 아래와 같다.

- Buffer Oxide ($0.07 \mu\text{m} \pm 0.5\%$)
- Nitride ($0.23 \mu\text{m} \pm 5\%$)
- Electrode Poly-Si ($0.5 \mu\text{m} \pm 5\%$, $12.6 \text{ m}\Omega/\square$) deposition & patterning
- Insulation layer deposition (nitride $0.1 \mu\text{m} \pm 5\%$)
- Sacrificial Layer (7 wt% PSG $2.09 \mu\text{m} \pm 6\%$) deposition
- Dimple patterning ($1 \mu\text{m}$) & anchor patterning
- Structure Poly-Si ($2.11 \mu\text{m} \pm 2\%$, $12.9 \text{ m}\Omega/\square$) deposition & patterning
- Pad patterning & Al sputtering ($0.5 \mu\text{m} \pm 5\%$)



- | | |
|----------------|------------------|
| ■ buffer oxide | □ 7wt%PSG |
| ■ nitride | ■ polysilicon |
| ■ Al | ■ buffer nitride |

그림 2. 제작된 소자의 단면도

Fig. 2. Cross-sectional view of the device

소자 제작에는 6장의 마스크가 사용되었으며, 최소 선폭과 소자의 크기는 각각 $3 \mu\text{m}$ 와 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 이다. 구조체로 사용되는 다결정 실리콘의 Young's modulus는 $151 \text{ GPa} (\pm 10\%)$ 이며, 구조체를 멤브레인 형태로 가공시

멤브레인 아래의 희생층 제거를 돕기 위하여 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ 면적마다 직경 $5 \mu\text{m}$ 크기의 etch hole을 설계하였다. 지난 연구^[6]에 비하여 몇 가지 공정이 개선되었다. 구조체의 in-use 접착(stiction) 방지를 위하여 dimple이 이용되었으며, 소자의 전기적 특성 측정이 용이하도록 알루미늄 금속막과 패드 형성용 패턴이 추가되었다.

3.2 희생층 제거

막 형성 및 패턴닝이 완료된 후 최종적으로 PSG 희생층을 제거하여 캔티레버 형태의 음극과 양극을 형성하였다. 게이트 전극의 위치 및 모양은 경우에 따라 조금씩 다르게 설계하였으나, 대부분 음극 끝의 바로 밑 기판에 위치하고 있다. 희생층 제거는 HF(49%)에 2~5분 처리하여 PSG 희생막을 제거한 후, 캔티레버와 기판의 접착 방지를 위해 승화건조(sublimation drying) 또는 SAM(Self-Assembled Monolayer) 코팅법을 적용하였다. 본 연구에서 사용한 승화건조법 및 SAM 코팅 처리순서는 다음과 같다. SAM 코팅은 여러 물질 중에서 DDMS(Dichlorodimethylsilane with two short alkyl branches, $(\text{CH}_3)_2\text{SiCl}_2$)를 이용하여 수행하였으며, DDMS 코팅액은 Iso-Octane(30 ml)과 DDMS($4 \mu\text{l}$)를 혼합하여 사용하였다. Iso-Octane과 IPA 용액은 휘발성이 있으며 물과 친하므로 가능한 한 건조한 환경에서 작업하며 DDMS 용액은 부식성이 강하므로 syringe는 사용 후 반드시 세척을 해야 한다.

승화건조법 처리순서

- HF dipping (상온, 10분)
- D.I. Water dipping (상온, 10분)
- IPA dipping (80°C , 10분)
- P-DiChloroBenzene($\text{C}_6\text{H}_4\text{Cl}_2$) dipping (80°C , 10분)
- Cooling (상온, 10분)
- Vaporization (10^{-3} Torr, 20분)
SAM(DDMS) 코팅법 처리순서
- D.I. water rinse (상온, 10분)
- Surface oxidization (H_2O_2 , 상온, 10분)
- Isopropanol rinse (상온, 10분)
- Iso-Octane rinse (상온, 10분)
- DDMS coating (상온, 10분)
- Excess precursor removal

