

트렌치 구조를 갖는 3차원 홀 센서의 감도 개선에 관한 연구

이지연 · 최재형

영남대학교 전자공학과

Sensitivity Improvement of 3-D Hall Sensor using Anisotropic Etching and Ni/Fe Thin Films

Ji-Yeun Lee and Chae-Hyoung Choi

Department of Electronics Engineering, Yeungnam University

요 약: 3차원 홀 센서는 두 개의 수평 자계(x, y 성분) 검출부와 한 개의 수직 자계(z 성분) 검출부를 갖는다. 종래의 3 차원 홀 센서는 일반적으로 B_z 에 대한 감도가 B_x , B_y 에 대한 감도의 약 1/10정도에 그친다. 본 연구에서는 새로운 구조를 갖는 3 차원 홀 센서를 제안하였다. 이방성 식각을 이용하여 트렌치를 형성함으로써 감도를 약 6배 증가시켰다. 또한 자속을 집중시키기 위하여 웨이퍼 후면에 강자성체 박막을 증착시킴으로써 B_z 에 대한 감도를 B_x , B_y 에 대한 감도의 약 80%정도로 증가시켰다. 전류 3 mA를 인가했을 때, Ni/Fe 박막을 증착하여 제작된 센서의 감도는 B_x , B_y , B_z 에 대하여 각각 120.1 mV/T, 111.7 mV/T, 그리고 95.3 mV/T로 측정되었다. 센서의 선형성은 오차가 $\pm 3\%$ 로 우수하였다.

Abstract: The 3-D Hall sensor has two horizontal magnetic field sensing parts (x, y components) and one vertical magnetic field sensing part (z component). For conventional 3-D Hall sensor it is general that the sensitivity for B_z is about 1/10 compared with those for B_x or B_y . Therefore, in this work, we proposed 3-D Hall sensor with new structures. We have increased the sensitivity about 6 times to form the trench using anisotropic etching. And we have increased the sensitivity for the B_z by 80 % compared with those of B_x and B_y using deposition of the ferromagnetic thin films on the bottom surface of the wafer to concentrate the magnetic fluxes. When the input current was 3 mA, sensitivities of the fabricated sensor with Ni/Fe film for B_x , B_y , and B_z were measured as 120.1 mV/T, 111.7 mV/T, and 95.3 mV/T, respectively. The measured linearity of the sensor was within $\pm 3\%$ of error.

1. 서 론

자기 센서는 다른 주변 부품들과 함께 결합되어 하나의 마이크로 시스템을 이루며 다른 종류의 센서와 마찬가지로 자기 신호를 전기 신호로 변환하여 신호처리용 시스템으로 전송시켜 주는 역할을 하게 되는데 이러한 자기센서의 기능은 점차 공간 자계의 검출이 가능한 2차원 또는 3차원의 자기센서로 발전하고있으며, 공간에서의 벡터량으로 나타나는 자기량을 2차원 또는 3차원의 값으로 보다 효과적으로 검출할 수 있어야 한다.¹⁻⁴⁾ 이러한 목적으로 다양한 방식의 자기센서들이 제안되고 있으며 보다 효과적인 3차원 자기센서의 개발이 진행되고 있다. 3차원 공간 자계 검출을 위한 3차원의 자기센

서 시스템에서는 센서의 감도, 분해능, 그리고 각 검출방향에 대한 자계 검출 감도의 대칭성을 유지하는 것이 매우 중요한 요인이 된다. 종래의 공간 자계 검출용 자기 센서는 다른 종류의 센서에 비하여 그 감도가 현저히 낮고, 수직자계 성분(B_z)에 대한 감도가 수평자계 성분(B_x , B_y)에 대한 감도에 비해 약 1/10 정도로 매우 낮게 나타나는 문제점을 지니고 있다.⁵⁾ 이러한 문제점으로 인하여 공간 자계에 따른 전체의 검출감도가 수직방향 검출 감도에 의존하게 되어 결과적으로 감도의 저하 및 최종출력의 보정이 필요하게 된다. 이러한 자기센서의 수직방향에 대한 감도 저하의 원인은 수직 자계 성분의 자속이 센서부에 정확하게 인가되지 못하고 여러 방향으로 흐트러지기 때문이다.

