

# 확산모형을 이용한 자기트랜지스터의 베이스 영역에서의 홀 전계 해석

論文  
43~7~11

## An Analysis of Hall Field in the Base Region of Magnetotransistors Using the Diffusion Model

李承起\*·姜郁成\*\*·韓民九\*\*\*  
(Seung-Ki Lee·Uk-Song Kang·Min-Koo Han)

**Abstract**—The analytical model for the induced Hall field in the magnetotransistor considering the diffusion of carriers has been proposed and verified by experiment and simulation. Previous models for the induced Hall field in the magnetotransistor do not consider the influence of the diffusion carrier transport. However, the carrier diffusion in the base region of magnetotransistors cannot be neglected and should be considered to evaluate the Hall field in the magnetotransistor accurately. We have measured the Hall voltage in the base region of the fabricated magnetotransistors. The measured values have been compared with the numerical results evaluated from our diffusion model as well as the calculated results from the conventional model. The evaluated Hall voltage from the diffusion model agrees well with the measured values while the sign of the Hall voltage calculated by the conventional model is opposite to that of the measured values in the saturation region. This discrepancy is due to the fact that the diffusion model considers the carrier diffusion while the conventional one does not. The Hall field model including the influence of carrier diffusion may be an important tool to optimize the device structure and to understand the operating principle of the magnetotransistor.

**Key Words** : Magnetotransistor, Diffusion Carrier Transport, Induced Hall Field.

### 1. 서론

실리콘을 사용하여 제작하는 자기센서는 InSb 홀(Hall) 소자 또는 자기저항(MR) 소자등과는 달리, 널리 쓰이는 실리콘 표준 제조공정을 이용하므로 주변 신호처리 회로의 집적이 가능하고, 센서 크기의 극소화 및 신뢰도 향상등의 장점을 갖고 있어 최근 많은 연구가 진행되고 있다.[1] 실리콘 자기센서의 하나인 자기트랜지스터(magnetotransistor)는, 자기센서의 가장 중요한 특성중의 하나인 민감도 면에서 볼때 가장 우수하고 넓은 응용범위를 보이고 있다.[1] 따라서 최근 많은

연구가 자기트랜지스터로 집중되고 있으며, 실험적인 민감도의 향상에 관한 연구는 많이 발표되고 있으나 소자구동 및 소자의 물리적 이해에 관한 연구는 미흡한 실정이다.[2-7]

자기트랜지스터는 기본적으로 트랜지스터의 구조를 가지기 때문에 자기트랜지스터의 동작원리는 바이폴라 특성과 전자(電磁) 효과와의 복잡한 조합에 의해 나타나게 된다. 즉, 트랜지스터 내에서의 전자 효과에 대한 정확한 수식적 표현을 통해 자기트랜지스터의 동작원리를 이해해야 한다. 어떤 특정한 구조 내에서 전자 효과가 그 소자에 미치는 영향은 자장을 외부에서 인가했을때 유기되는 홀(Hall) 전계에 의해 표시되어진다. 그러므로 자기트랜지스터에서의 전자 효과는 유기되는 홀 전계의 정확한 표현식에 의해 나타날 수 있으며, 이것은 자기트랜지스터의 동작원리를 해석하는데 있어 매우 중요한 요소

\*正會員: 檀國大 工大 電氣工學科 專任講師·工博

\*\*正會員: 서울大 大學院 電氣工學科 卒業(碩士)

\*\*\*正會員: 서울大 大學院 電氣工學科 教授·工博

接受日字: 1994年 4月 4日

1次修正: 1994年 6月 10日

라고 할 수 있기 때문에 이에 대한 정확한 해석적 모델이 필요하다.

자기트랜지스터 내부에서 자장의 영향으로 유기되는 홀 전계에 대한 모델은 Vinal [8]과 Roumenin [9]에 의해 제안된 바 있으며, 현재 자기트랜지스터의 해석에 사용되는 모델은 Roumenin에 의해 제안된 모델이다. 그러나, 기존의 모델로는 자기트랜지스터의 베이스 내에서 홀 전계의 방향이 회전한다는 실험결과 [10]가 설명되어지지 않는다. 이것은 자기트랜지스터 내에서의 홀 전계에 관한 기존의 모델들이, 홀 소자에서의 홀 전계 표현식을 단순히 수정 또는 확장하여, 트랜지스터 동작에 있어서 중요한 역할을 하는 캐리어들의 확산을 고려하지 않았기 때문이다. 베이스 길이가 짧은 트랜지스터의 베이스 영역, 또는 베이스 길이가 긴 트랜지스터의 에미터-베이스 접합 근처의 베이스 영역에서는 확산에 의한 캐리어 운송이 드리프트에 의한 것보다 더 우세하므로 캐리어 확산을 고려하지 않고서는 정확한 홀전계의 값을 예측할 수 없다.

