

# 평면구조의 전계방출형 자기 센서 The Magnetic Sensor with Lateral Field Emitter Arrays

남명우\*, 김시현, 남태철

Myung-woo Nam\*, Si-Hon Kim, Tae-Chul Nam

영남대학교 전자공학과

Dept. of Electronic Eng., Yeungnam Univ.

## Abstract

We have fabricated the vacuum magnetic device with a lateral field emitter arrays constructed on n-Si wafer, and investigated its magnetic characteristics. The device is consisted of tip-arrayed emitter, gate, and split-anode. The fabricated vacuum magnetic device has showed a good linearity to the magnetic field and a high sensitivity compared with the conventional semiconductor magnetic device.

## I. 서론

기존의 반도체 자기 센서 소자들은 소자 동작의 능동영역이 반도체 내부로 제한되기 때문에 반도체 소자의 최대 단점인 온도 특성이 매우 불안정하며, 미소 자장의 검출은 불가능하다는 단점이 있다.<sup>[1,2,3]</sup> 만일 캐리어의 능동영역을 진공으로 하게 되면, 캐리어들이 반도체내에서 일으키는 격자들과의 산란현상이 나타나지 않기 때문에 전자의 이동도가 크게 증가하여 자기 소자의 감도가 크게 개선될 수 있다. 마이크로머시닝 기술을 이용하여 일함수가 낮은 몰리브데늄 금속으로 게이트, 분리형 양극(split-anode), 그리고 팁배열형의 이미터로 구성된 소자를 제작하였다. 이미터는 전장 방출의 소스가 되게 하고, 분리형 양극은 자장 인가시의 로렌츠 힘에 의한 편향된 전류량을 검출하며, 게이트 전극으로 이를 조절할 수 있도록 하였다. 제작된 소자를 진공으로 봉입하여 소자의 능동층

을 진공 영역이 되게 하여 감도를 개선하였다. 본 연구에서는 전장 방출된 전자를 이용하여 진공영역을 능동층으로 하는 고감도의 자기 센서를 설계 및 제작하고 자장에 대한 특성을 측정하였다.

## II. 진공 자기 소자의 제작

### (1) 전장 방출과 진공자기 소자의 동작

인가 전장에 의해 전자가 방출되고 그 방출 전자 전류는 금속의 일함수와 인가 전장의 함수로 나타나는 전장 방출법을 이용하므로써 온도의 영향을 무시할 수 있는 진공 소자를 제작하였다. 일함수가 낮은 금속을 전장 방출의 소스로 사용하면 낮은 인가 전압에서도 전자의 방출을 야기시킬 수 있다. 전장 인가시의 터널링 과정에 의한 전자의 전장 방출을 그림 1에 나타내었다.<sup>[1]</sup>

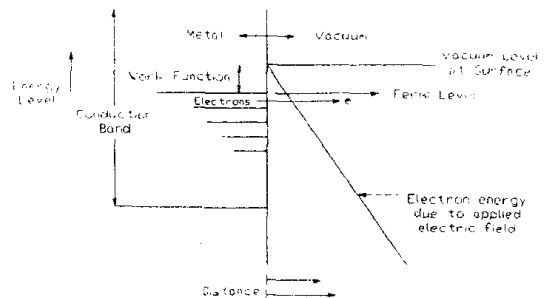


Fig. 1. Tunneling from metals

(E)을 인가할 경우 방출 전자에 의한 전류 밀도  $J$  는 0 K 에서 다음과 같이 Fowler-Nordheim 관계 식으로 나타낼 수 있다.<sup>[5]</sup>

$$J(0) = e^1 \frac{E^2}{8\pi h \varphi^2} \exp\left[ \frac{8\pi(2m)^{1/2} \varphi^{3/2}}{3heE} v(y) \right] \quad (1)$$

여기서

$$v = (e^3 E)^{1/2} / \varphi = 3.79 \times 10^{-4} E^{1/2} / \varphi \quad (2)$$

