

자기 센서내에서 확산 전류가 홀 계수에 미치는 영향

이 승기, 강 옥성, 오 광훈, *전 국진, 한 민구
서울대학교 전기공학과, *반도체 공동 연구소

DIFFUSION CURRENT EFFECT ON THE HALL COEFFICIENT IN A MAGNETIC FIELD SENSOR

Seung-Ki Lee, Uk-Song Kang, Kwang-Hoon Oh, *Kuk-Jin Jhun and Min-Koo Han

ABSTRACT

The analytical model to investigate the effects of the drift and diffusion carrier transport upon the Hall effect is presented and applied to the general PN junction structure. The diffusion current effect on the Hall coefficient can not be considered in the conventional model, which produces the conversion of the direction of the induced Hall field between measured and calculated values. The proposed analytical model which considers the diffusion current effect provides the coincident results with the previous experimental results.

1. 서론

Magnetotransistor는 집적화된 반도체 자기센서(Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor)중에서 민감도 면에서 가장 우수한 소자라고 볼 수 있다 [1]. Magnetotransistor의 구조는 기본적으로 Bipolar Junction Transistor의 구조이며 외부에서 인가되는 자장의 크기가 double collector의 전류차로써 검출되어지게 된다. 따라서 동작원리는 Bipolar 특성과 전자(電磁; galvanomagnetic) 효과의 복잡한 조합에 의해 나타나게 되는데 지금까지 알려진 동작원리로는 Carrier Deflection Model [2] 과 Emitter Injection Modulation [3] 등의 두가지가 있다.

Carrier Deflection Model은 그림 1과 같이 emitter injection 전류가 자장에 의해 deflect 되어져서 double collector의 전류차로 나타나게 되는 것으로서 민감도는 자장에 비례하게 된다 [2]. Emitter Injection Modulation은 그림 2에 나타난 것처럼 emitter-base 접합면 부근에 유기되는 홀 전압에 의해 emitter injection이 변화하는 것으로서 자장에 대해 지수 함수적으로 변화하는 민감도를 나타내게 된다 [3].

민감도 면에서 본다면 Emitter Injection Modulation을 이용하는 소자가 좀 더 우수한 특성을 나타낼 수 있다. 그러나 최근에 발표되어진 연구 결과에 따르면 일반적인 PN 접합 구조에서는 emitter injection 효과가 거의 나타나지 않는 것으로 밝혀졌다 [4]. 이 연구 결과에 따르면 emitter-base 접합을 따라 유기되는 홀 전압의 크기가 Emitter Injection Modulation을 일으키기에는 너무 작은 것으로 보이며 특히 홀 전압의 방향이 이론적으로 예측되어 지던 방향과 반대인 것으로 나타났다. 그러나 이러한 현상들에 대한 정확한 이유가 밝혀지지 않고 있어, 소자의 동작 원리에 대한 충분한 이해는 여전히 이루어지지 못하고 있는 상태이다.

본 논문에서는 이와같은 현상들에 대한 원인을 해석적 모델을 통해 분석하고 PN 구조에서 diffusion 전류가 전자(電磁) 효과에 미치는 영향을 조사하여 실험 결과들과 비교하도록 하였다.

2. 홀 전계의 해석적 모델

2-1. 기존의 모델

Magnetotransistor의 동작 특성은 Bipolar 구조에서의 전자(電磁) 효과에 의해 결정되어지는데 이것은 기본적으로 일반적인 PN 접합 구조에서의 전자(電磁) 효과로부터 쉽게 확장되어 질 수 있다. PN 접합 구조에서의 전자(電磁) 효과를 이해하기 위해서는 먼저 PN diode의 base 영역에서 발생하는 홀 전계에 대한 정확한 표현식을 유도하는 것이 필요하다.