본 논문에서는 확산에 의한 캐리어 운송의 역할을 고려하여, 자기트랜지스터의 베이스 영역 내에 유기되는 홀 전계에 대한 해석적 모델을 제안하고, 제작된 자기트랜지스터로 부터 홀 전압을 측정하여 제안된 모델에 의한 계산결과와 비교함으로써, 제안된 모델의 타당성을 실험적으로 검증하였다.

## 2. 유기되는 홀 전계에 대한 해석적 모델

### 2.1 홀 소자에서의 홀 전계 표현식

전자 혹은 정공(hole) 등의 단일 캐리어만이 존재한다고 가정할 수 있는 반도체 박판으로 형성되는 홀 소자의 경우 외부에서 전계와 자계를 서로 수직으로 인가할때 이것들과 수직인 방향으로 형성되는 홀 전계는 [11]

$$\vec{E}_H = R_H \vec{J} \times \vec{B}$$

$$R_H = -\frac{1}{qn} \quad \text{for n-type}$$

$$R_H = \frac{1}{qp} \quad \text{for p-type} \quad (1)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기에서  $\vec{J}$  와  $\vec{B}$  는 외부로부터의 전류와 자장,  $R_H$ 는 홀 계수,  $p$ 와  $n$ 은

각각 정공과 전자의 밀도를 뜻한다.

홀 소자 내에 전자와 정공이 서로 비슷한 양으로 함께 존재하여 한 종류의 캐리어만이 존재한다고 가정할 수 없는 경우의 홀 전계 표현식은 [11]

$$\vec{E}_H = R_H \vec{J} \times \vec{B}$$

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

와 같이 나타난다. 이때  $\mu_p$ 와  $\mu_n$  은 정공과 전자의 이동도를 뜻한다. 어느 경우이든 홀 계수에 의해 홀 전계의 방향이 결정되어지며 다수 캐리어의 방향을 따르게 된다.

### 2.2 Vinal 모델 [8]

Vinal은 자기트랜지스터의 베이스 내에 유기되는 홀 전계를 해석함에 있어서 단일 캐리어만이 존재하는 홀 소자에서의 홀 전계식을 적용하였다. 즉, pn 접합을 p형 홀 소자와 n형 홀 소자의 조합으로 생각하고 각각의 홀 소자에 대해 고려하면 p 영역에서는

$$\vec{E}_{Hp} = -\frac{\vec{J} \times \vec{B}}{qp_p(x)} \quad (3)$$

로 주어지고 n 영역에서는

$$\vec{E}_{Hn} = -\frac{\vec{J} \times \vec{B}}{qn_n(x)} \quad (4)$$

로 주어진다. 이때  $p_p(x)$ 와  $n_n(x)$ 는 각 영역에서의 다수 캐리어의 전하밀도를 뜻한다.  $N$  영역이 확산된 즉, 높게 도우핑된 영역이라고 하면  $n_n(x) \cong N_D$  라고 할 수 있고  $p_p(x) \cong N_A + n_p'(x)$ 라고 할 수 있다. 여기서  $n_p'(x)$ 는 p 영역에서의 여분의 소수 캐리어 밀도이다. 따라서, 홀 전계는 기본적으로 식 (1)과 동일하며 전류의 방향을 고려하면 각각의 홀 계수는 단일 캐리어에 의한 홀 소자의 경우와 동일하다.

결국 Vinal의 모델은 단일 캐리어만이 존재하는 홀 소자의 경우와 일치하며, 단지 낮게 도우핑된 영역의 전하밀도를 보상해 준 차이만 있을 뿐이다.

2.3 Roumenin 모델 [9]

Roumenin은 Vinal보다 한단계 더 나아가 단일 캐리어의 경우가 아닌, 전자와 정공이 모두 존재하는 홀 소자에서 자장에 의해 유기되는 홀 전계에 대한 식을 자기트랜지스터의 베이스 영역에 유기되는 홀 전계 해석에 사용하였다.

기본적으로 유기되는 홀 전계의 표현식은 식 (2)와 동일하다. 그러나 전류밀도  $J$ 를 총 전류밀도  $J_n + J_p$ 로 생각하여 홀 전계는

$$E_H = R_H(J_n + J_p)B$$

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

와 같이 표현되어진다. 총 전류밀도는 소자 내에서 일정하므로 홀 전계의 방향 및 크기를 결정하는 것은 홀 계수에 의해서이다. 이때 홀 전계의 방향은 다수 캐리어에 의해서 결정되어진다.

