

수평 구조의 진공 자기 센서의 제작 및 특성

남명우(南明祐), 홍미란(洪美蘭)*, 남태철(南泰喆)

Fabrication and Characterization of Lateral Vacuum Magnetic Sensor

Myungwoo Nam, Meeran Hong, Taechul Nam

요 약

N 형의 실리콘 기판위에 수평형의 전계 방출 배열 구조를 갖는 진공 자기 센서를 제작하고 그의 자기적 특성을 측정하였다. 소자는 수평으로 구성된 팁 사이의 간격이 10 μm 인 100 개의 전계 방출 팁, 게이트 그리고 분리된 양극 구조로 이루어져 있다. 에미터 전극으로부터의 전자 방출 특성은 Fowler-Nordheim 터널링 이론을 따른다. 제작된 센서는 좋은 직선 특성과 825 %/T 의 높은 감도를 보여주었다.

Abstract

We have fabricated the vacuum magnetic sensor with a lateral field emitter arrays constructed on n-Si substrate, and investigated its magnetic characteristics. The device consists of 100 field-emitter tips with a 10 μm pitch, gate, and split-anodes which are laterally structured. The electron-emission characteristics from the emitter followed the Fowler-Nordheim tunnelling theory. The sensor has good linear characteristics and high sensitivity of 825 %/T.

1. 서 론

반도체 자기 센서에는 Hall 소자를 비롯하여 자기 트랜지스터, 자기 다이오드 등 여러 종류가 있다. 이들은 자기 감지부와 신호 처리부를 동일 칩위에 집적화시킬 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나 이 소자들의 감지 영역이 반도체 내부 또는 계면이기 때문에 캐리어들의 산란으로 인하여 감도가 많이 떨어질 뿐더러 온도 특성이 불안정하다는 단점들을 갖고 있다. 이러한 관점에서 반도체 자기 센서의 결점을 보완하기 위하여 진공 자기 센서가 연구되고 있다^[1-6].

진공 자기 센서는 반도체 가공 기술과 진공 기술이 접목되어 만들어진 새로운 소자이다. 진공 자기 센서는 3극 진공관의 구조를 갖고 있으며, 주요 부분의 크기가 μm 정도 또는 그 이하로서 반도체 미세가공기술을 이용하여 제작된다. 진공 자기 센서는 전자들이 음극으로부터 강한 전계에 의하여 tunnelling 현상으로 방출되는 냉음극 방출효과를 이용하기 때문에 열적으로 안정할 뿐 아니라 방사선 등에도 잘 견디는 특성을 갖고 있다.

진공 자기 센서는 1993년 Sugiyama^[4] 등에 의하여 발표된 바 있다. 그들은 석영 기판위에 금속 전극을 증착하여 수평형의 전계방출 자기 센서를 제작하였다. 석영 기판의 사용은 전극사이의 단락효과가 없기 때문에 매우 좋은 감도를 얻을 수 있지만 팁가공의 어려운 점 등의 문제점을 안고 있다.

따라서 본 연구에서는 감도는 떨어지더라도 제작이 간편하도록 실리콘 기판위에 진공자기센서를 제조하였

영남대학교 전자공학과
(Department of Electronics Engineering Yeungnam University)

* 현대전자산업(주)

<접수일자 : 1996년 2월 5일>

※ 이 논문은 '95년도 센서기술연구소 연구비 지원에 의한 것임.

다. 센서의 구조는 수평형의 3 극 진공관 구조로 하였으며 양극을 2 개로 조개어 자기적 특성을 측정하였다.

II. 소자의 제작

본 연구에서 제작한 자기 센서는 냉음극 전계방출방식으로 수평형의 3 극진공관 구조를 갖는다. 그림 1 은 자기 센서의 구조를 나타낸 것이다. 전자 방출극 에미터는 방출효율을 높이기 위해서 금속을 증착시켜 팁배열형태로 하였다. 배열된 팁의 밀도는 100 tips/mm, 두께는 0.5 μm , 팁과 게이트 사이의 간격은 0.5 μm 이다. 이미터와 양극 사이는 30 μm 간격으로 설계하였으며 공간 분해능은 $1000 \times 750 \times 0.5 \mu\text{m}^3$ 로 하였다. 소자의 전체 공정과정의 순서도를 그림 2에 나타내었다.