본 연구에서는 수직자계의 감도를 개선하기 위하여 웨이퍼 후면에 강자성체인 Ni, Fe의 박막을 증착함으로써 자속의 집속효과로 수직 자계 성분에 대한 감도를 높여 자계의 3방향 성분에 대한 감도의 대칭성을 이루고자 한다. 또한 본 연구에서는 TMAH (tetramethyl ammonium hydroxide, $(CH_3)_4NOH$)에 의한 (111) 이방성 에칭⁶⁾을 이용해 중앙 전류 전극으로부터 외부 홀 전극 사이에 트렌치를 형성함으로써⁷⁾ 활성영역의 두께를 보다 얇게 하여 소자 내에서 캐리어들의 흐름을 더욱 집중시키며 불필요한 캐리어들의 흐름을 억제함으로써 감도를 향상시키고자 하였다.

2. 소자의 설계 및 제작

2.1. 3차원 홀 센서의 구조

공간 자계 검출을 위한 홀 센서의 구조를 Fig. 1에 나

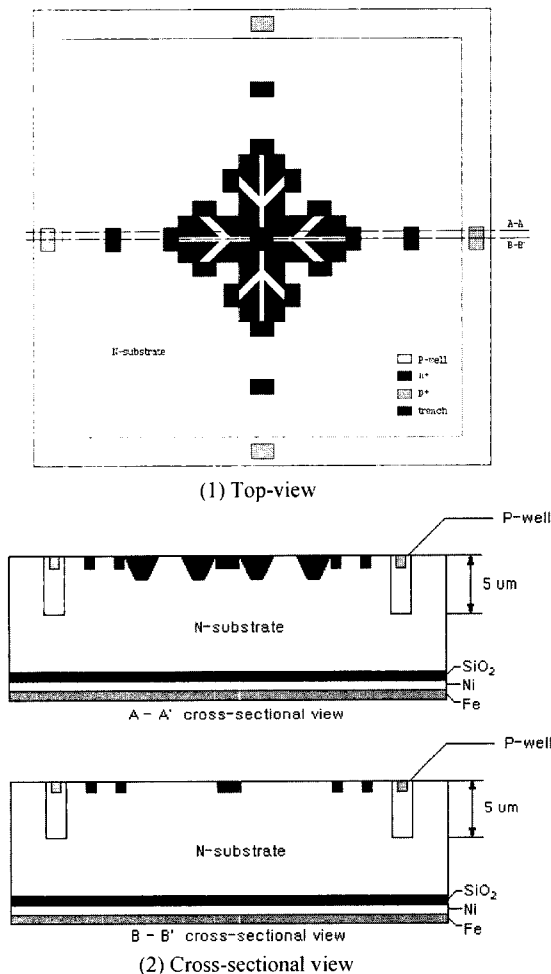


Fig. 1. Structure of the sensor.

타내었다. 3차원 홀 센서는 평면자계 B_x, B_y 를 검출하기 위해 중앙전류전극에 대해 y -방향 및 x -방향으로 대칭이 되도록 네 개의 홀 전극이 필요하고, 수직자계 B_z 를 검출하기 위해 각각의 홀 전극들은 분리시켜야 한다. 따라서 3차원 자계 검출을 위해서는 기본적으로 모두 8 개의 홀 전극이 필요하다. 본 연구에서는 보다 높은 홀 전압을 얻고 공정상 발생할 수 있는 오프셋을 줄이기 위하여 Fig. 1과 같이 12 개의 홀 전극을 구성하였다. 홀 센서의 감도는 입력전류와 자계의 세기에 비례하고, 그 두께에 반비례한다. 이를 수식으로 나타내면,

$$V_H \propto \frac{BI}{t} \quad (1)$$

V_H : 홀 전압, B : 인가자계,
 I : 인가전류, t : 센서의 유효두께

가 되고 이때 홀 전압을 증가시키기 위해서는 소자의 두께를 감소시켜 주어야 함을 알 수 있다.

본 연구에서는 소자의 유효두께를 감소시키기 위하여 TMAH를 이용한 이방성 에칭을 하여 트렌치를 설치하였다. 또한 수직자계에 대한 감도를 증가시키기 위하여 Ni와 Fe를 웨이퍼 후면에 증착시켰다.