(Iso-Octane, 상온, 2분)

■ Dry (hot plate, 1분)

4. 소자의 진공 패키징

제작된 소자의 전기적 특성 평가를 위하여, 새로이 개발된 유리-유리 정전 열접합을 이용한 tubeless packaging 방법을 이용하였다^[13]. 본 방법은 원래 평판 디스플레이 소자를 진공 패키징 하기 위해 연구되어 오던 기술로서, 진공 실장시 기존에 사용되던 배기용 세관(exhaust tube)을 제거함으로써 구조물의 conductance가 약 153배 정도 증가되어 진공 실장시 개선된 진공 효율을 얻을 수 있는 장점이 있다. 배기용 세관을 제거하면 그만큼의 진공 효율을 증가시킬 수 있어 패키징 시간을 단축시킬 수 있으며 300°C 의 저온공정을 통하여 기존 방법의 500°C 공정에서 수반되는 out-gassing 문제 등을 현저히 줄일 수 있다.

패키징은 다음과 같은 단계로 이루어졌으며 패키징 개념도와 패키징된 시편의 사진을 각각 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 소자의 전면부를 frit glass로 밀봉하고 뒷면을 진공 중에서 양극 접합 방법을 이용하여 진공 실장하였다.

제작된 소자의 진공 중 측정을 위하여 진공 배기용 직경 6 mm의 hole을 뚫었다. Glass #1 기판의 전면에 Cr 금속막 증착 후 패드와 전극 부분을 패턴닝하였다. 제작된 소자를 silver paste로 glass #1 기판의 중앙에 mounting한 뒤 Cr 전극과 소자의 패드 부분을 와이어 본딩으로 연결하였다(그림 4(a)와 4(b) 참조). 다른 한 장의 유리기판 glass #2 에는 frit glass를 dispense하고 이를 glass #1 기판과 접합하였다(그림 4(c) 참조). Frit glass의 열처리 는 470°C 의 질소 가스 분위기에서 하였으며 소자와 와이어를 보호하기 위해 두 유리 중간에 1.1 mm 두께의 유리 스페이서를 두었다. 이는 두 유리 기판의 접합시 가해지는 압력에 의해 소자와 전기 배선인 와이어가 손상되지 않도록 하기 위함이다. 이 단계까지는 아직 소자의 밀봉 실장이 이루어진 것이 아니라 소자의 전면부만 밀봉되어 있는 상태이다. 소자를 완전히 밀봉하기 위해서는 glass #1의 뒤쪽으로 나 있는 직경 6 mm hole을 막아야 하며 전계 방출 소자를

구동 가능하게 하기 위해서는 진공 실장을 하여야 한다. 이를 위하여 glass #1의 뒷면 hole 주변에 미리 증착 해 놓은 ITO/a-silicon 막과 또 다른 유리 기판 glass #3를 진공 중에서 양극 접합 (300 °C, 250 Vdc, 1×10^{-6} Torr) 하여 진공 실장하였다. 패키징된 소자의 전면과 뒷면 사진을 각각 그림 4(c)와 4(d)에 보였다.

전계 방출 소자는 1×10^{-7} Torr 이상의 고진공 분위기에서만 작동하는 소자로서 낮은 진공도에서 작동시킬 때에는 소자가 파괴되며^[14] 이를 방지하기 위하여 소자를 완전히 밀봉하기 전에 hole을 통하여 게터(non-volatile getter, ST122 of SAES co.)를 밀어 넣어 패키지 내에 위치시키고 밀봉 후 게터를 활성화시킴으로써 내부 진공도를 향상시켰다. 진공 실장의 마지막 단계인 양극 접합 공정은 진공 접합 장치 내에서 이루어졌다. Glass #1 - glass #2 접합쌍과 glass #3 가 서로 떨어져 있는 상태에서 원하는 진공도와 온도에서 glass #3 시편을 움직여 glass #1 - glass #2 접합쌍 뒷면의 a-silicon 과 접촉시킨 후 전압을 인가하여 접합하였다. 본 실험에서 사용한 진공 패키징 처리 순서를 정리 하면 다음과 같다.