일반적으로 홀 전계는 다음과 같은 식으로 표현되어지는 것으로 알려져 있다 [5].

$$E_H = R_H JB = \frac{\mu\mu_p^2 - r\mu_n^2}{q(n\mu_n + p\mu_p)^2} JB \quad (1)$$

이때 R_H 는 홀 계수, J 는 PN diode의 총 전류 밀도, B 는 인가되어진 자장의 크기를 뜻한다. 그러나 식 (1)에 나타나 있는 홀 계수에 대한 표현에는 homogeneous system, 즉 carrier gradient가 zero라는 가정이 포함되어 있다. 이러한 가정은 PN 접합면, 특히 short-base diode일 경우나 long-base diode의 접합면 부근에서는 carrier gradient에 의한 diffusion 전류가 중요한 역할을 하기 때문에 맞지 않는 가정이 된다.

2-2. Diffusion 전류를 고려한 모델

diffusion 전류가 전체 홀 전계에 미치는 영향을 고려하기 위해서는 전계와 carrier gradient가 모두 존재하는 일반적인 system에서의 입자들의 운동 방정식으로 부터 출발하

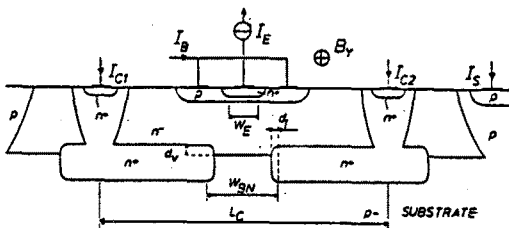


그림 1. Carrier Deflection Model

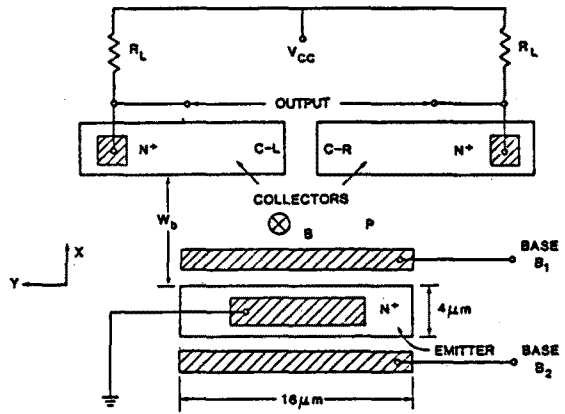


그림 2. Emitter Injection Modulation

여야 한다. 선행 연구 [6,7] 에서 발표되어진 바와 같이, diffusion 전류 효과를 고려한 홀 전계의 표현식은

$$E_y = \frac{(\mu\mu_p^2 - r\mu_n^2)B_z E_x - (D_p\mu_p + D_n\mu_n)B_z \frac{dn}{dx}}{(\mu\mu_p + r\mu_n)} \quad (2)$$

와 같이 나타난다.

2-3. 실험 결과와의 차이

홀 전계를 식 (1)과 같이 표시했을때 base에 유기되는 홀 전계의 방향은 홀 계수의 부호에 의해 결정되어지며 majority carrier에 의해 발생하는 홀 전계의 방향을 따르게 된다. 이러한 이론적 예측은 long-base diode일 경우 일치하는 것으로 나타나지만 short-base diode의 경우에는 일치하지 않는 실험 결과들을 나타낸다.

1985년 C.S. Roumenin [8] 에 의해 long-base diode ($w_B \approx 300\mu m$) 에서 측정되어진 base 영역의 홀 전계는 majority carrier에 의해 발생되어지는 홀 전계의 방향과 일치한다. 그러나 1989년 A. Nathan [4] 등에 의해 short-base diode ($w_B \approx 3\mu m$) 에서 측정되어진 결과는 오히려 minority carrier의 방향을 따르는 것으로 나타났다. 이와같은 이론적 계산과 실험 결과와의 불일치는 식 (1)에 포함된 가정의 한계 때문이며, 정확한 동작원리를 이해하기

위해서는 diffusion 전류의 영향이 고려되어진 해석적 모델을 사용하여야 하며 특히, diffusion 전류가 미치는 영향을 분석하여야 한다.