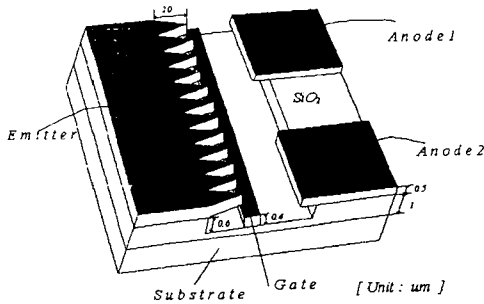


그림 1. 수평형 진공 자기 센서의 대략적인 구조.
Fig. 1. Schematic diagram of lateral vacuum magnetic sensor.

기판으로 비저항 값이 1.5-2.1 $\Omega \cdot \text{cm}$ 인 n-형 (100) 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 금속과 기판과의 절연을 위해 1100 $^{\circ}\text{C}$ 의 전기로에서 100분동안 습식 산화하여 1 μm 의 SiO_2 층을 형성하였다. 산화층 위에 Mo를 스퍼터링하여 두께 0.5 μm 로 증착시키고, 같은 방법으로 Al 을 0.5 μm 증착시켰다. 그리고 식각공정에 의해 에미터의 팁과 양극의 형상을 만들었다. 이때 Al/Mo 이중층은 $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{CH}_3\text{COOH} : \text{HNO}_3 = 16 : 1 : 1$ 을 사용하여 22분간 습식 식각하였다. 그리고 더 많은 방출 전자를 얻기 위하여 에미터를 캔틸레버식으로 만들고자 under-cut 식각법으로 Mo 아래의 산화층을 식각하였다. 산화층의 식각은 plasma 식각 장치를 이용하여 SF_6 플라즈마로 150 W, 200 mTorr 조건에서 0.2 $\mu\text{m}/\text{min}$ 의 식각율로 3분간 건식 식각하였다. 이 결과,

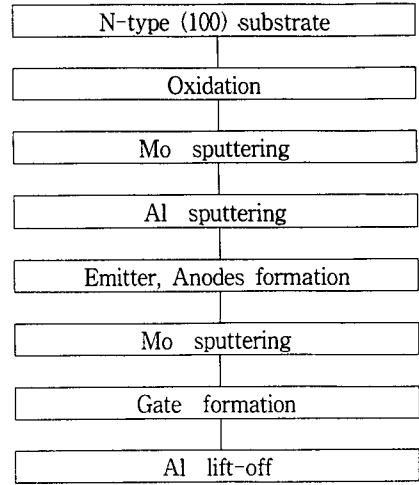


그림 2. 전계방출 자기 소자의 공정 흐름도.
Fig. 2. Flow chart of fabrication process for the field-emission magnetic device.

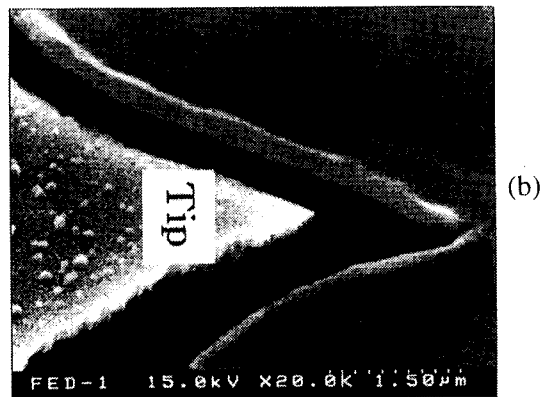
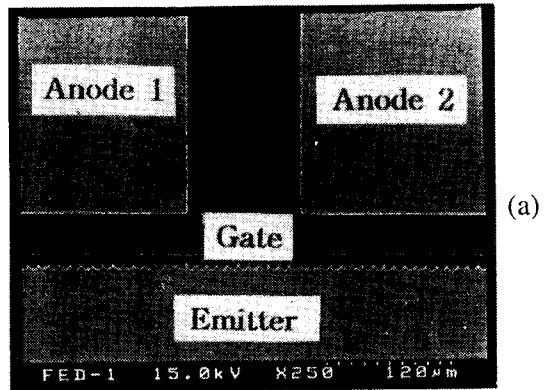