이다. 그리고  $E$  는 인가전장 ( $Vcm^{-1}$ ),  $\varphi$  는 금속의 일함수 ( $eV$ ),  $h$  는 플랑크 상수이고,  $v(y), \kappa(y)$  는 Nordheim elliptic 함수를 나타낸다. Spindt 는 식 (1)에 나타나 있는  $v^2(y)$  와  $\kappa(y)$  의 값은 각각 1.1 과  $(0.95-y^2)$  으로 간략화 하고 F-N 관계식을 다음과 같이 표현 하였다.<sup>[6]</sup>

$$J(0) = 1.5 \times 10^{-6} \frac{E^2}{\varphi} e^{(10.4/\varphi^2)} e^{-(6.41/10^6 \varphi^{1/2})} \quad [A/m^2] \quad (3)$$

위의 식에 (3) 에서 보는 바와 같이 전장 방출에 의한 전류밀도는 요인에 의해 영향을 받지만 금속의 일함수, 인가 전장, 소자의 형상 계수 등 여러가지가 존재하지만 그 중에서도 재료를 선택함에 있어서 금속의 일함수는 매우 중요한 요소이므로 낮은 일함수를 갖는 것을 선택하는 것이 중요하다. 여기서는 비교적 낮은 일함수를 갖는 Mo 금속으로 전극을 형성하여 소자를 제작하였다.

탑-어레이된 이미터에 대해서 게이트와 양극에 의해 큰 전장이 인가되면 이미터 전극에서 전자의 전계 방출이 일어난다. 이렇게 방출된 전자들은 전공영역 통해 분리형으로 된 양극으로 이동한다. 이 때 소자에 자장이 인가되면 전자들은 다음과 같은 로렌츠 힘  $F$  를 받는다.

$$F = ev_s B = ev_s B_z \quad [N] \quad (4)$$

여기서  $v_s$  는 전자의 드리프트 속도  $[m/s]$  이 힘  $F$  에 의하여 전자의 편향이 생기고, 이결과 분리된 두 양극에서 감지되는 전류의 차가 나타난다. 이

전류의 차로써 인가된 자장의 세기를 감지할 수 있다. 소자의 동작 원리도를 그림 2 에 나타내었다.

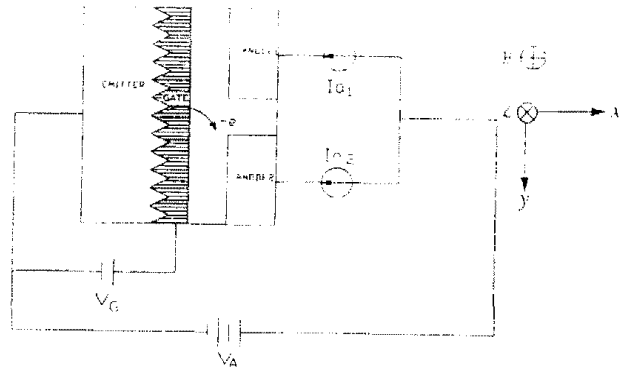


Fig. 2. Operating circuit of the field-emission magnetic device

즉 무자계시에는  $I_{01} = I_{02}$  이지만, 자장이 인가되면 분리된 두 양극에 전류차  $\Delta I (= I_{01} - I_{02})$  가 나타나게 된다.

그리고 편향된 전자 경로의 반경을  $r$  로 두었을 때,  $r = mv / eB$  로 나타나고 편향각이 매우 작다고 가정 할 경우 전자의 편향거리는 다음식으로 주어진다.

$$y = eBL^2 / mv \quad [m] \quad (5)$$

여기서  $L$  은 이미터와 양극사이의 거리를 나타낸다.

전자들은 그림 2 에 나타낸 원리도에 의해서 알 수 있는 바와 같이 자장에 의해서 편향되기 때문에 편향거리  $y$  는 자장과 이미터와 양극전극 사이의 거리에 의존함을 알 수 있다.

## (2) 자기 센서의 제작

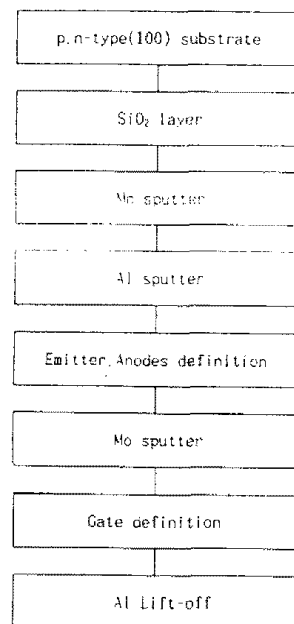


Fig. 3. Schematic diagram of fabrication process for the field-emission magnetic device

제작한 자기센서는 일함수가 4.27 eV 인 몰리브데늄을 전자 방출 소스인 이미터 전극으로 사용하였으며 배열된 팁의 수는 100개/mm 이고 팁의 두께는 0.5  $\mu\text{m}$  이다. 소자의 능동영역은 이미터와 양극 사이의 진공으로서 30  $\mu\text{m}$  간격으로 설계하였으며 공간 분해능은  $1000 \times 750 \times 0.5 \mu\text{m}^3$  로 하였다. 소자 제작의 전체 공정 과정을 그림 3 에 나타내었다.