- Exhaust hole drilling (about 6mm dia.) in glass #1
- Cr sputtering and patterning on front-side of glass #1
- Device mounting with silver paste onto the Cr patterned face of glass #1
- Wire bonding (between device pads and Cr electrode lines)
- Seal-line drawing with glass-frit on the glass #1 front-side and pregrazing
- Capping with glass #2 on the glass-frit of glass #1 and firing (1.1mm-thick glass-spacer was used to maintain the glass-frit height)
- ITO(indium-tin oxide) and Si interlayer sputtering on the glass #1 back-side and patterning
- Insertion a piece of getter sheet via the hole
- Mating Si interlayer and glass #3 in vacuum environment
- Electrostatic bonding between Si interlayer and glass #3 in vacuum

■ Getter activation(350°C for 5hours) with heat after bonding

이와 같은 방법으로 소자를 패키징 할 경우, 전체 패키지의 크기는 7 cm × 7 cm 정도로서 소자 크기에 비해 10 배 정도 커지는 단점이 있으나, 가장 간단하면서도 확실한 패키징 방법이라는 장점이 있다.

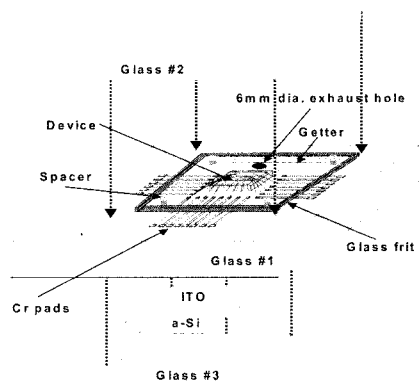


그림 3. Tubeless 패키징 방법의 진공 실장 개념도
Fig. 3. Exploded-view of the tubeless packaging method

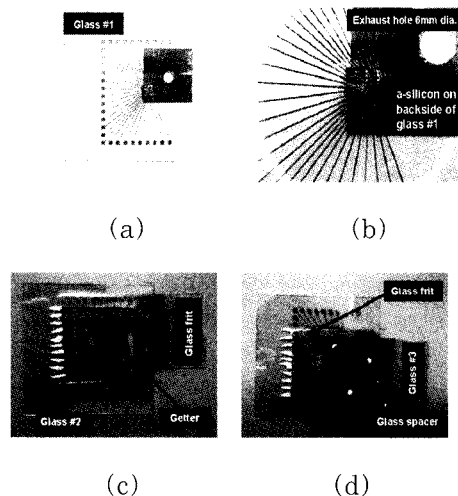


그림 4. Tubeless 패키징 방법으로 진공 실장한 소자의 사진들
Fig. 4. Photographs of the tubeless packaged sample (a) photograph of glass #1 before glass-frit printing, (b) enlarged photograph of (a), (c) front-side of the package, (d) back-side of the package

5. 소자의 전기적인 특성 측정

5.1 측정 시스템

제작된 자장 센서는 전자석(wlaker scientific co.), gauss-meter(Lakeshore 450), Keithley 220 programmable current source, Keithley 228A voltage/current source, Keithley 182 sensitive digital voltmeter 와 측정기기 제어 및 데이터 처리를 위한 Labview 응용프로그램이 탑재된 컴퓨터로 구성된 측정 시스템을 이용하여 측정하였다. 전자석은 수 gauss 부터 1~2 Tesla 까지의 자장을 균일하게 인가할 수 있는 장치이며, 전자석에 전압을 인가하는 Keithley 220 programmable current source, 전자석의 자기장 세기를 측정하는 gauss-meter, 전류와 전압을 인가하고 측정하는 Keithley source and measure unit 228A 또는 236/237 을 이용하였다.