2.2. 3차원 홀 센서의 공간자계 검출 원리

3차원 홀 센서의 공간자계 검출 원리를 Fig. 2에 나타

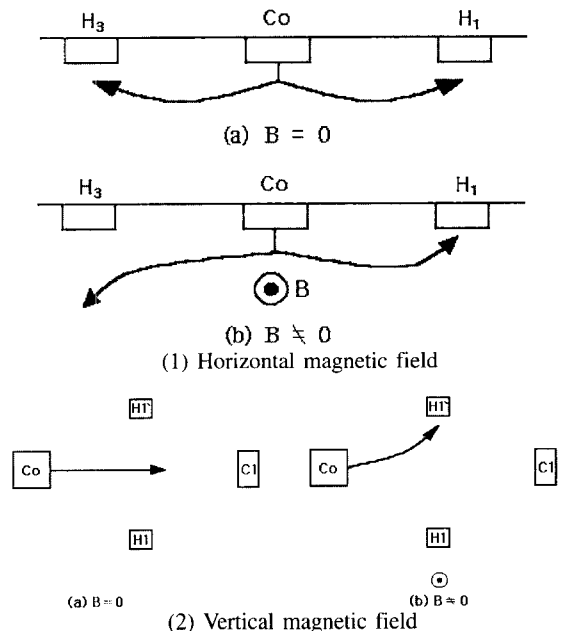


Fig. 2. Principle of magnetic field detections of the 3-D Hall sensor.

내었다. Fig. 2(1)에서 자계가 인가되지 않을 때의 캐리어 흐름은 홀 전극 양방향에 대해 대칭적이므로 전압차가 발생하지 않지만, 수평 자계가 인가되면 캐리어의 편향이 발생하여 양단의 전압차가 발생하게 된다. 이로써 수평자계를 검출할 수 있게 된다. 또한 Fig. 2(2)에서 자계가 인가되지 않을 때, 캐리어가 전류전극 사이를 흐르지만, 수직 자계가 인가되면 캐리어의 편향으로 인하여 분리된 홀 전극 사이의 전압차가 발생하여 자계를 검출할 수 있게 된다.

3차원으로 가해지는 공간자계로 인해 x-y축이 이루는 각(ϕ)과, xy평면과 z축이 이루는 각(θ)이 발생할 수 있는데 이를 Fig. 3에 나타내었다.

공간 자계 B는 다음 식(2)에 의해 정의된다. 먼저 공간 자계 B의 크기는 각 방향성분 자계 제곱 합의 근으로 나타낸다. 또한 x-y축이 이루는 각도 및 xy평면과 z축이 이루는 각도 다음과 같이 정의된다.

$$|B| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{B_y}{B_x}\right)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{B_z}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}}\right) \quad (2)$$

2.3. 3차원 홀 센서의 제작

앞에서 언급한 구조의 3차원의 홀 센서의 제작 공정 흐름도를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에 나타난 것과 같이 (100)방향성을 지닌 n-type의 웨이퍼를 준비하여 세척 후 습식산화(1100°C)를 하였다. 그리고 소자간의 분리를 위

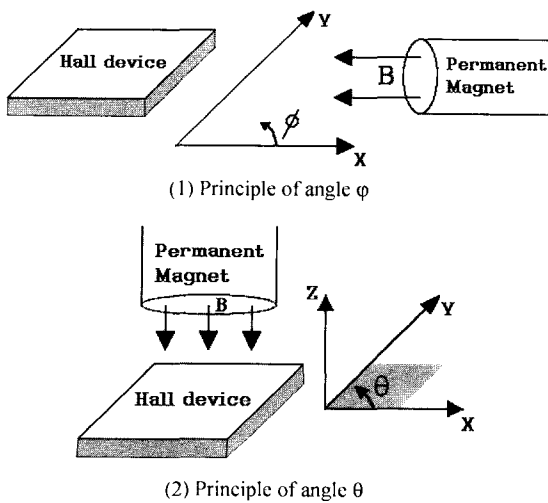


Fig. 3. Angle ϕ and θ for the magnetic field, B.