그림 3. 제작된 소자의 SEM 사진.
(a) 평면도, (b) 방출 전극 팁배열의 팁 모양.
Fig. 3. SEM photographs of the fabricated device;
(a) top-view, (b) one tip of the emitter tip array.

산화층이 $0.6 \mu\text{m}$ 식각되어 에미터는 팁 어레이 형태로 되었다. 그리고 에미터 아래의 산화층 위에 게이트 전극을 위한 Mo를 스퍼터링 증착방법으로 $0.4 \mu\text{m}$ 증착하였다. 다음 식각공정으로 게이트 전극을 형성하기 위하여 용액($\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{CH}_3\text{COOH} : \text{HNO}_3 = 16 : 1 : 1$)에서 1분간 Mo를 식각하여 게이트 전극을 형성시킨 후 solvent로 포토레지스트를 제거하였다. 마지막 과정으로 웨이퍼를 KOH 용액에 200초 동안 담구어 Al을 lift-off 시킴으로써 소자를 제작하였다. 제작된 소자의 SEM 사진을 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)는 소자 구조의 평면도이며, 그림 3(b)는 에미터 방출극의 1개의 팁을 확대하여 나타낸 사진이다.

III. 특성측정 및 분석

진공 자기 소자의 전계방출 특성은 진공도 10^{-5} Pa 이하로 한 진공용기 안에서 측정하였다. 그림 4는 진공소자의 전계방출 특성을 측정하기 위한 실험장치이다.

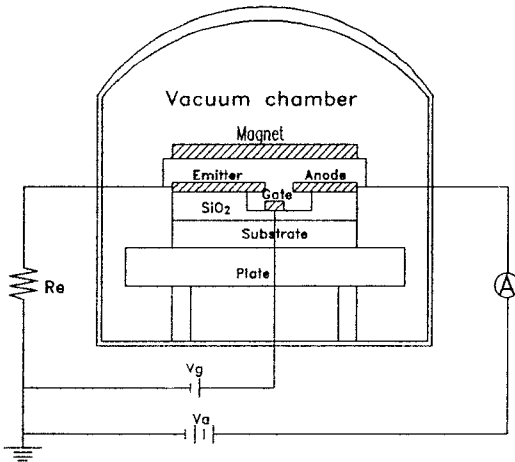


그림 4. 진공 용기안에 설치된 자기 센서의 실험 회로도.

Fig. 4. Experimental circuit of the vacuum magnetic sensor mounted in the vacuum bell-jar.

1) 양극 전류 - 게이트 전압 특성

진공 소자에 있어서 방출 전극으로부터 tunnelling에 의해 전자를 방출시키는 전계는 양극 전압 V_a 와 게이트 전압 V_g 에 의하여 형성된다. 진공 소자의 구조상 방출 전계는 주로 게이트 전압에 크게 의존함을 알 수

있다.

그림 5는 게이트 전압에 따른 양극 전류 I_a 의 변화를 측정된 것이다. 이 때 양극 전압은 200 V로 유지시켜 놓고, 게이트 전압에 따른 양극 전류의 변화를 측정하였다. 그림 5에서 게이트 전압이 약 60 V일 때 에미터로부터 전자 방출이 시작됨을 알 수 있으며, 84 V에서 방출극으로부터 tunnelling에 의한 전자 방출이 급격히 증가함을 알 수 있다. 이것은 방출된 전자들이 모두 양극에 도달하기 때문이다. 그리고, 양극 전류의 값이 매우 작은 영역은 방출된 전자들 대부분이 게이트 전극으로 흡수되어 극히 일부분의 전자들만이 양극에 도달하기 때문인 것으로 설명할 수 있다.