2.4 확산을 고려한 새로운 모델

Vinal의 모델이나 Roumenin의 모델등 기존의 자기트랜지스터의 베이스 내에서의 홀 전계에 대한 모델식은 홀 소자에서의 홀 전계에 관한 식을 수정 또는 확장한 식이다. 따라서, 홀 전계에 포함되어 있는 전류밀도를 pn 접합에서의 전류밀도로 계산한다 하더라도 홀 계수는 홀 소자에서의 경우와 동일한 값을 사용하고 있다. 그러나 홀 소자에서의 홀 계수의 유도에는 캐리어 기울기가 0이라는, 균질계(homogeneous system)에 대한 가정이 포함되어 있다. 실제로 pn 접합 내에서 이 가정은 맞지 않으며 이러한 가정하에서 유도되어진 홀 계수를 그대로 홀 전계식에 이용할 경우 홀 전계에 대한 올바른 표현식을 얻을 수 없게 된다. 그러므로, 기본적으로 pn 접합인 자기트랜지스터 내에서와 같이 캐리어 기울기가 존재하는 비균질계에서는 확산의 영향이 고려되어진 홀 전계에 관한 새로운 모델식이 필요하게 된다.

본 논문에서는 특별한 가정에 의해 제한되어지지 않도록 하기 위해 드리프트(drift)와 확산이 모두 고려되어진 입자의 운동 방정식으로부터 출발한다. 등온(isothermal)인 경우, 외부에서 전계와 자계가 서로 수직인 방향으로 인가되어지고 전계의 방향으로 입자가 운동하는 경우의 입자의 운동 방정식은 전자와 정공의 경우에 대해 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$nm \frac{d\vec{v}}{dt} = -qn\vec{E} - kT\nabla n - qn\vec{v} \times \vec{B} - nm\nu\vec{v} \quad (6)$$

$$pm \frac{d\vec{v}}{dt} = qp\vec{E} - kT\nabla p + qp\vec{v} \times \vec{B} - pm\nu\vec{v} \quad (7)$$

여기서  $\vec{v}$ 는 입자들의 속도 벡터,  $\vec{E}$ 는 전계 벡터,  $m$ 은 입자의 질량,  $k$ 는 볼츠만(Boltzmann) 상수,  $T$ 는 절대온도,  $\nabla n$ ,  $\nabla p$ 는 전자와 정공의 기울기,  $\nu$ 는 충돌 주파수를 각각 뜻한다. 이 식에서 우변의 제 1항은 전계에 의한 힘, 제 2항은 입자들의 기울기에 의한 힘, 제 3항은 로렌쯔(Lorentz)힘, 그리고 제 4항은 마찰에 의한 힘을 뜻한다. 이 식은 그림 1과 같은 좌표계에서 2개의 1차원 스칼라 방정식으로 분리되어질 수 있으며 식 (6)으로부터

$$nm \frac{dv_x}{dt} = -qnE_x - kT \frac{dn}{dx} - qnv_y B_z - nm\nu v_x \quad (8a)$$

$$nm \frac{dv_y}{dt} = -qnE_y - kT \frac{dn}{dy} + qnv_x B_z - nm\nu v_y \quad (8b)$$

와 같이 되고 식 (7)로부터

$$pm \frac{dv_x}{dt} = qpE_x - kT \frac{dp}{dx} + qp\nu_y B_z - pm\nu v_x \quad (9a)$$

$$pm \frac{dv_y}{dt} = qpE_y - kT \frac{dp}{dy} - qp\nu_x B_z - pm\nu v_y \quad (9b)$$

와 같이된다. 각 첨자들은 입자들의 방향과 종류

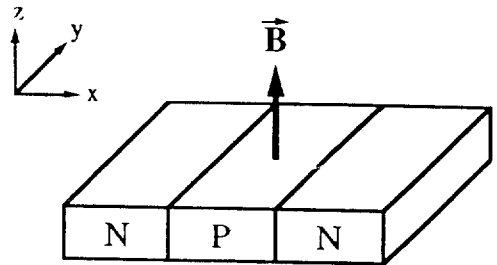


그림 1 해석적 모델에서의 좌표계와 자장의 방향

Fig. 1 The coordinate system and the direction of the magnetic field in the analytical model