한 p-well을 5 μm 깊이로 형성하고 확산공정을 이용하여 각각의 전극들을 설치하였다. 이 때 홀 전극간의 거리는 140 μm 로 구성하고 전류 전극간의 거리는 200 μm 에서 50 μm 간격으로 350 μm 까지 되도록 하였다. 다음으로 25 wt.%의 TMAH 용액을 이용하여 이방성 에칭을 하여 중앙 전극 주위의 트렌치를 1 μm 간격으로 1~5 μm

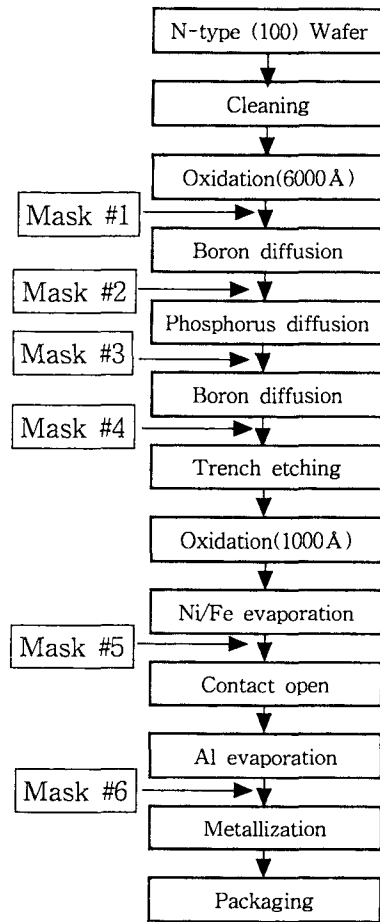


Fig. 4. Fabrication process of the sensor.

Table 1. Reason of fabrication processes

제조 공정	공정 조건
Oxidation	Wet, 1100°C
N ⁺ Diffusion	Phosphorus(liquid), 1100°C
P ⁺ Diffusion	Boron(liquid), 1100°C
Trench Etching	25 wt.% TMAH, 90°C
Al Evaporation	Evaporator, 10 ⁻⁷ torr
Ni/Fe Evaporation	E-beam Evaporator, 10 keV

까지 형성시켜 준 후 웨이퍼의 후면에 SiO₂를 성장시키고 E-beam evaporator를 이용하여 10 keV의 에너지로 Ni과 Fe을 각각 500 Å과 300 Å씩 차례로 증착하여 센서부를 제작하였다. 이에 Al을 증착한 후 450°C에서 30분간 어닐링하여 각 전극을 형성하였다. 제작된 소자의 전체 총 면적은 1.2×1.2 mm²가 되도록 하였다. 끝으로 패키징을 하여 하나의 센서 소자를 제작하였다.

또한 센서의 주요 제조 공정 조건을 Table 1에 나타내었다.

TMAH를 이용해 설치한 트랜치의 SEM 사진을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에 나타낸 것과 같이 중앙 전극과 12 개의 외부 전극 사이에 트랜치가 형성되어 있으며 각 전극은 모두 연결되어 있음을 알 수 있다. Fig. 5(1)는 TMAH를 이용하여 에칭할 때 돌출된 모서리 부분에서 나타나는 undercut⁸⁾을 나타내었으며, Fig. 5(2)는 에칭된 하단면에 나타나는 hillock⁹⁾을 나타낸 것이다. 그림에서 나타나는 두 가지 요인들은 제작된 센서의 형상에 영향을 주어 오프셋 전압의 요인으로 작용할 수 있으나, 센서의 외곽부분인 비활성 영역에서 주로 발생하게 되므로 센서의 감도에는 직접적인 영향을 미치지 않는다.

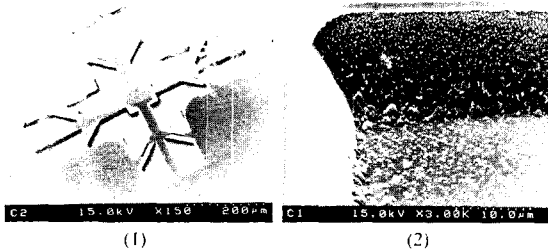


Fig. 5. SEM photographs of trenched area. (1) Undercut of convex corner, (2) Hillock of bottom surface.

