

동기회로 모델을 이용한 MAGNETOTRANSISTOR의 특성분석

오 광훈, 이 승기, 강 옥성, 한 민구
서울대학교 전기공학과

ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF THE MAGNETOTRANSISTOR USING THE EQUIVALENT CIRCUIT

◦ Kwang-Hoon Oh, Seung-Ki Lee, Uk-Song Kang, Min-Koo Han
Dept. of Electrical Eng. Seoul National University

ABSTRACT - We constructed the equivalent circuit of the magnetotransistor by the representation of the operating principle as two independent current sources. The equivalent circuit has been analyzed quantitatively and the calculated values agreed to the experimental ones. It has been found out that the structure of MT influences on the relative sensitivity and the structure parameters can be extracted from the equivalent circuit.

1. 서론

Magnetotransistor(MT)는 Si 자기센서의 일종으로 carrier에 작용하는 Lorentz 힘에 의한 전자효과(Galvanomagnetic Effect)를 이용하여 자장을 전기적 신호로 변환시켜주는 소자이다. MT의 가장 일반적인 구조는 BJT(Bipolar Junction Transistor)의 기본구조에 좌, 우 대칭인 double collector가 있는 구조로, 자장인가시 양 collector에 흐르는 전류의 차를 이용하여 자장을 감지할 수있다.

MT에 대한 연구는 1970년대 초부터 시작되었으나 1980년대 이후, 주로 소자의 sensitivity를 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고있다. [1], [2], [3].

그러나, 소자의 동작원리에 대해서는 아직도 정확한 동작원리가는 밝혀지지않고 있으며, 크게 Emitter Injection Modulation과 Carrier Deflection이라는 이론이 양립하고 있다 [4], [5].

Emitter Injection Modulation이란 이론은 1982년 제안된 이론으로[4] MT의 emitter-base junction 부근에서 유기되는 Hall전압이 외부 동기회로에 의한 순방향 전압에 부가적으로 가해지는 bias역할을 하게 되어 junction 전체영역에 불균일한 injection이 일어나게 하고 이에따라 양 collector의 전류차가 생긴다는 이론이다 [6].

Carrier Deflection 이론은 고전적으로 이해되어지던 동작원리로서 자장 존재시 발생하는 LORENTZ 힘에 의하여 전류

path가 휘어지게되고 이 영향으로 인하여 양 collector에 전류차가 나타난다는 이론이다. [1], [5].

지금까지 알려진 바로는 소자의 구조나 동작조건등에 따라 두가지 이론중 어느 하나가 우세하게 작용하는 것으로 인식된다.

본 논문에서는 MT의 두가지 동작원리와 구조를 회로요소로 정량화 하여 자장이 인가된 경우의 MT 소자의 동기회로를 구성하였다. 동기회로에 의한 소자특성의 계산결과를 측정값과 비교하였으며, MT 제작상의 주요 변수들을 추출하기위해 상대적 민감도(relative sensitivity)를 소자구조의 함수로 나타내어 민감도의 변화를 분석하였다.

2. MAGNETOTRANSISTOR의 동기회로의 구성

2.1 소자의 구조

동기회로를 이용하여 해석할 소자의 구조는 가장 일반적인 구조인 그림 1과 같은 vertical-MT이다 [7].

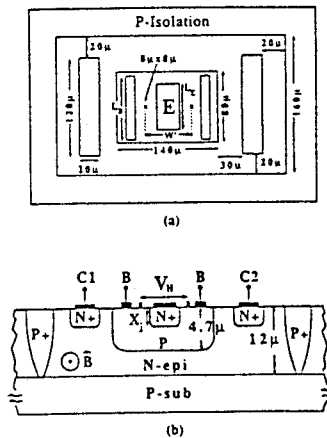


그림 1. Vertical-MT의 구조
a)평면도 b)단면도

소자의 동작원리인 Emitter Injection Modulation과 Carrier Deflection을 독립적인 두개의 전류원으로 회로요소화 하였다.

동작원리를 회로상의 모든 요소로 포함되어 지도록 한다.