사용한 반도체 비저항이  $1.5 \sim 2.1 \Omega \cdot \text{cm}$  인 n 형 (100) 인 실리콘 웨이퍼이다. 먼저 질소가스로 세척한 웨이퍼 위에 두께 1  $\mu\text{m}$  의  $\text{SiO}_2$  층을 만들어 금속과 기판과의 절연층을 형성시키기 위해서 1100  $^\circ\text{C}$  의 전기로에서 100 분 동안 습식 산화하였다. 산화층 위에 몰리브데늄을 1.5 Kw 전력으로 20 분 동안 스퍼터링 하여 두께 0.5  $\mu\text{m}$  로 증착시키고, 같은 방법으로 알루미늄을 0.5  $\mu\text{m}$  증착시켰다. 그리고 식각공정에 의해 이미터의 팁과 양극의 형상을 규장 하였다. 이때  $\text{AlMo}$  이중층의 식각액은  $\text{H}_2\text{PO}_4 : \text{CH}_3\text{COOH} : \text{HNO}_3 = 16 : 1 : 1$  을 사용하여 22분간 습식 식각하였다. 그리고 더 많은 방출전자를 얻기 위하여 이미터를 캔틸레버 (cantilever)식으로 만들고자 Under-cut 식각법으로 몰리브데늄 아래의 산화층을 식각하였다.  $\text{SF}_6$  플라즈마로 150 W, 200 mTorr 조건에서 3 분간 건식 식각한 결과 산화층이 0.6  $\mu\text{m}$  식각되어 어레이된 이미터는 팁의 형태로 제작되었다. 그리고 이미터 아래의 산화층 위에 게이트 전극을 위해 몰리브데늄을 스퍼터링 증착 방법으로 0.4  $\mu\text{m}$  증착하였다.

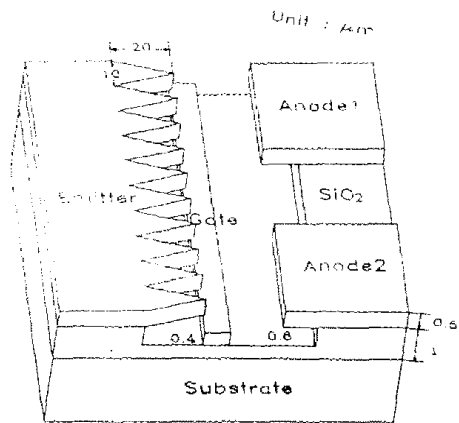


Fig. 4. Structural picture of the fabricated device

다음 식각공정으로 게이트 전극을 규정한 후  $\text{H}_2\text{PO}_4 : \text{CH}_3\text{COOH} : \text{HNO}_3 = 16 : 1 : 1$  용액에서 1분간 몰리브데늄을 식각하여 게이트 전극을 형성시킨 후 solvent로 포토레지스트를 제거하였다. 마지막 과정으로 웨이퍼를 KOH 용액에 200 초 동안 담구어 알루미늄을 Lift-off 시킴으로써 그림 4 와 같은 형태의 소자를 제작하였다. 제작된 소자의 SEM 사진을 그림 5 에 나타내었다.

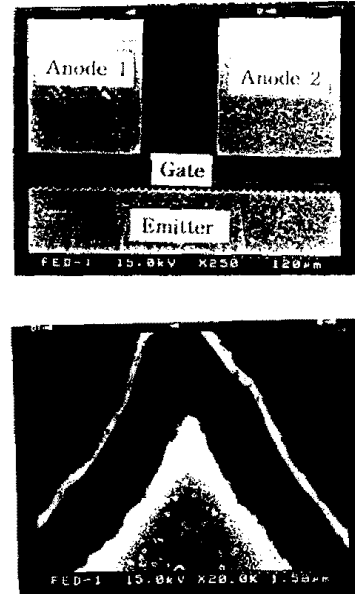


Fig. 5 SEM photographs of the fabricated device.