게이트 전압이 100 V일 때 측정된 양극 전류는 62 μA 이다. 이는 평균적으로 tip 당 $0.62 \mu\text{A}$ 에 해당되는 값이다. 양극 전류는 tunnelling을 일으키는 전계의 세기, 방출 전극의 기하학적 형상등에 크게 의존한다.

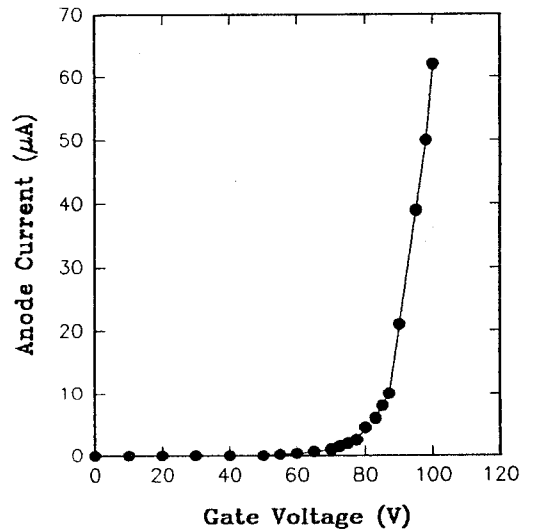


그림 5. 진공 자기 센서의 $I_a - V_g$ 특성.

Fig. 5. $I_a - V_g$ characteristics of the vacuum magnetic sensor.

방출 전극으로부터의 tunnelling에 의한 전계 방출은 Fowler-Nordheim 관계식으로 나타낼 수 있다.^[3]

우리가 제조한 진공 자기 센서의 방출 전류가 Fowler-Nordheim 관계식을 만족하는지를 검토하였다. 식 (1)은 Fowler-Nordheim 관계식을 정리하여 나타낸 것이다.^[6]

$$\log\left(\frac{I_a}{V_g^2}\right) = \log a - \frac{1}{V_g} \cdot \text{blog } e \quad (1)$$

여기서 a 와 b는 방출 전극의 재질, 형상 등에 의하여 결정되는 상수들이다.

그림 6은 양극 전압을 200 V 로 하고, 게이트 전압을 50 V 에서 100 V 까지 변화시키면서 측정한 양극 전류의 값을 식 (1)에 주어진 것과 같이 x, y 축을 각각 $\frac{1}{V_g}$ 와 $\log\left(\frac{I_a}{V_g^2}\right)$ 으로 계산하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 비교적 높은 게이트 전압 영역에서 Fowler-Nordheim 관계식을 잘 만족하고 있음을 알 수 있다. 따라서 제작된 진공 자기 센서의 출력 전류는 전계 방출에 의한 tunnelling 현상에 의해 주어짐을 알 수 있다.

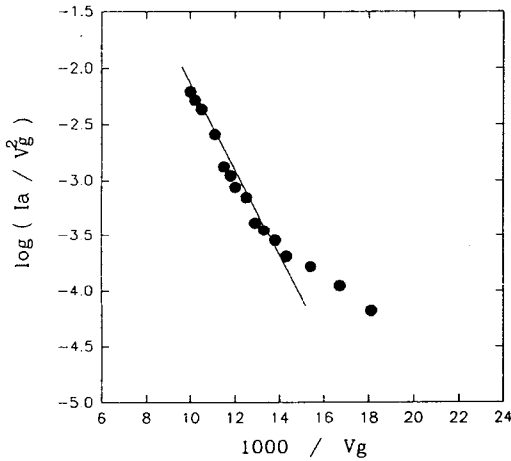


그림 6. 방출 전류의 Fowler-Nordheim 특성.
Fig. 6. Fowler-Nordheim plots of emission current.