를 가리킨다. 정상상태에서 식 (8)을 각 속도 성분에 대해 풀면

$$v_{xn} = -\mu_n E_x - \frac{D_n}{n} \frac{dn}{dx} - \mu_n v_y B_z \quad (10a)$$

$$v_{yn} = -\mu_n E_y - \frac{D_n}{n} \frac{dn}{dy} + \mu_n v_x B_z \quad (10b)$$

과 같이 된다. 이 식에서  $\mu = q/mv$  의 관계를 사용하였고  $D$ 는 확산계수이다. 식 (10)으로부터  $y$  방향의 전자들의 속도는 약한 자장인 경우에 대해, 즉  $1 \gg \mu_n B_z$ 인 경우

$$v_{yn} \cong -\mu_n E_y - \frac{D_n}{n} \frac{dn}{dy} - \mu_n^2 B_z E_x - \mu_n B_z \frac{D_n}{n} \frac{dn}{dx} \quad (11)$$

와 같이 표현된다. 비슷한 방법으로 정공에 대해서도 식 (9)로부터

$$v_{xp} \cong \mu_p E_x - \frac{D_p}{p} \frac{dp}{dx} - \mu_p^2 B_z E_y + \mu_p B_z \frac{D_p}{p} \frac{dp}{dy} \quad (12)$$

와 같이 쓸 수 있으며, 이제 식 (11)과 (12)로부터  $y$ 방향의 전류밀도를 정의할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} J_y &= -qn v_{yn} + qp v_{yp} \\ &= q(n\mu_n + p\mu_p)E_y + q(D_n \frac{dn}{dy} - D_p \frac{dp}{dy}) \\ &\quad + q(n\mu_n^2 - p\mu_p^2)B_z E_x + q(D_n \mu_n \frac{dn}{dx} + D_p \mu_p \frac{dp}{dx}) \end{aligned} \quad (13)$$

평형 상태에서  $y$  방향의 전류성분은 존재하지 않으므로  $J_y = 0$ 로 놓으면 홀 전계  $E_y$ 에 대해 정리할 수 있으며 이 식은

$$E_y = \frac{(p\mu_p^2 - n\mu_n^2)B_z E_x + (D_p \frac{dp}{dy} - D_n \frac{dn}{dy}) - (D_p \mu_p \frac{dp}{dx} + D_n \mu_n \frac{dn}{dx})B_z}{(p\mu_p + n\mu_n)} \quad (14)$$

과 같이 표현되어진다. 이 식에서 제 1항과 3항은 각각 드리프트와 확산에 의한 성분을 나타내며 제 2항은 자기다이오드(magnetodiode)에서의 Dember 전계 [12]에 해당한다. 입자들의 기울기가 0인 경우라면 제 2항과 3항을 무시하여 식 (14)는 식 (2)로 간단하게 줄어든다. 따라서, 식 (14)로 표현되어지는 홀 전계는 캐리어 기울기가 0이 아닌 자기트랜지스터의 pn접합에서의 홀 전계에 관한 정확한 표현식이라고 할 수 있다.

식 (14)와 같이 표현되어진 홀 전계식은 2차 효과인 Dember 전계항을 무시하고 다시 적으면

$$E_y = \frac{(p\mu_p^2 - n\mu_n^2)B_z E_x - (D_p \mu_p \frac{dp}{dx} + D_n \mu_n \frac{dn}{dx})B_z}{(p\mu_p + n\mu_n)} \quad (15)$$

과 같이 쓸 수 있다. 이 식을 기존의 모델과 비교하기 위해 식 (2)의 형태로 바꾸어 쓰면

$$E_y = \frac{\mu_p}{q(p\mu_p + n\mu_n)} J_p B - \frac{\mu_n}{q(p\mu_p + n\mu_n)} J_n B \quad (16)$$

와 같이 표현되어진다.

이 모델을 식 (3), (4)의 Vinal 모델이나 식 (5)와 같은 Roumenin 모델과 비교하면, 가장 큰 특징은 어느 한 영역에서 홀 계수가 더 이상 동일하게 표현되어질 수 없다는 점이다. 즉, 식 (16)으로부터

$$E_y = (R_{Hp} J_p + R_{Hn} J_n) B \quad (17)$$

와 같이 쓸 수 있고, 이때 각각의 홀 계수는

$$R_{Hp} = \frac{\mu_p}{q(p\mu_p + n\mu_n)} \quad (18a)$$

$$R_{Hn} = -\frac{\mu_n}{q(p\mu_p + n\mu_n)} \quad (18b)$$

과 같이 되어 홀 계수가 전자와 정공에 대해 분리되어져야 함을 알 수 있다.