2.2 EIM(Emitter Injection Modulation) 회로의 구성

MT에 자장이 인가되면 Hall 효과에 의하여 emitter, base 영역내에 Hall 전압이 유기된다. 유기된 Hall 전압은 E-B junction에 걸리는 순방향 전압을 변화시키게 되는데, carrier 밀도가 낮은 base 영역에서 Hall 계수의 영향으로 인하여 emitter 영역보다 더욱 큰 Hall 전압이 발생하기 때문에 base 영역만을 해석하기로 한다. 소자 내부에서 생성되는 Hall 전압에 의한 collector 전류의 변화를 회로상에 나타내기 위해서는 정확한 Hall 전압의 표현식이 필요하다. Hall 소자에서 일반적인 Hall 전압의 표현식은 다음과 같다 [8].

$$V_H = GR_H IB/t \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$G = 0.742 \frac{1}{w} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$R_H = \frac{(p-b^2n)}{q(\rho\mu_p + n\mu_n)^2} \quad b = \frac{\mu_n}{\mu_p} \quad \dots\dots\dots (3)$$

t: effective thickness
G: geometrical factor

그러나, 위 표현식에서의 Hall 계수 R_H는 carrier의 drift 영향만을 고려한 결과이므로 diffusion 전류가 추가되는 base 영역의 해석에는 적합하지 않고, 위 식에 의한 Hall 전압의 방향은 측정값과는 반대로 나타나게 된다 [7]. 그러므로, diffusion을 고려한 새로운 Hall 계수 R_{Hdiff}[9]를 사용한 새로운 Hall 전압의 표현식을 이용하여 base 영역을 하나의 Hall 소자로 생각하고 EIM회로를 구성한다. R_{Hdiff}의 식은 다음과 같다 [10].

$$R_{Hdiff} = \frac{-\mu_n}{q(\rho\mu_p + n\mu_n)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

EIM 등가회로는 두개의 BJT의 emitter 단자에 자장의 방향을 고려하여 I_{EEIM}만큼의 전류가 더 흐를수 있도록 전류원을 연결한다.

forward active 영역에서 emitter 전류 I_E는

$$I_E \approx qAn_i^2 \left[\frac{D_E}{N_E L_E} + \frac{D_B}{w_B N_B} \right] \exp(qV_{BE}/kT) = K \exp(qV_{BE}/kT) \quad \dots\dots\dots (5)$$

로 나타낼수 있고, 각각의 상수는 minority carrier에 대한 값이다. K는 소자에 의하여 결정되어진다. 식 (5)를 이용하여 base 영역 내에서의 excess minority carrier 밀도를 나타낸 면 식(6)과 같다.

$$\Delta n = n_{B0} \left[\frac{I_E}{K} - 1 \right] \quad \dots\dots\dots (6)$$

식 (4), (5), (6)을 식 (1)에 대입하여 Hall 전압을 나타내면 다음과 같은 식이 된다.

$$V_H = \frac{-G\mu_n B I_E}{q[\mu_p(N_B + n_{B0}(\frac{I_E}{K} - 1)) + \mu_n n_{B0} \frac{I_E}{K}] \cdot t} \quad \dots\dots\dots (7)$$

위 식의 결과에서 보면 Hall 전압 V_H는 전류가 증가하여도 Hall 계수가, carrier 밀도가 증가함에 따라 감소하므로 포화되는 경향을 보이게 된다. 결과적으로, 식(7)의 Hall 전압 V_H에 의하여 z방향의 자장에 대한 emitter injection 전류는 E-B junction의 우측에서는 I_{EEIM}만큼 증가하고 좌측에서는 감소하게 된다. injection 전류의 변화량 I_{EEIM}은

$$I_{EEIM} = 0.5 I_E (\exp(\frac{qV_H}{2kT}) - 1) \quad \dots\dots\dots (8)$$

이 되고 EIM에 의한 collector 전류의 변화 I_{EIM}은 forward active 영역에서

$$I_{EIM} = \alpha_{dc} I_{EEIM} \quad \dots\dots\dots (9)$$

이 된다.