5.2 다이오드

그림 5에 보인 바와 같이 음극과 양극 전극이 20 μm 떨어진 트라이오드 구조에 대해 전기적 특성 평가를 하였다. 자장 센서에 응용된 구조가 다이오드 형태이기 때문에 게이트에는 전압을 인가하지 않은 상태에서 특성을 평가하여 이를 그림 6에 보였다. 소자를 진공 실장하기 전에 UHV(ultra high vacuum) 챔버내에서 테스트를 수행하였으며 측정시 진공도는 1.0×10^{-6} Torr 정도였다. 캔티레버 음극과 양극의 폭과 길이는 20 μm 와 120 μm 로서 캔티레버 자체의 처짐 현상은 발견되지 않았다. 와이어 본딩을 이용하여 전압을 패드에 인가함으로써 지난 실험에서와 같은 절연체 파괴 현상은 발견되지 않았다.

터널링 소자의 측정시 검출전류가 터널링 현상에 의한 전류인지 여부를 알아보기 위하여 펄스 신호를 인가하여 구동하거나 역방향 전압을 인가하여 보았는데, 본 연구에서는 역방향 전압을 인가하여 테스트한 결과 아무런 전류가 흐르지 않음을 확인하였다. 따라서 측정된 전류는 절연체 누설 전류 등이 아닌 터널링 현상에 의한 전류라고 말할 수 있다. 또 다른 방법으로서 그림 7에 보인 바와 같은 Fowler-Nordheim 그래프를 통하여 측정된 데이터가 터널링 현상에 의한 것인지를 알아보는 방법이 있으며 이를 통하여도

측정된 데이터가 매우 양호한 전계 방출 특성을 확인할 수 있었다.

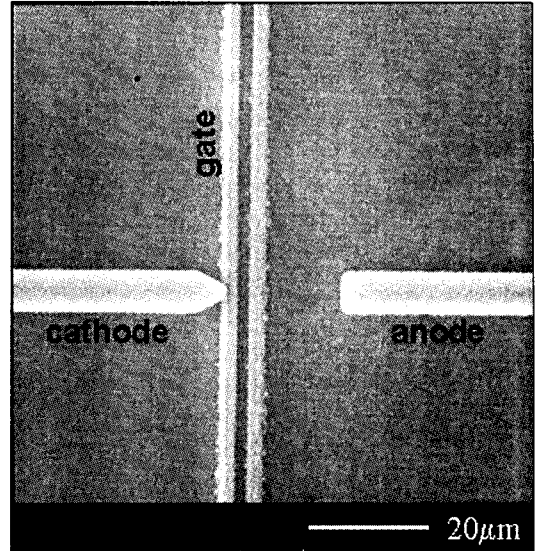


그림 5. 수평형 전계 방출 소자의 SEM 사진 (음극과 양극간 거리 20 μm , top view)

Fig. 5. SEM micrograph of the lateral-triode with bottom gate (20 μm gap between cathode and anode)

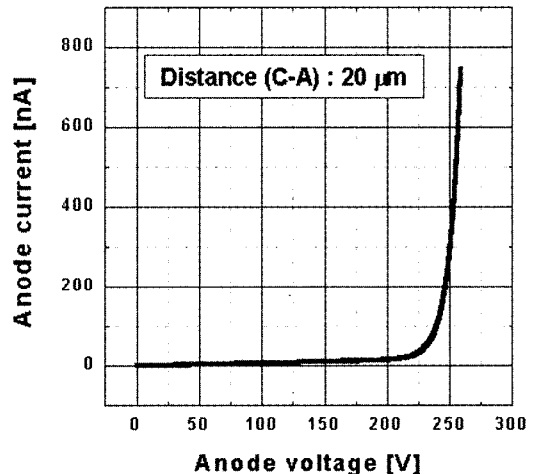


그림 6. 소자의 전류-전압 그래프 (측정시 진공도 : 10^{-6} Torr)

Fig. 6. I-V characteristics of the device (at 10^{-6} Torr)