### 3. 확산을 고려한 홀 전계 모델의 검증

#### 3.1 자기트랜지스터의 베이스 내에서의 홀 전압 측정

확산을 고려한 홀 전계 모델을 실험적으로 검증하기 위하여 그림 2와 같이 제작된 자기트랜지스터의 베이스 영역에 유기되는 홀 전압을 측정하였다. 제작된 자기트랜지스터는 두개의 컬렉터 전극과 두개의 베이스 전극을 갖는 npn 형 트랜지스터 구조로 이루어져 있으나, 베이스 영역에 홀 전압을 측정하기 위한 두개의 부가적인 전극이 형성되어 있다. 홀 전압 측정용 전극간의 거리는  $60\mu\text{m}$ 이고 에미터와 베이스의 깊이는 각각  $2.5\mu\text{m}$ 와  $4.7\mu\text{m}$ 이다.

외부로부터의 자장 인가는 영구자석을 사용하여 0.3 tesla의 자장을 소자 표면과 평행한 방향으로 인가하였고 소자는 베이스 공통 (common base) 상태에서 동작시켰다. 에미터 전류를 0.5, 1.0, 2.0 mA로 변화시키고 컬렉터 전압은 -0.6V에서 10V까지 변화시키며 이때 홀 전압 측정

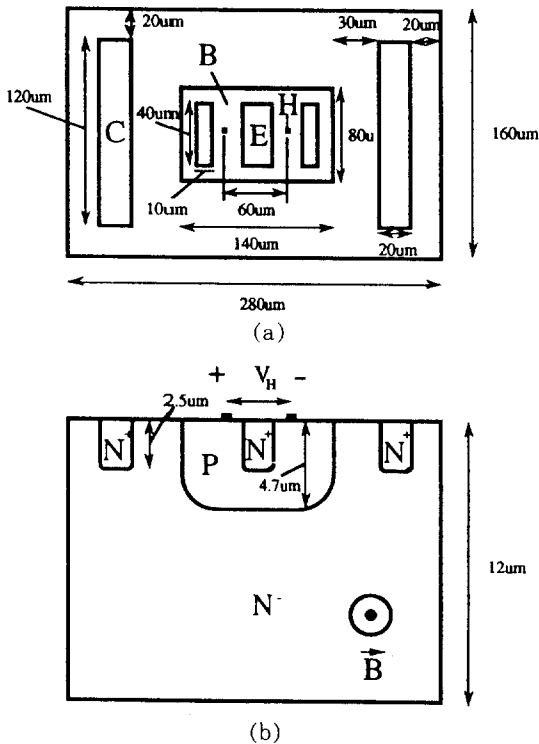


그림 2 제작된 자기트랜지스터의 (a)평면도 및 (b)단면도

Fig. 2 (a) Top and (b) cross section view of the fabricated magnetotransistor

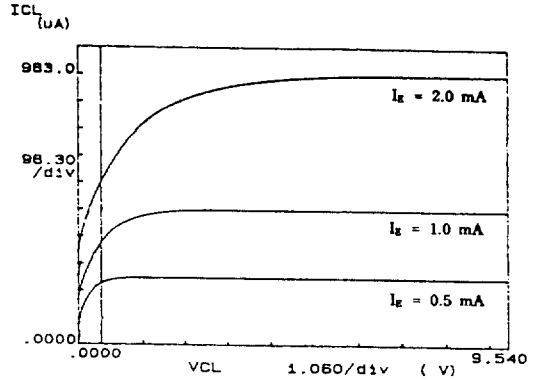


그림 3 베이스 공통 상태로 동작시킨 자기트랜지스터의 트랜지스터로서의 전압-전류 특성 곡선

Fig. 3 Current-voltage characteristics of the magnetotransistor as a transistor under the common-base mode

용 전극에 유기되는 홀 전압을, 100nV의 분해능을 갖는 HP3475A 멀티미터를 사용하여 측정하였다.

자장이 인가되지 않았을때, 즉 자기트랜지스터를 단순히 트랜지스터로 동작시켰을때의 전압-전류 출력 특성곡선을 그림 3에 나타내었다. 이때의 동작조건은 자장을 인가하여 홀 전압을 측정할때와 동일한 조건이다.