3. 해석적 모델의 분석

3-1. Diffusion 전류에 의한 홀 계수

diffusion 전류의 영향이 포함되어 있지 않은 홀 계수를 사용한 식 (1)을 각 전류 성분으로 분리하면,

$$E_H = R_H (J_r + J_{fn} + J_{fp}) B_z \quad (3)$$

와 같이 나타나고, J_r , J_{fn} , J_{fp} 는 각각 drift 전류, 전자에 의한 diffusion 전류, 정공에 의한 diffusion 전류를 뜻한다. 그러나, diffusion 전류 효과를 고려한 식 (2)를 각 전류 성분으로 표시하면,

$$E_y = (R_{Hr}J_r + R_{Hfn}J_{fn} + R_{Hfp}J_{fp})B_z \quad (4)$$

와 같이 되며 이때 식 (3)과 식 (4)의 차이는

$$R_{Hr} = \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{q(n\mu_n + p\mu_p)^2} \quad (5)$$

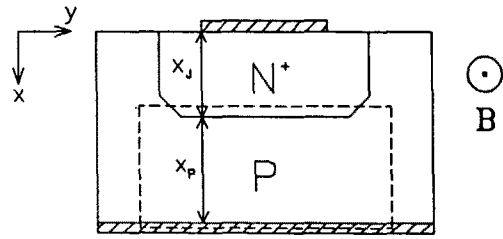
$$R_{Hfn} = \frac{-\mu_n}{q(p\mu_p + n\mu_n)} \quad (6)$$

$$R_{Hfp} = \frac{\mu_p}{q(p\mu_p + n\mu_n)} \quad (7)$$

로 표시되는 홀 계수의 차이에 있다.

drift에 의한 홀 계수 R_{Hr} 은 일반적인 모델의 R_H 와 일치한다. diffusion에 의한 홀 전계의 홀 계수중에서 majority carrier에 의한 것은 R_H 와 거의 같은 값을 보이나, minority carrier에 의한 것은 R_H 와 서로 다른 부호를 나타낸다.

그림 3과 같은 일반적인 구조에서의 이와 같은 계산 결과



[] : Analyzed Region

그림 3. 계산에 사용되어진 PN 구조 ;
 $X_J = 2.5 \mu\text{m}$, $X_P = 3,300 \mu\text{m}$, $N_A = 10^{19} \text{ Cm}^{-3}$
 $N_D = 10^{17} \text{ Cm}^{-3}$

를 그림 4와 그림 5에 나타내었다. low injection일 때에는 drift에 의한 홀 계수와 majority carrier의 diffusion에 의한 홀 계수가 거의 같고 high injection에 가까워짐에 따라 약간의 차이가 생김을 알 수 있다. 그러나 모든 경우에서 minority carrier의 diffusion에 의한 홀 계수만이 부호가 다름을 알 수 있다. short-base diode의 경우 minority carrier의 diffusion 전류가 가장 중요한 역할을 하고 따라서, 이에 해당하는 홀 계수에 의해 홀 전계가 결정되어지게 된다.

3-2. 실험 결과와의 비교

long-base diode의 경우 각각의 홀 계수는 그림 6과 그림 7에 나타난 바와 같이 short-base인 경우와 별다른 차이를 보이지 않는다. 그러나 C.S. Roumenin [8] 과 A. Nathan [4] 등에 의한 실험 결과는 long-base의 경우에는

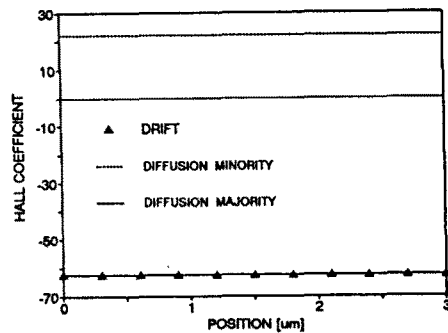


그림 4. 홀 계수의 비교 ; short-base, $V = 0.6 \text{ [V]}$

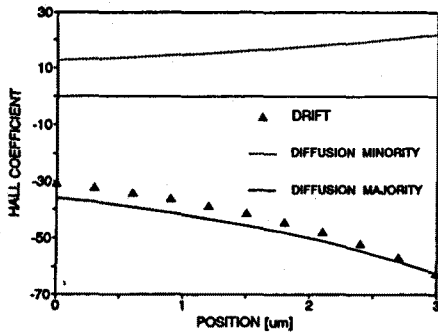


그림 5. 홀 계수의 비교 ; short-base, V = 0.8 [V]

majority carrier, short-base의 경우에는 minority carrier에 의한 홀 전계가 나타남을 보이고 있다.

