

하이브리드형스핀밸브에서의스핀의존산란에대한이론적분석
(SpinPolarizedTransportinaHybridSpinValve)

노은선*, 이혁모
카이스트 신소재공학과

1. 서론

하이브리드형 스핀밸브는 자성층과 비자성층 간의 계면에서 나타나는 스핀의존산란을 이용하여 자성층과 비자성층을 교대로 많이 쌓아서 계면의 개수를 많게 하고 그로 인해 이 초격자를 통해 흐르는 전류의 스핀의존산란량을 크게 하여서 높은 자기저항을 얻는 구조로 알려져 있다. 하이브리드형 스핀밸브는 스핀의존산란이 층의 내부에서보다는 층간의 계면에서 절대적으로 나타난다는 것을 잘 보여주는 소자이며, 본 발표에서는 하이브리드형 스핀밸브에서 계면을 경계조건으로 하는 Transfer Matrix Method에 의해 계산된 스핀분극이동을 하는 전류를 형성하는 전자들 각각의 투과계수를 보여줌으로써 계면에서의 스핀의존산란을 보다 구체적으로 이해하고자 한다. 또한 하이브리드형 스핀밸브에서 나타나는 스핀분극량과 자기저항을 계산하여 문헌에서 보고된 결과와 비교함으로써 계산결과의 신뢰도를 평가하였다.

2. 계산방법

하이브리드형 스핀밸브에서 스핀분극이동을 하는 개개의 전자들의 투과계수를 계산하기 위해 Transfer Matrix Method를 아래와 같이 사용하였으며 경계조건은 자성층과 비자성층 간의 계면마다 적용시켰다. 또한 전자의 파동함수는 평면파라고 가정하였다.

$$\begin{pmatrix} A^{+,+} \\ A^{+,-} \end{pmatrix} = \prod_{i=1}^{N-1} T(i, i+1) \begin{pmatrix} A^{N,+} \\ A^{N,-} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11}(1, N) & T_{12}(1, N) \\ T_{21}(1, N) & T_{22}(1, N) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A^{N,+} \\ A^{N,-} \end{pmatrix}, \quad T = \frac{k_N}{k_1} \times \frac{1}{(T_{11}(1, N))^2}$$

when $\Psi_N = A^{N,+} \times e^{ik_N x} + A^{N,-} \times e^{-ik_N x}$, T : 투과계수

파동벡터 k_N 을 계산하기 위해 Single Electron Hamiltonian을 아래와 같이 사용하였으며 Spin Space에서 슈뢰딩거 파동방정식의 Eigenvalue는 2개가 나타난다.

$$H = \frac{(i\hbar\nabla_x + eA_x)^2}{2m^*} + U(x) + V(y) + V(z) + \epsilon_c + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & ml \end{pmatrix}$$

하이브리드형 스핀밸브에서 나타나는 스핀분극이동은 Cross Sectional Area가 작다면 Quantum Transport라고 할 수 있으며 이에 따라 Landauer Formula에 의해 아래와 같이 Conductance를 계산하였다. 또한 스핀분극량과 자기저항은 Circuit Theory에 따라 아래와 같이 결정하였다.

$$G^{\uparrow\uparrow} = \frac{e^2}{h} \sum_{nm} |r_{\uparrow\uparrow}^{nm}|, \quad G^{\uparrow\downarrow} = \frac{e^2}{h} \sum_{nm} |r_{\uparrow\downarrow}^{nm}|, \quad G^{\downarrow\uparrow} = \frac{e^2}{h} \sum_{nm} |r_{\downarrow\uparrow}^{nm}|, \quad G^{\downarrow\downarrow} = \frac{e^2}{h} \sum_{nm} |r_{\downarrow\downarrow}^{nm}|$$

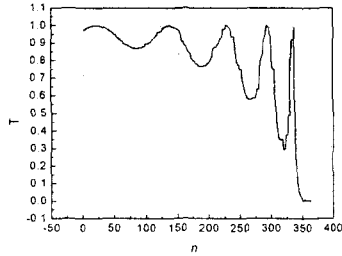
$$G^\uparrow = G^{\uparrow\uparrow} \times e^{\frac{\lambda}{\lambda_w}} + G^{\uparrow\downarrow} \times \left(1 - e^{\frac{\lambda}{\lambda_w}}\right), \quad G^\downarrow = G^{\downarrow\downarrow} \times e^{\frac{\lambda}{\lambda_w}} + G^{\downarrow\uparrow} \times \left(1 - e^{\frac{\lambda}{\lambda_w}}\right), \quad G^{\uparrow\&\downarrow} = G^{\uparrow\downarrow} + G^{\downarrow\uparrow}$$

$$\frac{e^2}{h} R(\theta) = \frac{2}{g} \frac{\left\{ \tan^2 \frac{\theta}{2} + \eta \right\}}{\left\{ (1 - p^2) \tan^2 \frac{\theta}{2} + \eta \right\}}, \quad g = G^\uparrow + G^\downarrow, \quad p = \frac{G^\uparrow - G^\downarrow}{G^\uparrow + G^\downarrow}, \quad \eta = \frac{2G^{\uparrow\&\downarrow}}{G^\uparrow + G^\downarrow}$$