그림 4에 나타난 측정결과를 살펴보면 소자의 순방향 활성(forward active) 영역에서는 홀 전압이 음의 값을 유지하다가, 그림 3에서의 포화

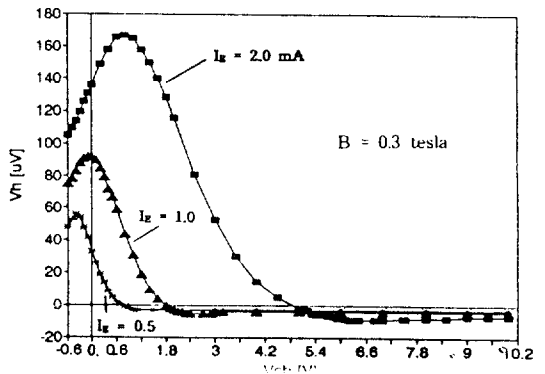


그림 4 컬렉터-베이스 전압 변화에 따른 유기되는 홀 전압의 변화

Fig. 4 Variation of the induced Hall voltages as a function of the collector-base bias

(saturation) 영역으로 바뀌는 부근에서 홀 전압의 방향이 반전되어 증가하다가 감소하게 된다. 홀 전압의 크기는 순방향 활성영역에서의 값이 포화영역에서의 값보다 훨씬 작은 것으로 나타났다.

3.2 홀 전계 모델에 의한 홀 전압의 계산

해석적 모델에 의해 홀 전압을 계산하기 위해서는 식 (17) 및 (18)에서 알 수 있는 바와 같이 캐리어 농도와 전자에 의한 전류밀도, 정공에 의한 전류밀도 등을 알아야 한다. 이 값들은 자장이 인가되기 전의 값들이므로 측정에 사용한 동일 구조, 동일 동작조건 하에서 소자를 시뮬레이션 함으로써 쉽게 구할 수 있다. 본 논문에서는 PISCES-2B 소자 시뮬레이터를 이용하여 그림 2와 동일한 구조에 대해 계산을 하였다. 그림 2의 트랜지스터 구조는 일반적인 구조의 트랜지스터이므로 소자의 설계 및 공정 변수의 추출, 처리등은 기존의 소자 시뮬레이터를 이용함으로써 가능해진다. 시뮬레이션 과정의 타당성과 계산에 이용된 소자 구조 및 동작조건 등이 측정시의 것들과 동일한 것임은, 가우시안(Gaussian) 분포를 갖는 도핑핑 단면(profile) 및 소자의 출력 특성이 실제 측정된 값과 일치하는 것을 통

해 확인하였다.

일반적으로 자기트랜지스터의 베이스 내부에 흐르는 전류성분은 수직방향 성분과 수평방향 성분 두가지로 분류할 수 있다. 트랜지스터의 동작으로서 본다면 이들 전류성분중 수직 방향 성분이 중요한 역할을 하게 되지만, 베이스 내에 홀 전압을 유기시켜 자기센서로 이용되어지기 위해서는 수평방향 성분이 중요한 역할을 하게 된다. 즉, 그림 2와 같은 구조에서 수직방향의 전류성분은, 2 $\mu\text{m}$  정도의 얇은 베이스를 통해 에미터에서 베이스로 주입된 캐리어들이 대부분 컬렉터 영역으로 빠져 나가게 되므로 전하 재분포에 의한 베이스 내에서의 홀 전압 유기에 크게 기여하지 못한다. 그러나 수평방향의 전류성분은, 베이스로 주입된 캐리어들이 자장에 의해 상·하로 분리되어 홀 전압 측정용 전극에 실제적인 전위차를 일으키게 한다. 따라서 홀 전압의 계산에 이용되어진 소자의 유효 영역을 홀 전압 측정용 전극 아랫 부분에서 에미터 길이 2.5 $\mu\text{m}$  까지로 정하고 시뮬레이션에서의 각 동작점으로부터  $J_n, J_p, n, p, \mu_n, \mu_p$  값을 읽어 평균치를 취하였다. 이 값들을 Roumenin의 모델식 (5)와 확산을 고려한 모델식 (17) 및 (18)에 각각 대입하고 거리를 곱하여 홀 전압을 계산하였다.

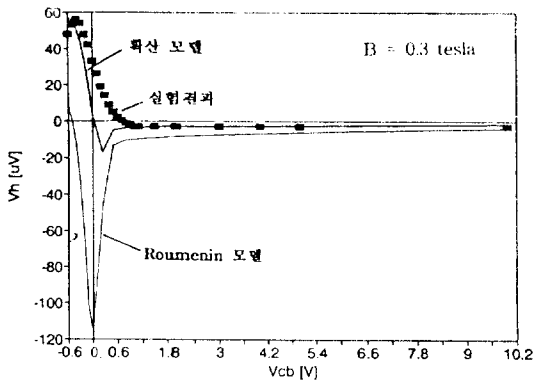


그림 5 기존의 홀 전계 모델 및 확산 모델을 이용하여 계산한 홀 전압과 실험 결과와의 컬렉터-베이스 전압에 따른 비교 ( $I_F=0.5\text{mA}$ )