2.3 Deflection 회로의 구성

base영역을 지나 collector epi층에 도달한 전자들은 자장에 의하여 deflection되어 두 collector C₁, C₂에 전류차를 생기게한다. 이때의 두 collector 전류차 ΔI_c 는 2(I_{DEF} - I_{EIM})이고, I_{DEF}는 deflection에 의한 collector전류의 변화량이다. 그림 1의 VMT에서는 EIM에 의한 영향과 deflection에 의한 영향은 반대방향이므로 서로 상쇄되어 전체 전류의 변화는 작게 나타나게 된다. 즉 z방향으로 자장 B를 인가했을때, EIM에 의하여 C₂의 전류가 증가하게되나 collector epi층의 전자들은 C₁쪽으로 deflection되어져 deflection영향에 의한 전류는 C₁쪽으로 더 많이 흐르게 된다.

자장 존재시, deflection에 의한 전류차 I_{DEF}를 계산하기 위하여 그림 2와 같이 전류의 흐름을 가정하였다. 자장이 없을때 전자들은 collector epi층에 수직으로 들어와 두 collector C₁, C₂에 같은 양으로 이동한다. 이때의 epi층내의 x방향과 y방향의 전계는 수평방향과 수직방향의 collector epi층 저항 R_{cL}, R_{cV}를 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$E_x = \frac{R_{cv} \alpha_{dc} I_E}{w_{epi}} = \frac{\rho_{epi} \alpha_{dc} I_E}{l_{E} t} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$E_y = \frac{1}{2} \frac{R_{cL} \alpha_{dc} I_E}{l_{off}} = \frac{1}{2} \frac{k_c \rho_{epi} \alpha_{dc} I_E}{w_{epi} t} \quad \dots\dots\dots (11)$$

여기서 R_{cv} , R_{cl} 은 다음과 같다 [11].

$$R_{cv} = \frac{\rho_{epi} w_{epi}}{l_E \cdot t} \dots \dots \dots (12)$$

$$R_{cl} = \frac{k_c \rho_{epi} l_{eff}}{w_{epi} t} \dots \dots \dots (13)$$

k_c 는 collector contact의 위치에 따라 결정되는 상수이다.

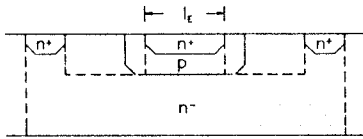


그림 2. Vertical-MT내에서의 전류 path

따라서, 자장이 없을때 전체 전계의 크기 $E(0)$ 는

$$E(0) = \left[1 + \left[\frac{k_c \cdot l_E}{2 \cdot w_{epi}} \right]^2 \right]^{1/2} \cdot E_x \dots \dots \dots (14)$$

이다. 그러나, 자장이 존재할 경우는 deflection에 의하여 $E_y' = -B_{MH} E_x$ 라는 새로운 전계성분이 생기게 되므로 y 방향의 전계는 $E_y' = E_y - B_{MH} E_x$ 가 된다. 결과적으로 deflection에 의하여 흐르는 전류 I_{DEF} 는 자장 존재시의 전체 전계 $E(B)$ 와 $E(0)$ 의 비율에 의하여 결정된다.

$$E(B) = \left[1 + ((E_y/E_x) - B_{MH})^2 \right]^{1/2} \cdot E_x \dots \dots \dots (15)$$

$E(B)$ 는 식 (15)와 같고, I_{DEF} 를 위에서 식 (14)와 (15)로 나타내면,

$$\begin{aligned} I_{DEF} &= \frac{E(0) - E(B)}{E(0)} a_{dc} (0.5I_E + I_{EEIM}) \\ &= \left[1 - \frac{\left[1 + \left(\frac{k_c l_E / 2 w_{epi}}{1 + (k_c l_E / 2 w_{epi})^2} - B_{MH} \right)^2 \right]^{1/2}}{1 + (k_c l_E / 2 w_{epi})^2} \right] a_{dc} (0.5I_E + I_{EEIM}) \\ &= [1 - F] a_{dc} (0.5I_E + I_{EEIM}) \dots \dots \dots (16) \end{aligned}$$

과 같이된다. 위의 식에서보면 E_y/E_x 가 증가할수록 deflection의 영향이 감소함을 알수있다. 유도된 식을 이용하여 deflection에 의한 효과를 회로상에 나타내기 위하여 두개의 BJT의 collector 단자에 전류원을 연결하였다. 전류원의 방향은 deflection에 의하여 전류가 증가되는 collector 방향이 되므로 자장의 방향에 따라 결정된다.