또한, 그림 5에 보인 것과 같은 구조의 소자에

대해 게이트에 전압을 인가하여 트라이오드 특성을 측정하였다. 게이트에 전압을 인가함으로써 Hai-Xiao Wang⁽¹¹⁾의 논문에서와 같은 트라이오드 소자 구동 현상을 확인할 수는 없었으며 게이트에 전압을 인가함으로써 터널링 현상에 큰 도움이 된다고 할만한 결과를 얻지도 못하였다. 게이트 전극을 사용하는 경우, 오히려 양극 전류의 증가분만 감소하는 현상을 관찰할 수 있었다. 그러나, 전계 방출 소자를 센서에 이용하는 경우, 다이오드형 전계 방출 소자를 이용하는 것으로도 충분하며 게이트 역할 대신 양극 역할을 할 수는 있음을 확인하였다. 즉 음극 근처에 게이트를 위치시킴으로써 음극으로부터 더 낮은 전압에서 턴 온 시키고 양극에서 보다 많은 전류를 집속할 수는 있으나 이 전류분이 양극 전류 증분에 기여한다고 할 만한 결과는 없었다⁽⁶⁾.

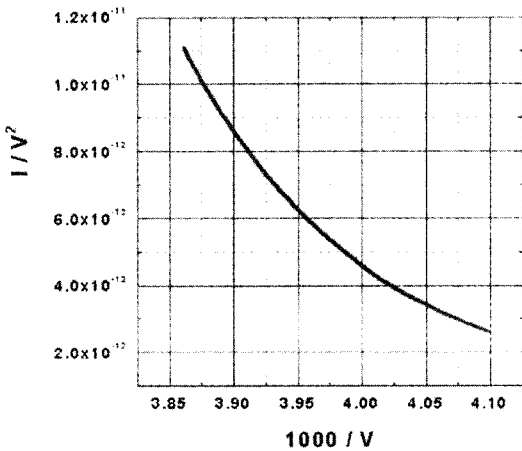


그림 7. 측정된 데이터의 Fowler-Nordheim 그래프
Fig. 7. Fowler-Nordheim curve of device

5.3 전계 방출 소자의 센서 응용

전계 방출 소자를 진공 자장 센서(VMFS)에 응용하기 위하여 그림 8에 보인바와 같이 설계, 제작하였다. 제작된 진공 자장 센서는 한 개의 캔틸레버 형태의 음극과 5개의 방사형 양극 구조로 되어 있다. 음극 팁 끝으로부터 양극까지의 거리는 20 μm이며, 5개의 양극 전극은 음극 팁 끝 부분을 중심으로 22.5° 씩 분포되어 있다. T11 전극과 R9 전극에 대해 센서 특성을 간단히 측정하였다. 그림 9에는 T11 전극과 R9 전극의 전류-전압 특성곡선을 보였다. T11 전극과 R9 전극의 전계 방출 특성은 거의 비슷하였으며

T11 전극의 전류가 약간 더 많은 것을 확인할 수 있었다. 그림 9에 보인 그래프는 음극과 T11 전극 또는 음극과 R9 전극의 특성을 별도로 측정한 결과이며 T11 전극과 R9 전극에 동시에 전압을 인가하여 측정한 결과는 아니다.

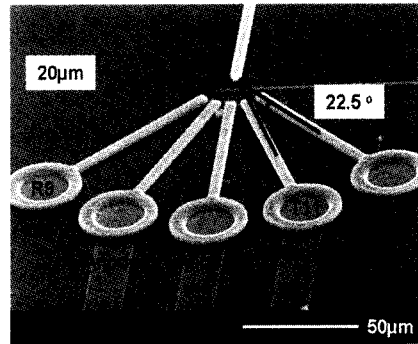


그림 8. 진공 자장 센서의 SEM 사진 (tilted)
Fig. 8. SEM micrograph of a VMFS device as a sensor application of a tunneling device (the distance between cathode and anode is 20 μm)