Fig. 5 Comparison of experimental results with calculated Hall voltages using the conventional model and the diffusion model as a function of the collector-base bias ( $I_F=0.5\text{mA}$ )

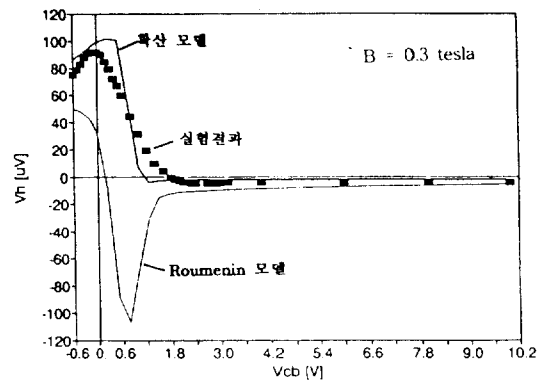


그림 6 기존의 홀 전계 모델 및 확산 모델을 이용하여 계산한 홀 전압과 실험 결과와의 컬렉터-베이스 전압에 따른 비교 ( $I_F=1.0\text{mA}$ )

Fig. 6 Comparison of experimental results with calculated Hall voltages using the conventional model and the diffusion model as a function of the collector-base bias ( $I_F=1.0\text{mA}$ )

### 3.3 계산결과와 실험결과와의 비교

3.2 절에서 계산한 Roumenin의 모델 및 확산을 고려한 모델에 의한 계산결과를 3.1 절에서의 측정결과와 비교하였다.

그림 5, 6, 7에서 알 수 있는 바와 같이 Roumenin의 모델에 의한 계산결과와 실험결과와 매우 다르게 나타남을 알 수 있다. 특히 홀 전압의 방향이 반전되어지는 부분이 측정결과와 크게 달라, 넓은 동작영역에서 홀 전압의 부호를 반대로 계산하고 있음을 알 수 있다. 이에 비해 확산을 고려한 모델에 의한 결과는 홀 전압의 크기 및 부호의 반전을 실제 측정값과 거의 일치하게 계산하고 있음을 보여주고 있다.

홀 전압 부호의 반전은 Roumenin 모델의 경우, 소자가 어느 영역에서 동작하든, 즉 전류 값 자체에 상관 없이  $p\mu_p^2 - n\mu_n^2$ 의 부호에 의해 결정되어진다. 그러나 확산을 고려한 모델의 경우 홀 전압의 부호를 결정짓는 것은 식 (17)에서 알 수 있는 바와 같이, 전자에 의한 전류밀도와 정공에 의한 전류밀도의 크기이며 따라서 순방향 활성영역에서 포화영역으로 바뀌는 부근에서 홀 전압의 부호가 반전되는 측정결과와 일치하게 된다. 또한 홀 전압 크기의 변화도 확산을 고려한 모델에서의 각 전류성분의 크기 변화로 설명할 수 있다. 즉 순방향 활성영역에서 동작할 때

홀 전압 측정용 전극 아랫 부분에서는 정공 전류밀도가 전자 전류밀도보다 크고, 포화영역으로 진입함에 따라 전자 전류밀도가 점차 증가하게 되며, 포화영역에서의 전자 전류밀도가 순방향 활성 영역에서의 정공 전류밀도보다 더 크게 나타나는 시뮬레이션 결과를, 확산을 고려한 모델식에 대입할때 측정결과와 동일한 결과를 예측할 수 있다.

이와 같이 자기트랜지스터의 베이스 내에 유기되는 홀 전계에 대한, 기존의 모델과 확산을 고려한 모델의 측정값에 대한 비교 결과가 상이하게 나타나는 이유는, 기존의 모델이 단순히 홀 소자에서의 홀 전계식을 확장하였기 때문에 캐리어들의 확산에 의한 영향이 고려되지 않았기 때문이다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 자장에 의해 자기트랜지스터의 베이스 내에 유기되는 홀 전계에 대한 해석적 모델을, 확산에 의한 캐리어 운송의 영향을 고려하여 제안하였다. 기존의 모델들은 홀 소자에서의 홀 전계식을 수정 또는 확장한 것이므로 외부에서 인가한 전계에 의한 입자들의 드리프트만이 포함되어 있으나, 제안된 새로운 모델에서는 드리프트뿐 아니라 확산 현상까지 홀 전계식에 포함될 수 있도록 입자의 운동 방정식으로부터 출발하여 홀 전계에 관한 새로운 해석적 모델을 유도하였다.