2) 자기 특성

그림 7은 진공 자기 센서의 자기 특성을 측정하기 위한 회로도이다. 진공 자기 센서의 표면에 수직으로 자장 B를 인가하면, 그림 7과 같이 방출극으로부터 방출된 전자는 Lorentz 힘을 받아 편향됨으로써 두 양극(anode 1; a₁, anode 2; a₂) 사이에 전류의 차가 형성된다. 이 전류의 차를 측정하기 위해서 두 양극 a₁, a₂에 동일한 전압을 인가한 후 양극 전류 I_{a1}, I_{a2}를 측정하였다. 두 양극 전류편차(current deviation)를 Δ, 상대전류편차(relative current deviation)를 δ 라 할 때 Δ 와 δ 는 다음과 같이 정의한다^[7].

$$\Delta(V_a, V_g, B) = |I_{a1} - I_{a2}| \quad (2)$$

$$\delta(V_a, V_g, B) = \frac{\Delta}{(I_{a1} + I_{a2})} \quad (3)$$

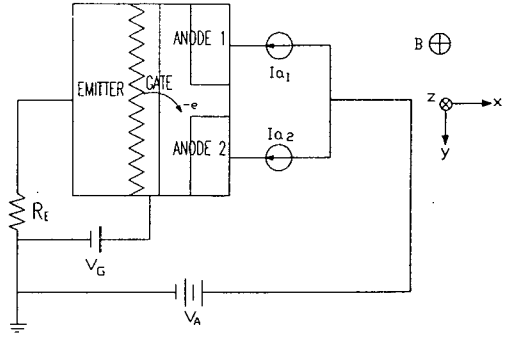


그림 7. 전계 방출 자기 소자의 동작회로.
Fig. 7. Operating circuit of the field emission magnetic device.

제조된 자기 센서의 자기적 특성을 측정하기 위하여 게이트 전압을 100 V, 양극 전압을 200 V 로 일정하게 유지시키고, 소자 표면에 수직으로 자장을 인가하였다. 그림 8은 자기 센서의 자장에 대한 상대 전류 편차 δ 를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 양극 전류의 차가 인가 자장에 대하여 좋은 선형적인 응답을 나타내고 있음을 알 수 있다.

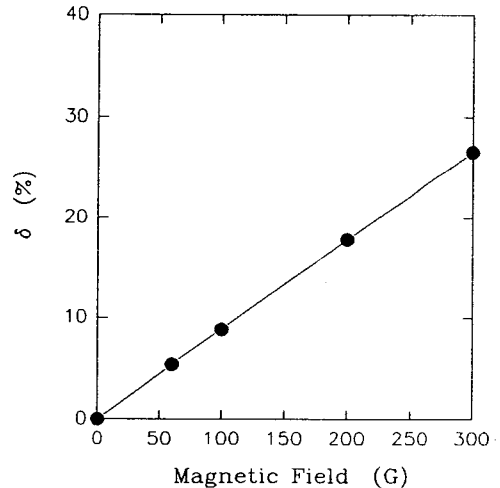


그림 8. 자장에 대한 상대 전류 편차.
Fig. 8. Plot of the relative current deviation δ vs. the magnetic field.

3) 감도

자기 센서의 성능을 나타내는 척도인 감도(sensitivity)는 절대 감도(S_A)와 상대 감도(S_R)로서 나타내며 각각 다음과 같이 정의한다.