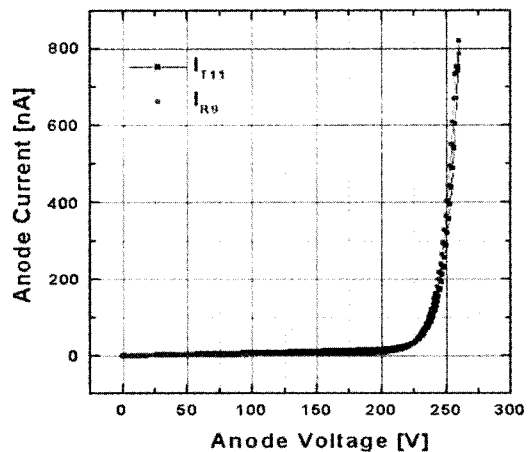


그림 9. 진공 자장 센서의 두 양극 T11 과 R9 전극에서의 전류-전압 특성그래프
Fig. 9. Comparison of the I-V curves of the T11 and the R9 anode electrodes (Data was obtained from a diode of 20 μm gap between cathode and anode electrodes under 1.0×10⁻⁶ Torr)

그림 10에는 T11 전극과 R9 전극에 동시에 230 V 를 인가하여 시간에 따른 방출전류 특성

을 알아본 결과를 나타내었다. T11 전극과 R9 전극에 동시에 전압을 같은 정도로 인가하게 되면 전계가 더욱 강하게 인가되어 T11 전극의 전류 값이 더 커지게 된다. 이 상태에서 소자 주변에 자장을 인가하여 전류 변화 특성을 테스트하였다. 현재로서는, 자장변화 정도 및 자장 세기를 정해놓고 한 실험은 아니었으며 간단한 테스트에 불과하다.

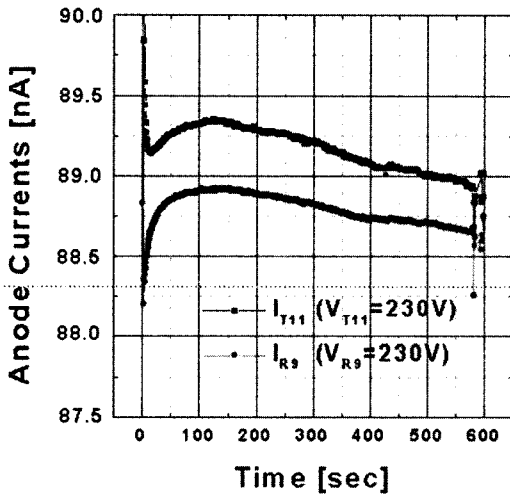


그림 10. 진공 자장 센서의 두 양극 T11 과 R9 전극에서의 시간에 따른 방출 전류 특성 그래프

Fig. 10. Anode current fluctuations of the T11 and R9 anodes (T11 and R9 electrodes were biased at 230 V at the same time)

그림 11에 상당히 큰 값인 1 T(Tesla) 정도의 자장을 인가하였을 경우의 전류 변화 그래프를 보였다. T11 전극에는 전자 방출이 일어날 수 있는 정도의 전압인 250 V 를 인가하고 R9 전극에는 아주 약한 전압인 30 V 를 인가한 경우의 전류 변화를 관찰하여 나타내었다. 전류 변화 정도는 방출 전류의 약 3%/T 정도로 상대적으로 둔감했다. 이 경우, 그림에서 전류 값이 갑자기 상승해서 잠시 동안 유지되는 구간이 자장을 인가하고 있을 때이며 나머지 구간은 자장이 인가되지 않았을 경우이다.

이 그래프들을 통해서 단정적으로 어떤 결과를 얻었다고 하기는 어려우며, 단지 자장을 인가하였을 경우, 전류 변화 경향을 예측하는 자료로 사용될 수 있다. 논문에 보고된 바에 의하면, 터

널링 현상을 이용하는 자장 센서의 측정범위는 약 10^{-2} T ~ 2×10^{-1} T 정도의 범위이며 지구 자장인 10^{-5} T 에 비하면 아주 작은 값이다^[3,12].