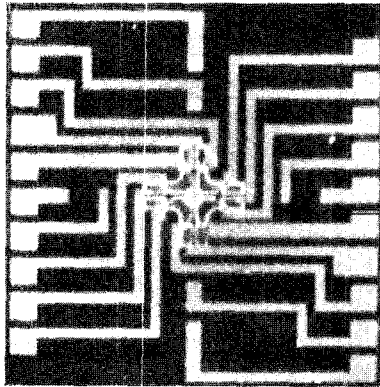


Fig. 6. Micro-photograph of the fabricated sensor (×50).

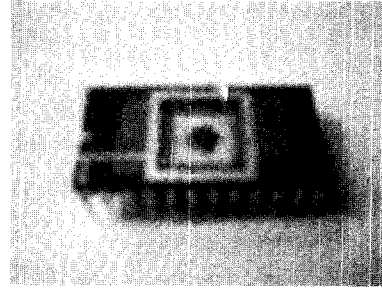


Fig. 7. Photograph of the packaged device.

본 연구에서는 강자성 재료 중 높은 투자율과 포화자속, 그리고 매우 낮은 보자력을 갖는 연자성재료를 사용하였다. 연자성재료는 3d^x4s² 계열의 천이원소로서 Mn, Fe, Co, Ni 등이 이에 속한다. 제작된 센서의 현미경 사진을 Fig. 6에 나타내었고, 패키징된 소자의 사진을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 제작된 센서의 총 전극은 21개였다. 이를 24-pin 수를 갖는 IC 패키지에 패키징하였다.

3. 측정결과

제작된 센서의 전자기적 특성을 측정하였다. 제작된 센서를 구동하는 방법으로 정전류구동과 정전압구동이 있으나 본 연구에서는 온도 변화에 비교적 둔감하고, 보다 정확한 측정을 위하여 정전류구동의 방법을 사용하였다.¹⁰⁾ 먼저 센서의 오프셋 전압을 측정하여 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 전류 1 mA를 인가하였을 때 오프셋은 6.12 μV로 측정되었다. 이 오프셋 전압은 센서의 분해능을 결정짓는 중요한 요소인데 본 연구에서 제작된 홀 센서의 오프셋 전압은 홀 전압의 약 1/1000이 안되므로 센서의 오프셋은 거의 나타나지 않음을 알 수

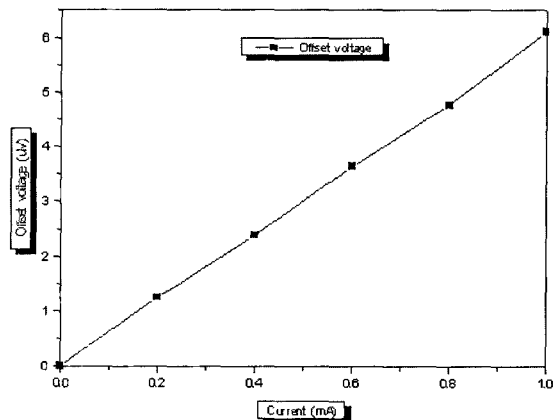


Fig. 8. Offset voltage of the sensor (B=0).

있다.

다음으로 센서의 자기적 특성을 측정하였다. 트렌치를 갖지 않을 때와 5 μm 깊이의 트렌치를 가질 때의 홀 전압을 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 전류 3 mA를 인가하고 자계 300 mT를 가했을 때, 트렌치를 갖지 않을 때의 홀 전압은 B_x , B_y , 그리고 B_z 에 대해 각각 5.65 mA, 5.12 mA, 그리고 0.52 mA로 측정되었으며, 5 μm 깊이의 트렌치를 가질 때의 홀 전압은 각각 34.5 mV, 31.7 mV, 그리고 3.2 mV로 측정되었다. 이는 트렌치 구조를 사용함으로써 소자내 캐리어의 흐름을 유도하여 감도를 증가시키는 효과를 얻을 수 있음을 의미한다. 또한 센서의 형상조건(l/w)에 따른 홀 전압의 변화를 측정하여 Fig. 10에 나타내었고, 트렌치의 깊이 변화에 따른 홀 전압의 변화를 측정하여 Fig. 11에 나타내었다.