$$S_A = \frac{\Delta}{B} \quad (4)$$

$$S_R = \frac{\delta}{B} \quad (5)$$

여기서 B 는 인가 자장의 세기를 나타내며, Δ 와 δ 는 각각 식 (2)와 (3)으로 주어지는 양이다. 앞에서는 자기 센서의 자장 의존성을 살펴 보았다. 양극 전류는 게이트 전압과 양극 전압에 의존하기 때문에 자기 센서의 감도, 즉, 절대 감도와 상대 감도는 모두 게이트 전압과 양극 전압에 의존한다. 감도의 전압 의존성을 조사하기 위해서 인가 자장 B 를 300 G로 유지시키고, 게이트 전압과 양극 전압을 변화시켰다. 그림 9는 절대 감도와 상대 감도를 게이트 전압을 패러미터로 하여 양극 전압을 변화시켜 가면서 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 절대 감도와 상대 감도는 각각 양극전압이 증가함에 따라 증가하며 결국 양극 전압 100 V 이상에서 포화치에 이르게 된다. 이는 주어진 전계에 대하여 방출 전극으로부터 방출되는 전자가 포화상태에 도달했음을 말해 주고 있다. 그리고, 절대 감도는 게이트 전압이 증가할수록 증가하는 경향을 보여 주고 있는데 대하여, 상대 감도는 그 반대의 특성을 나타내고 있다. 즉, 그림 9(a)에서 게이트 전압이 증가함에 따라 (2)식과 (4)식에 연관되어 절대 감도가 큰 폭으로 증가하는 성질을 나타내고 있는 반면에, 그림 9(b)에서는 상대 감도가 게이트 전압이 증가함에 따라 (3)식과 (5)식에 연관되어 오히려 감소한다는 것을 알 수 있다. 그리고, 양극 전압의 넓은 범위에 걸쳐서 상대 감도는 절대 감도보다 훨씬 적게 변하며 거의 일정한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 두 감도를 비교해 볼 때, 상대 감도와 자장과의 곱의 값은 약 23 ~ 27 %의 범위이고, 절대 감도와 자장과의 곱의 값은 0 ~ 16 μA 의 범위이며, 절대 감도보다 상대 감도가 바이어스 변화에 덜 민감하다는 것을 알 수 있고, 이는 실제응용에 있어서 상대 감도의 표현이 더욱 적합하다는 것을 의미한다. 그러나, 절대 감도는 실용상의 감도를 나타내는 경우와, 센서의 행동이 동작 조건에 대하여 비선형적이고, 고정되어 있는 경우, 그리고 상대 감도에 의한 표현이 불가능한 경우에 쓰인다. 반면, 자기

소자의 검출 출력 단자가 복수이고, 이들에 흐르는 전류가 일정하여 전류의 비율이 인가 자장에 의하여 변화하는 경우에는 상대 감도로 소자의 성능을 나타낸다.

본 연구에서 제작된 자기 센서의 상대 감도는 825 %/T이다. 이는 그림 9에서 $V_g = 100\text{ V}$, $V_a = 150\text{ V}$ 일 때의 상대 감도와 자장의 곱이 24.75 %인 값으로부터 쉽게 계산된다. 이 값은 GaAs 반도체 자기 센서의 상대 감도인 46 %/T인 값^[8]에 비할 때 매우 높은 값이다.

Sugiyama 등^[4]은 1000 %/T 이상의 매우 높은 감도를 갖는 진공 자기 센서를 보고하였다. Sugiyama 등이 제작한 자기센서는 석영 기판위에 수평형의 3극관 구조로 만들어졌기 때문에, 석영 기판과 전극사이의 컨덕턴스가 무시되어 매우 높은 감도가 가능하다고 본다. 본 연구에서 제작한 자기센서는 공정상의 문제로 실리콘 기판을 사용했는데 석영 기판을 사용하는 것보다 누설 전류가 약간 많기 때문에 감도가 약간 떨어지는 것으로 생각된다.

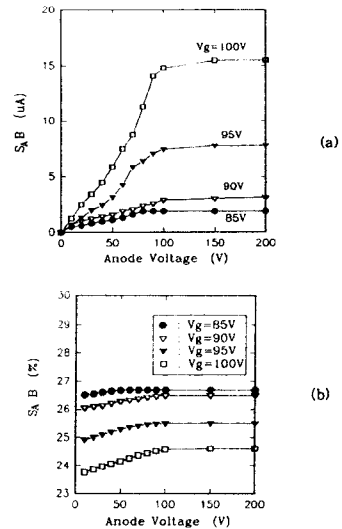


그림 9. V_a 와 V_g 의 변화에 따른 감도($B = 300\text{ G}$);

(a) 절대 감도 S_A , (b) 상대 감도 S_R .