3. 결과 및 고찰

MT의 동작원리를 정량화하여 구성한 등가회로는 그림 3과 같다.

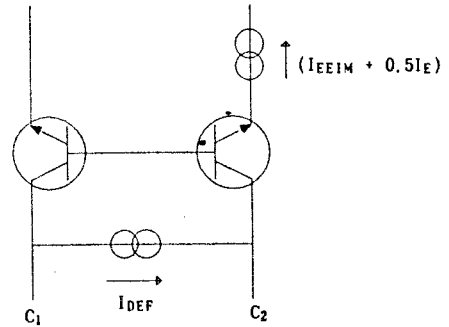


그림 3. 동작원리를 정량화하여 구성한 MT의 등가회로

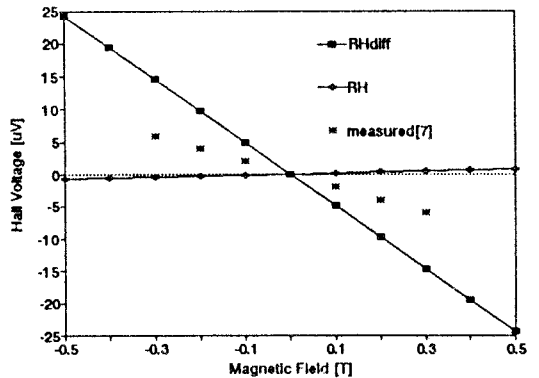


그림 4. 자장의 변화에 대한 base 영역내의 Hall 전압의 변화

그림 4에서 $I_E = -1mA$, $V_{CB} = 5V$ 일때 자장의 변화에 따라 base 영역내에 유기되는 Hall 전압을 계산하여 측정값과 비교하였다. diffusion을 고려하지 않은 Hall 계수 R_H 에 의한 Hall 전압은 크기와 방향이 측정값과 큰 차이가 있으나 R_{Hdiff} 에 의한 Hall 전압은 측정값과 방향이 일치하고 크기도 contact의 영향을 고려할때 잘 일치함을 알 수 있다.

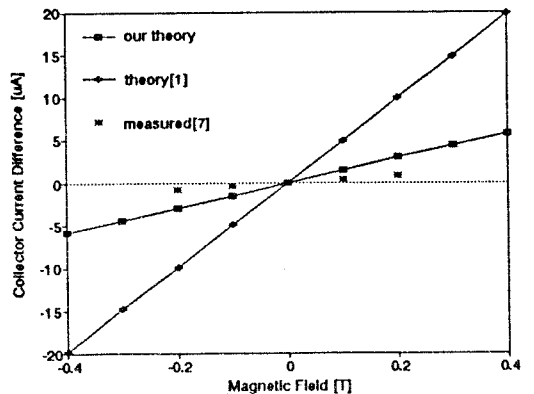


그림 5. 자장의 변화에 대한 collector 전류의 차

그림 5에서 등가회로를 이용하여 계산한 자장에 대한 collector 전류의 차를 측정값과 비교하였다. 동작조건은 그림 4의 경우와 같고, 등가회로에 의한 collector 전류차는 자

장이 $-0.2T \sim 0.2T$ 의 범위에서 측정값과 0.2% 오차범위 내에서 잘 일치하여 등가회로 모델이 매우 정확함을 알 수 있다.

MT의 상대적 민감도(relative sensitivity)를 2장의 결과식을 이용하여 표시하면

$$S_r = \frac{I_c}{\Delta I_c} \frac{1}{B} = [1 - F \cdot \exp(\frac{qV_H}{2kT})] \dots \dots \dots (19)$$

와 같고, 이 식을 이용하여 소자의 구조에 대한 상대적 민감도의 변화를 알아보기 위해, 위와같은 동작조건에서 자장이 1T일때 emitter 폭(I_E)과 epi층의 두께의 변화에 대한 상대적 민감도의 변화를 분석하였다.