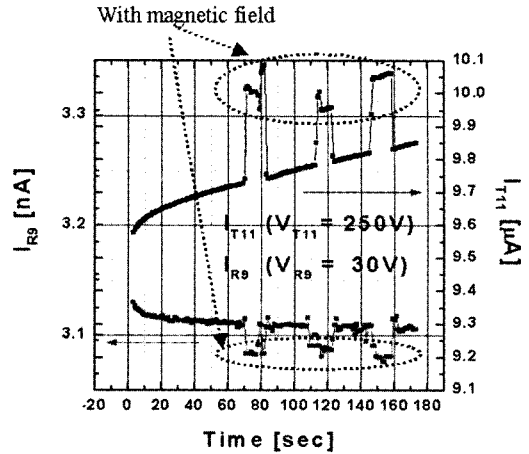


그림 11. 진공 자장 센서의 두 양극 T11 과 R9 전극에서의 자장 인가에 대한 전류 변화 그래프

Fig. 11. Anode current variations with/without a high magnetic field (T11 anode was biased at 250 V, while the R9 anode was biased at 30 V)

6. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 표면마이크로머시닝을 이용하여 다결정 실리콘 캔티레버 및 멤브레인을 제작하고 이를 터널링 센서에 적용하는 기반 실험을 수행하였다. 캔티레버 전극을 이용한 기본적인 수평형 트라이오드 구조를 제작하고 전기적 특성을 측정하였다. 이렇게 제작된 수평형 전계 방출 구조를 진공 자장 센서에 적용하려는 목적으로 여러 구조를 설계하고 제작하였다. 아직 제작된 센서의 특성을 완전히 측정하지는 못하였으나, 진공 자장 센서의 경우 감도는 약 3%/T 정도로서 아주 작은 값이었으나 그 가능성을 확인할 수는 있었다.

마지막으로, 마이크로 터널링 센서소자의 패키징에 유리-유리 정전 열 접합을 이용한 tubeless packaging 방법을 적용하여, 소자가 진공 챔버 밖에서도 동작이 가능하도록 하였다. 진공 패키징이 가능함으로써 기타 다른 터널링 센서의 특

성 측정이 가능해질 수 있었다.

감사의 글

본 논문의 다결정실리콘 공정은 마이크로시스 템 기술센터의 제3차 MEMS MPC를 이용하여 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Paul Saffo., *Annual Report of the Institute For The Future*, <http://www.iftf.org>, p.115, 1997
- [2] E.H.Hall, "On a new action of the magnet on electric current," *Am. J. Math*, vol.2, p.287, 1879
- [3] W. Gopel, J. Hesse and J.N.Zemel, *Sensors - A Comprehensive survey : vol. 5 Magnetic Sensors*, VCH Press
- [4] Chingwen Yeh and Khalil Najafi, "A low voltage bulk silicon tunneling -based microaccelerometer," *IEEE IEDM'95-593*, p.23.1.1, 1995
- [5] T. W. Kenny, S. B. Waltman, J. K. Reynolds and W. J. Kaiser, "Micromachined silicon tunnel sensors for motion detection," *Appl. Phys. Lett.*, vol.58, no.1, p.100, 1991
- [6] 박홍우, 주병권, 이윤희, 박정호, 오명환, "표면 미세 가공된 측면형 전계 방출 소자를 이용한 초소형 진공 센서의 제작," *한국센서학회지*, vol.9, no.3, p.182, 2000
- [7] James E. Lenz, "A review of magnetic sensors," *Proceedings of the IEE*, vol.78, no.6, p.973, 1990
- [8] 이종덕, *전계 방출 이론 및 응용*, 청범출판사, 1998
- [9] Y. Sugiyama, J. Itoh and S. Kanemura, "Vacuum magnetic sensor with comb-shaped field emitter arrays," *Tech. Digest of Transducers'93*, p.884, 1993
- [10] Dan Nicolaescu and Valerin Filip, "Modeling of a magnetic sensor based on vacuum field emission," *Applied Surface Science*, 94/95, p.87, 1996
- [11] Hai-Xiao Wang, Chang-Chun Zhu, Jun-Hua Lin and Xin-Ping Lee, "Design of vacuum magnetic sensor with multiple anodes," *Proc. of IVMC'95*, p.378, 1995
- [12] Y.Sugiyama, "Recent progress on magnetic sensor with microstructures and applications," *Journal of Vacuum Science and Technology B.*, vol.13, no.3, p.107, 1995
- [13] D. J. Lee, B. K. Ju, M. H. Oh, N. Y. Lee, S. J. Jung, K. S. Kim, "Characterization of tubeless packaged FED by glass-to-glass anodic bonding method," *SID International Symposium Digest of Technical Papers*, p.580, 1999
- [14] C. A. Spindt., I. Brodie, L. Humphrey and E. R. Westerberg, "Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones," *J. of Applied Physics*, vol.47, no.12, p.5248, 1976