Fig. 9. Sensitivities as functions of V_a and V_g ($B = 300\text{ G}$);

(a) The absolute sensitivity S_A and

(b) the relative sensitivity S_R .

IV. 결론

반도체 기판위에 전극 재료로 금속을 증착하여 수평 구조의 진공자기 센서를 제조하고 그것의 특성을 측정하였다. 전자 방출 전극의 구조를 팁어레이로 하였으며, 팁사이의 간격은 10 μm 이었다. 제조된 자기소자는 양극 전압을 200 V 로 하였을 때, 84 V 의 turn on 전압을 나타내었다. 게이트 전압을 100 V 로 하였을 때 팁당 평균 0.62 μA 의 방출 전류를 나타내었다.

측정 결과로부터 자기 소자의 전자 방출 특성은 Fowler-Nordheim 이론을 잘 만족함을 알 수 있고, 이로부터 양극전류는 tunnelling 현상에 의한 전계방출에 기인한다고 결론 지을 수 있다.

본 연구에서 제작한 진공 자기 센서는 825 %/T 의 높은 감도를 나타내었다. 이 값은 석영 기판을 사용하여 제조된 경우보다 감도가 떨어지지만, 실리콘 기판을 이용하여 반도체 공정 기술을 그대로 이용할 수 있다고 하는 장점을 갖고 있다.

끝으로 성능개선을 위해 많은 연구가 뒤따라야 한다고 보며, 진공 자기 센서는 고감도 자기센서로서의 활용이 기대된다.

V. 참고문헌

[1] R. H. Fowler, L. W. Nordheim, "Electron Emission in intense Electric Fields", Proc. Roy. Soc., vol. 119, pp. 173, 1928.

[2] K. R. Shoulders, "Microelectronics Using Electron-Beam-Activated Machining Techniques", in Advances in Computers, vol. 2, Academic Press, pp. 135-197, 1961.

[3] C. A. Spindt, "A Thin Film Field Emission Cathode", J. Appl. Phys., vol. 39, no. 7, pp. 3504-3505, 1968.

[4] Y. Sugiyama, J. Itoh, and S. Kanemaru, "Vacuum Magnetic Sensor with Comb-Shaped Field Emitter Arrays", The 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, pp. 884-887, 1993.

[5] I. Brodie, "Physical Consideration in Vacuum Microelectronic Devices" IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 36, no. 11, pp. 2641-2644, 1989.

[6] H. S. Uh, and N. S. Park and J. D. Lee, "Fabrication and Characterization of Silicon Field Emitter Array Using Pure Thermal Oxide", Korean Applied Physics, vol. 7, no. 4, pp.333-341, 1994.

[7] X. Zheng, S. Wu, "General Characteristics and Current Output Mode of a MOS Magnetic Field Sensor", Sensors and Actuators A, 28, pp. 1-5, 1991.

[8] Y. Sugiyama, H. Soga, M. Tacano and H. P. Baltes, "Highly Sensitive Split-Contact Magnetoresistor with AlAs/GaAs Superlattice Structures", IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 36, no. 9, pp. 1639-1643, 1989.

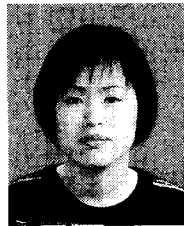
著 者 紹 介



남 명 우
1966년 10월 22일생. 1991년 계명대학교 물리학과 졸업 (이학사). 1996년 영남대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사). 주관심분야 : 마이크로 머시닝, 반도체 공정.

남 태 철

『센서학회지 제1권 제1호』 논문92-02, p.21 참조
현재 영남대학교 전자공학과 교수



홍 미 란
1969년 10월 15일생. 1992년 영남대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1995년 영남대학교 대학원 졸업(공학석사). 1995년 ~ 현재 현대전자산업(주) 반도체연구소 소자개발실 근무. 주관심분야 : 반도체 센서.