

유효질량 모델을 사용한 자기터널접합에서의 터널링 자기저항의 계산

최창식*, 이병찬
인하대학교 물리학과

1. 서론

자기터널접합은 두 자성층(FM) 전극이 얇은 부도체층(I)으로 분리된 형태로, 아주 큰 터널링 자기저항을 보여서 큰 관심을 받고 있다. 자기터널접합에 결정 구조를 가지는 비자성 금속층(NM)을 삽입하면, 금속층 두께에 따라 터널링 자기저항이 진동하면서 감소하는 것이 실험을 통하여 관측되었다[1]. 본 연구에서는 그림 1과 같은 FM/I/NM/FM 구조로 이루어진 자기터널접합(MTJ)의 터널링 자기저항(TMR)을 유효질량 모델을 이용하여 이론적으로 계산하였다. 그리고 이 결과를 계면에서의 반사계수를 이용하여 나타낸 간단한 모델 계산과 비교하였다[2].

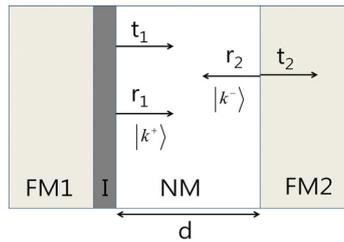


그림 1. MTJ의 역학 구조.

2. 계산방법

본 연구에서는 비자성 금속이 삽입된 형태의 MTJ에 대하여 TMR을 이론적으로 계산하였다. 자유전자 모델을 확장한 유효질량 모델을 이용하여 각 물질의 전자구조를 기술하였으며, 각 물질의 도식적인 에너지 밴드는 그림 2와 같다. NM층 에너지 밴드의 바닥 에너지를 0으로 잡았으며, NM의 유효질량을 전자의 질량 m_0 으로 놓았다. 편의상 부도체층과 FM층의 다수스핀에 대해서도 유효질량을 m_0 으로 같게 하고, FM층의 소수스핀에 대한 유효질량은 m_\downarrow 으로 놓았다. FM층의 다수스핀에 대한 에너지 밴드를 NM의 밴드와 일치시키고, FM층 소수스핀에 대한 밴드의 바닥 에너지를 Δ , I층의 바닥에너지를 V_I 로 표시하였다. 각각의 계면에서, 파동함수 파수벡터의 계면과 평행한 성분(k_\parallel)이 보존된다고 가정하였다. 페르미 에너지를 E_F 라 할 때에 주어진 m_\downarrow 에 대해서, $m_\downarrow = m_0 E_F / (E_F - \Delta)$ 로부터 Δ 를 정하였다. 이 관계식은 NM층과 FM층의 계면에서, 소수스핀의 전자가 임의의 k_\parallel 에 대해서 이동이 가능하도록 한다. 파동함수의 경계조건으로 계면에서 전자의 전류밀도가 보존되도록 하였다. 페르미 에너지는 $E_F = 4eV$, 부도체의 바닥에너지는 $V_I = 6eV$ 를 사용하였다. 전기전도도(G)는 Landauer-Buttiker 공식을 사용하여 계산하였다[3]. 한편, 이 계산 결과는 계면에서의 반사계수를 이용한 다음과 같은 간단한 모델과 비교하였다.

$$\Delta G = \text{Im} \frac{e^2 k_F}{h \pi} (T_{0\downarrow} - T_{0\uparrow}) \frac{r_{2\uparrow} - r_{2\downarrow}}{2} \frac{\exp(2k_F d + \phi)}{d}$$

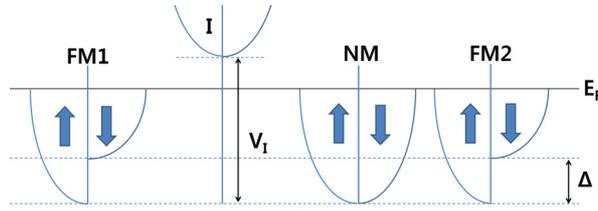


그림 2. MTJ를 구성하는 각 물질의 전자구조.

여기서 ΔG 는 $\Delta G = G_P - G_{AP}$, k_F 는 페르미 파수벡터, $T_{0\uparrow(\downarrow)}$ 는 다수(소수)스핀에 대한 FM/I/NM에서의 투과계수, $r_{2\uparrow(\downarrow)}$ 는 그림 1에서와 같이 다수(소수)스핀에 대한 NM/FM 계면에서의 반사계수, ϕ 는 r_1 에서 나오는 위상, d 는 NM층의 두께이다.

3. 결과

FM/I/NM/FM 구조로 이루어진 MTJ에서 ΔG 와 TMR을 유효질량 모델을 이용하여 이론적으로 계산한 결과 NM의 두께(d)가 증가함에 따라 일정한 주기를 가지고 진동하고, 또한 감소하는 모습을 보였다. 무엇보다도 TMR은 0을 중심으로 하여 진동하였는데, 이것은 전자의 산란이 TMR이 0을 중심으로 진동하기 위한 필요조건이 아님을 알 수 있었다. 간단한 모델은 계산 결과를 비교적 잘 설명하였으며, d 가 증가할수록 두 계산 결과가 더 잘 일치하였다. 근사적인 식의 경우 진폭이 $1/d$ 로 감소하고, 진동수는 π/k_F 로 주어진다. d 가 작을 때에는 두 계산 결과가 진폭에서 차이를 보이는데 이는 근사적인 계산과정에서 반사계수의 고차 항을 무시하였기 때문에 생기는 오차로 보인다.

4. 결론

FM/I/NM/FM 구조로 이루어진 MTJ의 TMR을 유효질량 모델을 이용하여 이론적으로 계산한 결과, TMR이 0을 중심으로 진동하면서 감소한다. 계산 결과를 계면에서의 반사계수를 이용한 모델계산과 비교해 보면 d 가 증가함에 따라 TMR이 $1/d$ 에 비례하고, π/k_F 의 진동수로 진동한다.

5. 참고문헌

- [1] S. Yuasa, T. Nagahama and Y. Suzuki, Science 297, 234-237 (2002)
- [2] B. C. Lee, J. Appl. Phys. 107, 09C708 (2010)
- [3] M. Büttiker, Y. Imry, R. Landauer, S. Pinhas, Phys. Rev. B 31, 6207-6215 (1985)