### III. 측정 및 결과

전장 방출의 소스로 몰리브데늄을 사용하여 제작한 FEA 자기 센서의 특성을 측정하기 위한 실험장치는 그림 6 과 같다.

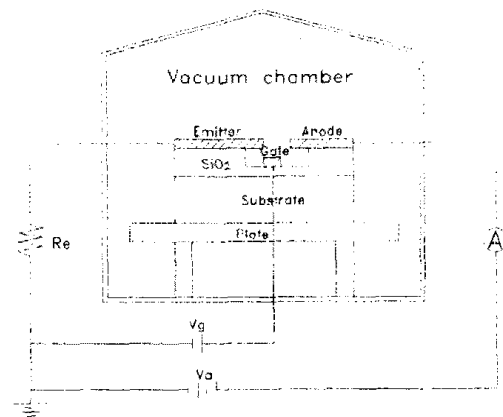


Fig. 6. Testing system configuration used to obtain data.

그림 7 은 진공 증착기 내부의 진공도를  $6.2 \times 10^{-7}$  Torr 를 유지한 상태에서 게이트 전압을 DC 0 ~ 100 Volt 까지 변화시켰을 경우의 소자의 이미터 전류를 측정하여 나타낸 것이다. 1mm 당 100 개의 팁-배열(tip-arrays)을 가진 소자는  $V_g$ 가 84 V 까지 변할 때 이미터 전류가 거의 나타나지 않고 84 V 이상에서는 급격히 증가를 나타내었다. 소자의 전류-전압 특성 곡선을 그림 7 에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 threshold 전압은 84V이었다. 측정결과 제작된 자기센서는 이미터에 대해 게이트 전압을 100 V, 양극 전압을 170 V 로 DC 바이어스를 걸었을 때  $62 \mu A$  의 이미터 전류가 측정되어  $0.62 \mu A/\text{tip}$  의 특성을 나타내었다.

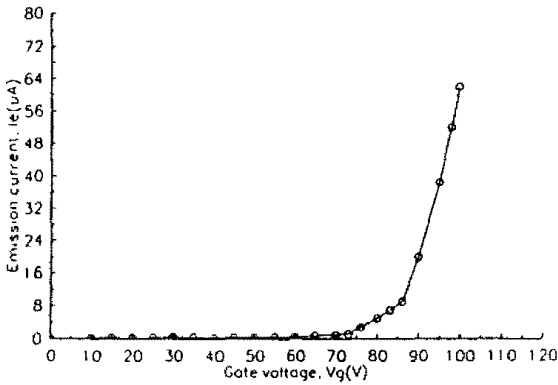


Fig. 7  $I_e$ - $V_g$  characteristics of the FEA device

그림 8 은 게이트 전압을 DC 100 V, 양극 전압을 DC 170 V 로 일정하게 유지하고 소자 표면의 수직 방향으로 자장을 인가한 경우에 자장의 변화에 따른 분리된 양극의 전류를 각각 측정하여 나타낸 것이다. 전장 방출된 전체 전류  $62 \mu A$  중에서 분리된 두 양극에 감지된 전류는  $50 \mu A$  로 감도에 직접적으로 영향을 주는 전자량은 전체 전자의 80 % 이다. 인가 자장을 0 ~ 400 G(Gauss) 변화시킬 때  $I_{a1}$  은 증가하는 반면에  $I_{a2}$  는 감소하여 자장의 세기에 따른 전자의 편향이 매우 선형적으로 나타남을 알 수 있다.

그림 9 는 게이트 전압 DC 100 V, 어노드 전압 DC 170 V 의 조건하에서 인가 자장에 대한 분리된 양극에서의 전류차 ( $I_{a1} - I_{a2}$ ) 를 나타낸 것이다. 그림 9 에서 볼 수 있듯이 인가 자장에 대한 양극의 전류차가 선형적으로 나타나므로 이로써 자장의 세기를 감지할 수 있다. 방출 전자 전류  $62 \mu A$  중에서 인가 자장이 400 G 일때 편향되어 나타나는 분리된 양극의 전류차는  $18.86 \mu A$  로 측정되어 제작된 자기 센서 소자의 비감도는  $760 \% / T$

임을 알 수 있다.