著 者 紹 介



박 홍 우 (朴興雨)
1970년 10월 3일생
1993년 서울시립대학교
공과대학 전자공학과 졸업,
1995년 서울시립대학교
공과대학 전자공학과 졸업(공
학석사)

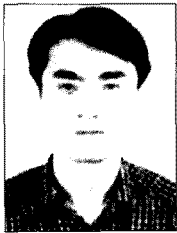
2001년 고려대학교 공과대학 전자공학과 졸업(공학
박사)

현재 고려대학교 반도체기술연구소 연구원,
주관심분야 : (RF)MEMS, 터널링센서,
Bonding, Packaging



이 덕 중 (李德重)
1970년 11월 5일생
1997년 상지대학교 이과대학
물리학과 졸업(이학사)
1999년 경희대학교 이과대학
물리학과 졸업(이학석사)
현재 동 대학원 박사과정

현재 KIST 정보재료·소자연구센터 학생연구원
주관심분야 : Bonding, Packaging,
FPD, MEMS



박 윤 권 (朴允權)
1969년 11월 14일생
1996년 서울시립대학교
공과대학 전자공학과 졸업(공
학사)
1999년 서울시립대학교
공과대학 전자공학과 졸업(공
학석사)

현재 동대학원 박사과정
현재 KIST 정보재료·소자연구센터 학생연구원
주관심분야 : (RF)MEMS, 터널링센서,
Bonding, Packaging



김 철 주 (金鐵柱)
1947년 2월 3일생
1973년 한양대학교 공과대학
전기공학과 졸업(공학사)
1981년 일본 Tokai 대학교
졸업(공학석사)
1984년 일본 Tokai 대학교

졸업(공학박사)
현재 서울시립대학교 전자공학과 교수
주관심분야 : TFT, SOI, MEMS,
Ferroelectrics



박 정 호 (朴廷浩)
1955년 12월 26일생
1981년 고려대학교 공과대
학 전자공학과 졸업(공학사)
1983년 Univ. of Delaware
전자공학과 졸업(공학석사)
1987년 Univ. of Delaware

전자공학과 졸업(공학박사)
현재 고려대학교 공과대학 전자공학과 교수,
주관심분야 : LD/LED, Optical Switch,
MMIC, Quantum Dot,
SAG, HEMT 등



주 명 권 (朱炳權)
1962년 12월 2일생
1986년 서울시립대학교 공과
대학 전자공학과 졸업(공학사)
1988년 서울시립대학교 공과
대학 전자공학과 졸업(공학석
사),

1995년 고려대학교 공과대학 전자공학과 졸업
(공학박사)
현재 KIST 정보재료·소자연구센터 선임연구원
주관심분야 : FED, OELD, CNT, Bonding,
Packaging, MEMS



오 명 환 (吳明煥)

1943년 6월 10일생

1965년 서울대학교 공과대학
전기공학과 졸업(공학사)

1972년 서울대학교 공과대학
전기공학과 졸업(공학석사)

1979년 프랑스 Paul Sabatier

대학교 졸업(공학박사)

현재 KIST 마이크로시스템 연구센터 연구위원

현재 지능형 마이크로시스템 개발사업단 운영이
사회장

주관심분야 : EL Display, FED, MEMS