형상조건(l/w)은 홀 센서에서 특히 수평자계에 감응하는 수직구조의 특성을 결정짓는 매우 중요한 인자로서 이론적으로는 l/w 비가 클수록 같은 자기장에 대해 보다

큰 감도를 얻을 수 있으나, 너무 커지면 오히려 센서 내부에서의 열적 손실로 인해 센서의 특성이 나빠진다. 여기서 l 은 중앙-외부전류 전극간 거리이고, w 는 홀 전극이 캐리어 흐름을 감지하는 영역의 폭이 된다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제작된 홀 센서 중 l/w 비가 300 $\mu\text{m}/140 \mu\text{m}$ 일 때 홀 전압이 가장 높게 측정되었다.

홀 센서내부의 캐리어 흐름은 수평, 수직으로 나뉠 수 있다. 이 캐리어의 흐름은 중앙 전류 전극에서 분산되어 나오므로 이를 집중시키기 위해서는 트렌치구조가 필요하다. 특히 센서 표면에 수평으로 가해지는 자계(B_x , B_y)에 대해 보다 높은 홀 전압을 얻기 위해서는 활성영역의 깊은 부분까지 트렌치를 형성시켜줄 필요가 있다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 측정결과 트렌치의 깊이가 5 μm 일 때 홀 전압이 가장 높게 측정되었다. 이러한 두 가지의 측정치로부터 얻어진 3차원 홀 센서의 최적 형상조건은 트렌치의 깊이가 5 μm , l/w 비가 300 $\mu\text{m}/140 \mu\text{m}$ 임을

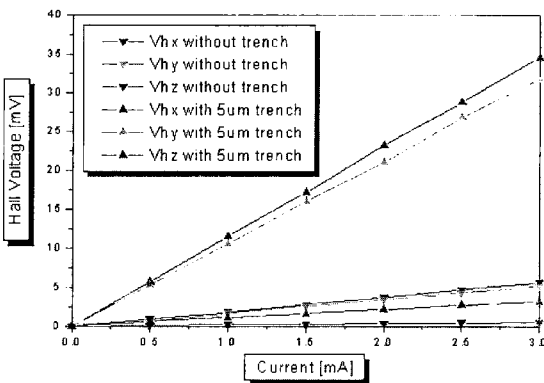


Fig. 9. Hall voltage vs. current without and with trench of 5 μm depth ($B=300 \text{ mT}$).

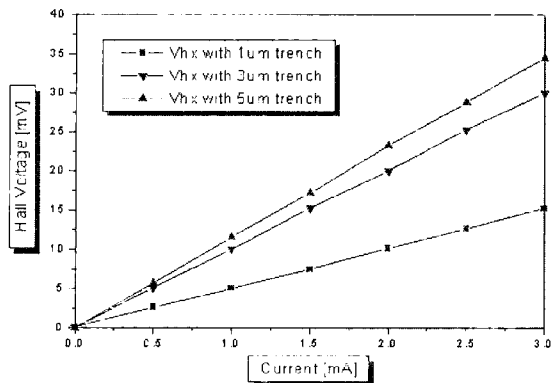


Fig. 11. Hall voltage V_{hi} vs. trench depth variation ($B=300 \text{ mT}$).

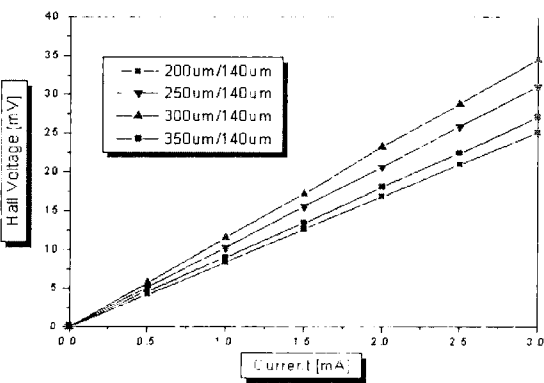


Fig. 10. Hall voltage vs. l/w variation ($B=300 \text{ mT}$).