제안된 해석적 모델의 검증은 위해 제작된 npn 형 자기트랜지스터의 베이스 내에 유기되는 홀 전압을 측정하여, 기존의 모델 및 확산을 고려한 모델에 의한 계산결과와 실험결과를 비교하였다. 기존의 모델에 의한 계산결과는 측정된 홀 전압과 포화영역에서 반대의 부호를 갖는 것으로 나타났으나, 제안된 새로운 모델은 전 영역에서 측정값과 잘 일치하는 것으로 나타나 확산을 고려한 해석적 모델의 타당성을 입증할 수 있었다.

자기트랜지스터 내부에 유기되는 홀 전계에 대한 정확한 식은 소자 내에서 일어나는 실질적인 물리적 현상의 이해, 동작원리의 규명과 소자 구조의 최적화등에 있어서 매우 중요한 의미를 가지며, 본 논문에서 제안한 확산을 고려한 해석적 모델은 실험적으로 검증된 바와 같이 상당히 유용하게 이용되어질 수 있을 것

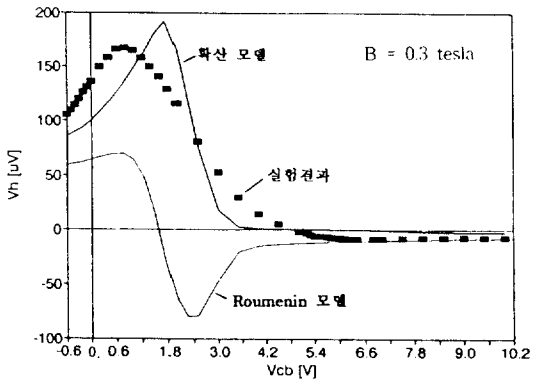


그림 7 기존의 홀 전계 모델 및 확산 모델을 이용하여 계산한 홀 전압과 실험 결과와의 컬렉터-베이스 전압에 따른 비교 ( $I_c = 2.0\text{mA}$ )

Fig. 7 Comparison of experimental results with calculated Hall voltages using the conventional model and the diffusion model as a function of the collector-base bias ( $I_c = 2.0\text{mA}$ )

으로 보인다.

### 참 고 문 헌

- [ 1 ] H. P. Baltes and R. S. Popovic, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensors," Proc. of the IEEE, vol. 74, pp. 1107-1132, 1986.
- [ 2 ] L. Ristic, T. Smy and H. P. Baltes, "A Lateral Magnetotransistor Structure with a Linear Response to the Magnetic Field," IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 36, pp. 1076-1086, 1989.
- [ 3 ] S. K. Lee, K. H. Oh, U. S. Kang and M. K. Han, "A New Magnetic Sensor Using Separated Drift Field," IEEE Trans. on Magnetism, vol. 28, pp. 2193-2195, 1993.
- [ 4 ] A. W. Vinal and N. A. Masnari, "Magnetic Transistor Behavior Explained by Modulation of Emitter Injection, not Carrier Deflection," IEEE Electron Device Letter, vol. 3, pp. 203-205, 1982.
- [ 5 ] V. Zieren, S. Kordic and S. Middelhoek, "Comment on 'Magnetic Transistor Behavior Explained by Modulation of Emitter Injection, not Carrier Deflection'," IEEE Electron Device Letter, vol. 3, pp. 394-395, 1982.
- [ 7 ] A. Nathan, K. Maenaka, W. Allegretto, H. P. Baltes and T. Nakamura, "The Hall Effect in Integrated Magnetotransistors," IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 36, pp. 108-117, 1989.
- [ 8 ] A. W. Vinal and N. A. Masnari, "Operating Principles of Bipolar Transistor Magnetic Sensors," IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 31, pp. 1486-1494, 1984.
- [ 9 ] C. S. Roumenin, "Hall Effect in Diode Structure," Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences, vol. 38, pp. 1501-1504, 1985.
- [ 10 ] A. Nathan and H. P. Baltes, "Rotation of Base Region Hall Field in Magnetotransistors" Sensors and Actuators, vol. A21-A23, pp. 758-761, 1990.
- [ 11 ] R. A. Smith, Semiconductors, Cambridge University Press, 1978, pp. 104-114.
- [ 12 ] H. Pfeleiderer, "Magnetodiode Model," Solid-State Electron., vol. 15, pp. 335-353, 1972.

## 저 자 소 개

### 이승기(李承起)

전기학회 논문지 제43권 5호 참조

### 한민구(韓民九)

전기학회 논문지 제43권 4호 참조

### 강욱성(姜郁成)

1969년 1월 21일생. 1991년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1993년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 군복무중.