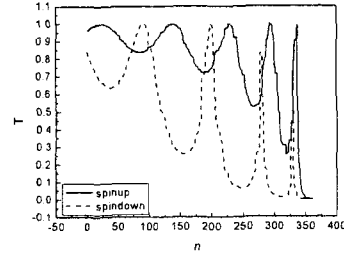
비록 급속으로 이루어진 하이브리드형 스핀밸브에서의 Spin Flip Length는 길어서 무시해도 되겠지만 본 발표에서는 문헌에서 보고된 Spin Flip Length 이외에도 임의로 Spin Flip Length를 설정하여

Spin Flip Length가 스핀분극량과 자기저항에 미치는 영향까지도 알아보고자 하였다. 또한 위의 설명에 근거하여 계산코드를 발표자가 직접 제작하였다.

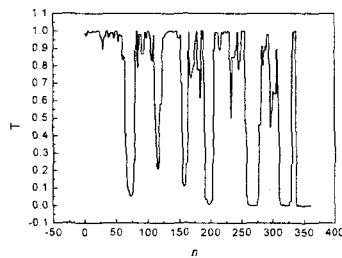
3. 계산결과 및 고찰



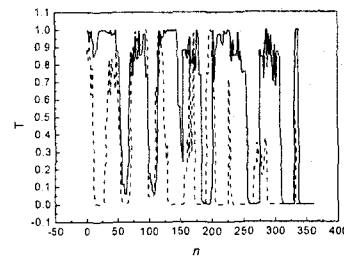
(a) $N=1$, non-magnetic



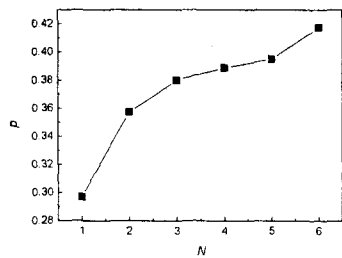
(b) $N=1$, magnetic



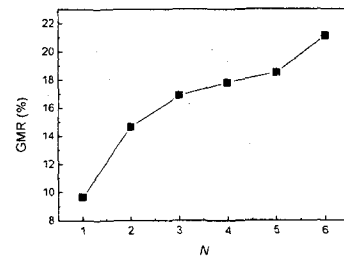
(c) $N=6$, non-magnetic



(d) $N=6$, magnetic



(e) Spin Polarization



(f) Giant Magnetoresistance

계산대상은 $[\text{Fe } 30\text{\AA}/\text{Cu } 10\text{\AA}/\text{Fe } 30\text{\AA}]_N$ 하이브리드형 스핀밸브이고 Cross Sectional Area는 $50\text{\AA} \times 50\text{\AA}$ 로 설정하였고 N 은 1~6의 범위에서 계산을 시행하였다. Cross Sectional Area와 N 이 실험조건보다 작은 이유는 계산한계 때문이었다. 그림(a)와 (c)는 Fe를 비자성체라고 가정하고 투과계수를 계산한 결과이며 이것은 계면이 산란을 일으키는지 확인하기 위함이었다. $N=1$ 일때보다 $N=6$ 일때 전자모드에 따른 투과계수의 oscillations이 심하게 나타나고 dips이 크다는 것을 볼 수 있으며 이것은 계면의 개수가 많을수록 전자의 산란량이 많아진다는 것을 뜻한다. 그림(b)와 (d)는 하이브리드 스핀밸브에서 나타나는 전자스핀에 따른 투과계수이며 spinup보다 spindown이 투과계수의 oscillations과 dips이 크다는 것을 알 수 있고 이것은 계면에서 스핀의존산란이 나타난다는 것을 보여주며 이로 인해 N 이 많을수록 그림(e)와 (f)에서 보듯이 스핀분극량과 자기저항이 커지는 것이다.

4. 참고문헌

- [1] A. Brataas, Y. V. Nazarov and G. E. W. Bauer, Eur. Phys. J. B 22, 99 (2001)
- [2] *Low Dimensional Semiconductors Materials, Physics, Technology and Devices*, M. J. Kelly