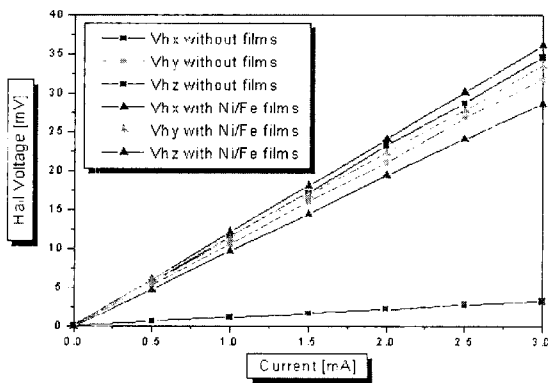


Fig. 12. Hall voltage (V_{hi} , V_{hs} , and V_{hc}) vs. without and with Ni/Fe films ($B=300 \text{ mT}$).

알 수 있었다.

이상의 구조를 지니는 홀 센서의 수직자계에 대한 감도의 개선을 위하여 $5\ \mu\text{m}$ 깊이의 트랜치를 갖는 센서에 Ni, Fe 박막을 증착시키지 않았을 때와 증착시켰을 때의 홀 전압을 측정하여 Fig. 12에 나타내었다. Ni/Fe 박막을 증착시켰을 때의 홀 전압은 B_x , B_y , 그리고 B_z 에 대해 각각 $36.1\ \text{mV}$, $33.5\ \text{mV}$, 그리고 $28.6\ \text{mV}$ 로 측정되었다. Ni/Fe 박막을 증착시켰을 때, B_x 와 B_y 에 대한 홀 전압은 큰 변화가 없었으나 B_z 에 대한 홀 전압은 9배정도 크게 증가하였다. 이 결과로부터 Ni/Fe 박막을 증착시키면 B_x 및 B_y 성분에 비해 B_z 성분의 자속에 대한 집속효과가 크게 작용했음을 알 수 있었다. 즉, Ni/Fe 박막을 증착시킨 결과 자속의 감도를 증가시키고 동시에 자계의 3성분에 대한 감도의 균형을 이룰 수 있었다.

센서의 각도 변화에 따른 선형성을 측정하여 Fig. 13에 나타내었다. 제작된 센서는 변곡점 부근에서는 오차가 약간 나타났지만 전체적으로는 5%이내의 오차범위

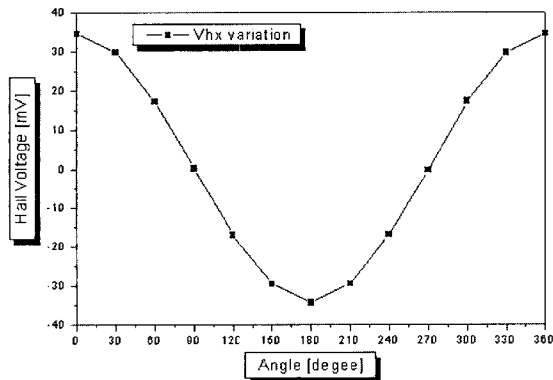


Fig. 13. Hall voltage V_{hx} vs. angle (ϕ) variation.

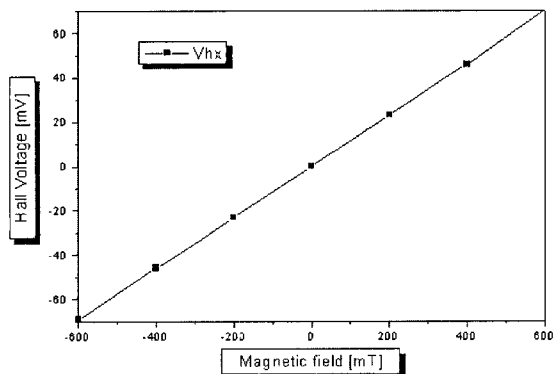


Fig. 14. Hall voltage V_{hx} vs. magnetic field variation ($I=3\ \text{mA}$).

내에 감도 특성이 나타나 각도 변화에 대해 선형적임을 알 수 있었다.

제작된 센서의 선형성을 알아보기 위해 $3\ \text{mV}$ 의 구동 인가전류 조건에서 외부의 자계변화에 대한 홀 전압의 변화를 측정하여 Fig. 14에 나타내었다. 제작된 센서의 감도는 전류 $3\ \text{mA}$ 인가시 $120.3\ \text{mV/T}$ 로 나타났으며, $-600\ \text{mT}$ ~ $600\ \text{mT}$ 의 비교적 넓은 범위에서 오차 한도가 $\pm 3\%$ 를 벗어나지 않음으로 인해 선형성이 우수함을 알 수 있었다. 또한 제작된 센서의 적감도는 B_x , B_y , 그리고 B_z 에 대해 각각 40.1 , 37.2 , 그리고 $31.8(\text{V/A} \cdot \text{T})$ 로 나타났으며, 센서의 분해능은 약 $100\ \text{gauss}$ 정도였다.