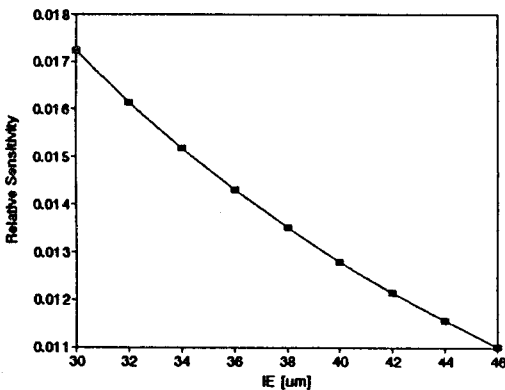


그림 6. emitter 폭(I_E)의 변화에 대한 민감도의 변화

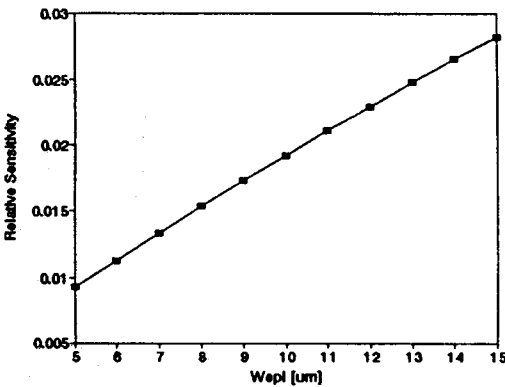


그림 7. epi층 두께의 변화에 대한 민감도의 변화

그림 6, 7에서 보면 상대적 민감도는 emitter 폭을 작게 하고 epi층의 두께를 증가시킬수록 증가함을 알 수 있다.

4. 결론

Magnetotransistor의 동작원리를 정량화하여 자장 인가 시의 MT소자의 등가회로를 구성하였다. 등가회로에 의한 계산 결과는 소자의 실제 측정값과 일치하는 결과를 보였으며, 등가회로의 해석을 통해 소자의 동작원리에 대한 해석이 가능하였다. MT소자의 두가지 동작원리를 모두 고려하여 구성된 등가회로는 앞으로 MT소자의 특성을 이해하는데 큰 도움이 될 것으로 보이며, 향후 과제로는 다양한 구조의 MT에 대하여 동작원리를 정량화하여 등가회로 구성에 적용시켜야 할 것이다.

참고문헌

- [1] V.Zieren and B.P.M.Duyndam, "Magnetic-Field-Sensitive Multicollector n-p-n Transistors", IEEE T-ED, Vol.29, pp.83-90, 1982.
- [2] R.S.Popovic and R.Widmer, "Magnetotransistor in CMOS Technology", IEEE T-ED, Vol.33, pp.1334-1340, 1986.
- [3] L.Ristic, T.Smy and H.P.Baltes, "A Lateral Magnetotransistor Structure with a Linear Response to the Magnetic Field", IEEE T-ED, Vol.36, pp.1076-1086, 1989.
- [4] A.W.Vinal and N.A.Masnari, "Magnetic Transistor Behavior Explained by Modulation of Emitter Injection, not Carrier Deflection", IEEE EDL, 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 EDL, Vol.3, pp.396-397, 1982.
- [6] A.W.Vinal and N.A.Masnari, "Operating Principles of Bipolar Transistor Magnetic Sensors", IEEE T-ED, Vol.31, pp.1486-1494, 1984.
- [7] A.Nathan, K.Maenaka, W.Allegreto, H.P.Baltes and T.Nakamura, "The Hall Effect in Integrated Magnetotransistors", IEEE T-ED, Vol.36, pp.108-117, 1989.
- [8] W.Göpel, J.Hesse, J.N.Zemel (Ed.), Magnetic Sensors, VCH, 1989.
- [9] S.K.Lee, K.H.Oh, J.K.Rhee, K.J.Jhun and M.K.Han, "A Novel Magnetotransistor Based on the Drift Current in the Emitter", The 6th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, San Francisco, USA, 1991.
- [10] 이 승기, 강 옥성, 오 광훈, 전 국진, 한 민구, "Diffusion Current Effect on the Hall Coefficient in a Magnetic Field Sensor", 전기학회 하계 학술대회 논문집, pp.187-190, 1991.
- [11] D.J.Roulston, Bipolar Semiconductor Devices, McGraw-Hill Publishing Company, 1990.