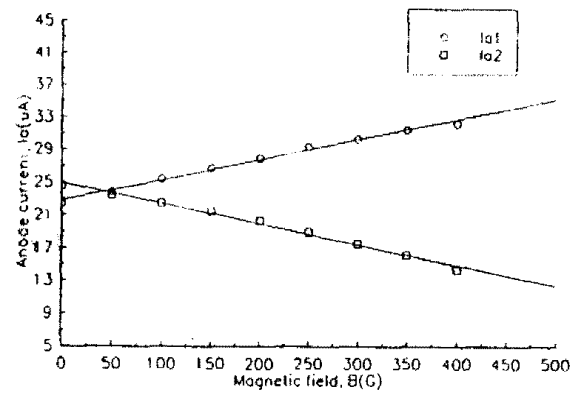


Fig. 8  $I_{a1}$ - $I_{a2}$  characteristics of the FEA device

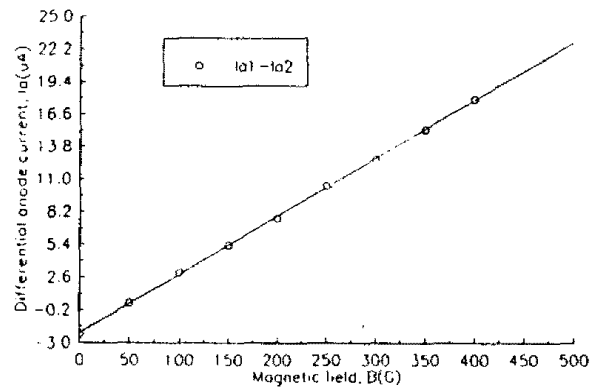


Fig. 9. B - ( $I_{a1} - I_{a2}$ ) characteristic of the FEA device

#### IV. 결론

반도체의 미세가공 기술인 마이크로머시닝 기술을 이용하여 튕니형의 팁이 배열된 이미터, 게이트 및 분리형 양극의 구조를 갖는 진공 자기 센서 소자를 제작하였다. 큰 전장의 인가로 방출되는 전자의 수송이 산란 현상을 무시할 수 있는 진공내에서 이루어지므로 전자의 속도가 반도체에서 보다 100배 이상 빠르고 감도 또한 기존의 반도체 소자에 비해서 매우 개선되었다.

상대감도를 기존의 소자와 비교할 때, Si-CMOS 소자인 경우에는  $15 \% / T$ ,<sup>[7]</sup> GaAs 소자는  $46 \% / T$ <sup>[8]</sup> 정도이나 본 실험에서 제작한 FEA 자기 소자는  $760 \% / T$  였고 자장에 대한 양극의 차동 전류도 매우 선형적이고 안정됨을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] R. S. Popovic, "The vertical Hall-effect devices", IEEE Electron Device Lett., vol. EDL-5, pp. 357-358, 1984.
- [2] A. Chovet, Ch. S. Roumenin, "Comparision of noise properties of different magnetic field semiconductor integrated sensors", Sensors and Actuators, A21-A23, pp. 790-794, 1990.
- [3]鄭宇喆, 白英熙, 南泰喆, "磁氣트랜지스터의 製作 및 特性", 센서 技術學 術大會 論文集, 제 3권 제 1호, pp. 99-104, 1992.
- [4] I. Brodie, C. A. Spindt, "Vacuum microelectronics", Academic Press, pp. 8-10, 1992
- [5] I. Brodie, C. A. Spindt, "Field electron emission from conductors", Advances in Electronics and Electron Physics, vol. 83,ss pp. 10-18, 1992
- [6] H. S. Uh, N. S. Park, "Fabrication and Characterization of Silicon Field Emitter Array Using Pure Thermal Oxide", SNU-SMDL 年例研究發表 論文集, pp. 110-125, 1994.
- [7] J. Itoh, K. Tsuburaya, S. Kanemaru, T. Watanabe and S. Itoh, "Fabrication and characterization of comb-shaped lateral field-emitter arrays", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 32, pp. 1221, 1993.
- [8] Y. Sugiyama, H. Soga, M. Tacano and H. P. Baltes, "Highly sensitive split-contact magnetoresistor with AlAs/GaAs superlatt-ice structures", IEEE Trans on. ED, vol. 36, No. 9, pp. 1639-1643, 1989.