4. 결 론

종래에 제안되었던 3차원 홀 센서에서는 자계의 수평 성분과 수직 성분에 대한 감도가 크게 차이가 발생하였으며 공간자장을 측정하는 경우에는 출력 값의 보상 및 측정 범위의 제한을 가져오는 요인이 되었다.

본 연구에서는 이러한 불편을 제거하고 홀 센서의 감도 개선을 위하여 트랜치 구조를 설치하였으며 홀 센서의 밑면에 강자성체인 Ni/Fe 박막을 증착하여 인가되는 수직 방향의 자속 집속 효과를 통한 감도의 개선이 이루어 질 수 있게 하였다. 실험 결과 일반적인 구조의 3차원 홀 센서가 전류 $3\ \text{mA}$ 인가시 약 $18.8\ \text{mV/T}$ 의 감도를 지니는데 비하여 $5\ \mu\text{m}$ 깊이의 트랜치 구조를 지니는 3차원 자기센서의 경우 약 $120.3\ \text{mV/T}$ 의 감도를 나타내어 약 6배의 감도 개선 효과를 얻었다. 또한 수직 방향의 감도의 증가를 위하여 소자의 밑면에 강자성체인 Ni/Fe 박막을 증착한 경우 수직 방향의 감도는 $95.3\ \text{mV/T}$ 로 나타났으며 강자성체 박막을 증착하지 않은 경우의 감도에 비하여 약 9배정도 증가하였다. 이러한 방식으로 수직방향의 감도를 개선한 결과 수평 자계 검출 감도에 대하여 약 80% 정도의 수준으로 특성이 개선되었으며 각 검출방향에 대한 감도의 균형이 향상되었다.

참고문헌

1. F. Burger, P. -A. Besse and R. S. Popovic, "New fully integrated 3-D silicon Hall sensor for precise angular-position measurements", Sensors and Actuators, A67, 72-76 (1998).
2. M. Paranjape, Lj. Ristic and I. Filaovsky, "A 3-D Vertical Hall Magnetic Field Sensor in CMOS Technology", IEEE Trans. Electron. Devices, 1081-

- 1084 (1991).
3. T. Nakamura and K. Maenaka, "Integrated Magnetic Sensors", *Sensors and Actuators*, A21-A23, 762-769 (1990).
 4. Lj.Ristic, M. T. DOAN and M. Paranjape, "3-D Magnetic Field Sensor Realized as a Lateral Magnetotransistor in CMOS Technology", *Sensors and Actuators*, A21- A23, 770-775 (1990).
 5. Hsiao-Yi Lin, Tan Fu Lei, Jz-Jan Jeng, Ci-Ling Pan and Chun-Yen Chang, "A novel structure for three-dimensional silicon magnetic transducers to improve the sensitivity symmetry", *Sensors and Actuators*, A56, 233-237 (1996).
 6. Osamu Tabata, "pH-controlled TMAH etchant for silicon micromachining", *Sensors & Actuators*. A53, 335-339 (1996).
 7. M. Paranjape, Lj. Ristic and W. Allegretto, "Simulation, Design and Fabrication of a Vertical Hall Device for Two-Dimensional Magnetic Field Sensing", *Sensors and Materials*, 5(2), 091-101 (1993).
 8. M. Merlos, M.C. Acero, M.H. Bao, J. Bausell and J. Esteve, "A study of the undercutting characteristics in TMAH-IPA system", *J.Microchem. Microeng.* 2, 181-183 (1992).
 9. M. Landsberg, S. Naseh, M. Kaharige and M. Paranjape, "On hillocks during anisotropic etching of Si in TMAH", *IEEE. J.of Microelectromechanical system* 5(2), 106-116 (1996).
 10. 정우철, 남태철, "자동검출방식을 이용한 홀 센서의 제작 및 특성", *한국센서학회지*. 7(4), 225-233 (1998).