이것은 long-base의 경우에는 diffusion 전류의 영향이 drift 전류의 영향보다 감소하기 때문에 drift에 대한 홀 계수가 중요한 역할을 하기 때문이다. 그러나 short-base의 경우에서처럼 diffusion 전류의 영향이 고려되어야 할 때에는 기존의 모델과는 상반되는, minority carrier에 의한 홀 전계가 나타나는 결과를 보이게 된다. 따라서 기존의 모델로는 설명이 불가능했던 이와 같은 결과가 diffusion 전류의 홀 계수에 대한 영향을 고려함으로써 해석되어질 수 있다.

4. 결론

일반적인 PN 구조를 갖는 자기센서내에서 base내에 유겨되어지는 홀 전압의 방향에 관한 이론적 계산과 실험 결과

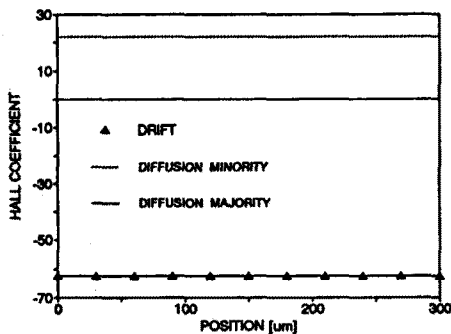


그림 6. 홀 계수의 비교 ; long-base, V = 0.6 [V]

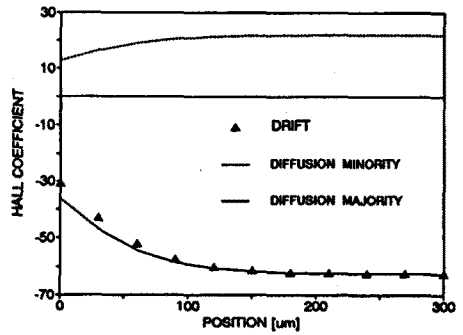


그림 7. 홀 계수의 비교 ; long-base, V = 0.8 [V]

민감도를 향상시킬 수 있는 새로운 자기센서의 개발을 위해서는 지금까지 고려되어 오지 않던, 소자내에서의 diffusion 전류의 영향을 반드시 고려하여야 함을 실험 결과와의 비교를 통해 알 수 있었고, 특히 기존의 이론적 모델이 제시하지 못한 diffusion에 의한 홀 계수의 분리는 소자 구조의 최적화에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] H. P. Baltes and R. S. Popovic, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensors", Proceedings of the IEEE, Vol. 74, pp.1107-1132, 1986.
- [2] V. Zieren and B. P. M. Duyndam, "Magnetic-Field-Sensitive Multicollector n-p-n Transistors", IEEE T-ED, Vol. 29, pp.83-90, 1982.
- [3] A. W. Vinal and N. A. Masnari, "Operating Principles of Bipolar Transistor Magnetic Sensors", IEEE T-ED, Vol. 31, pp.1486-1494, 1984.
- [4] A. Nathan, K. Maenaka, W. Allegretto, H. P. Baltes and T. Nakamura, "The Hall Effect in Integrated Magnetotransistors", IEEE T-ED, Vol. 36, pp.108-117, 1989.
- [5] R. A. Smith, Semiconductors, Cambridge University Press, pp.104-110, 1978.
- [6] 이 승기, 한 민구, "Analysis of a Novel Magnetic Field Sensor", 전기학의 순계 학술 발표회 논문집, pp.106-110, 1991.
- [7] Seung-Ki Lee, Kwang-Hoon Oh, June-Koo Rhee, Kuk-Jin Jhun and Min-Koo Han, "A Novel Magnetotransistor Based on the Drift Current in the Emitter", The 6th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, San Francisco, 1991.
- [8] C. S. Roumenin, "Hall Effect in Diode Structure", Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences, Vol. 38, pp.1501-1504, 1985.