

계면거칠기가 거대자기저항에 미치는 영향: 이론적 고찰

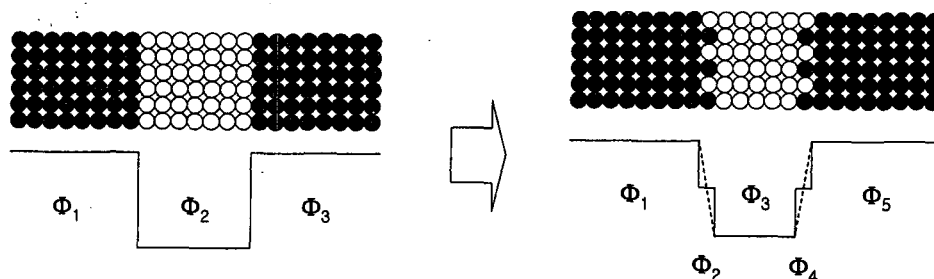
노은선*, 이혁모
카이스트 신소재공학과

1. 서론

자성층과 비자성층 간의 계면에서 원자섞임 등으로 인해 나타나는 계면거칠기는 자기저항을 감소시키는 요인으로 알려져 있다. 그에 따라 박막증착속도를 제어하는 등 여러 가지 실험적 변수들을 최적화함으로써 계면거칠기를 최소화하려는 노력이 많이 있었다. 본 발표에서는 계면거칠기가 원자층 단위로 증가함에 따라 [자성층/비자성층/자성층/비자성층] 이라는 간단한 구조의 스핀밸브에서 나타나는 거대자기저항이 어떻게 달라지는지를 유한요소법으로 계산함으로써, 계면거칠기가 자기저항을 감소시키는 물리적인 해석을 제시한다.

2. 계산방법

아래 그림은 화학반응이 없다는 가정 하에서 계면거칠기가 전혀 없을 때와 원자한층 일 때 나타나는 Kronig-Penny potential profile 이다. 계면거칠기가 많을수록 potential steps 개수가 많아지며 이로 인해 거대자기저항이 영향을 받는다. Landauer conductance formula 에 의하면 스핀밸브 전체를 통해 스핀분극이동을 하는 전자들의 투과계수가 거대자기저항에 지대한 영향을 미치는데, 투과계수를 계산하기 위해 transfer matrix method 를 아래 식과 같이 사용하였으며, 계면거칠기가 많을수록 정의되는 transfer matrix 가 많아지므로 결국 계면거칠기가 거대자기저항에 있어 중요해지는 것이다.



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

계면거칠기는 potential profile 에 대한 영향 뿐 아니라 spin-flip 을 일으키는 요인이 된다. 계면거칠기가 전혀 없는 탄동 (ballistic) 이동에서는 spin-flip probability 가 아래 식과 같이 스핀밸브의 길이와 spin-flip length 간의 상관관계에 의해 결정되며, 일반적으로 spin-flip length 가 스핀밸브의 길이에 비해 워낙 길기 때문에 spin-flip 이 거의 일어나지 않는다고 본다. 그러나 계면거칠기가 클 경우 spin-flip probability 가 크므로, 아래 spin conductance 에 대한 식에서 보다시피 spin-flip process 는 자기저항에 있어 상당히 중요해진다. 본 발표에서는 계면거칠기가 원자층 단위로 증가함에 따라 spin-flip probability 가 아래 식에서 원자층 개수 (n) 를 곱함으로써 정해진다는 가정 하에서, 계면거칠기가 0 - 6 층 (MLs) 일 때 스핀분극량 및 거대자기저항을 유한요소법으로 계산하였다.

$$p_{sf} = 1.0 - e^{-\frac{l}{\lambda}} \quad \Rightarrow \quad p_{sf} = (1.0 - e^{-\frac{l}{\lambda}}) \times (n+1)$$

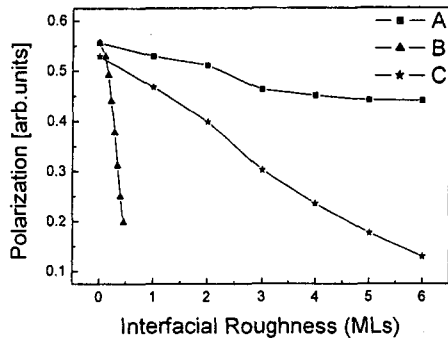
$$G^{\uparrow\uparrow} = \frac{e^2}{h} \sum_{nm} \{ T_{\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow}^{nm} \times (1.0 - p_{sf})^3 + T_{\uparrow\uparrow\uparrow\downarrow}^{nm} \times (1.0 - p_{sf}) \times p_{sf}^2 + T_{\uparrow\uparrow\downarrow\uparrow}^{nm} \times (1.0 - p_{sf}) \times p_{sf}^2 + T_{\uparrow\uparrow\downarrow\downarrow}^{nm} \times (1.0 - p_{sf}) \times p_{sf}^2 \}$$

$$G^{\downarrow\downarrow} = \frac{e^2}{h} \sum_{nm} \{ T_{\downarrow\downarrow\downarrow\downarrow}^{nm} \times (1.0 - p_{sf})^3 + T_{\downarrow\downarrow\downarrow\uparrow}^{nm} \times (1.0 - p_{sf}) \times p_{sf}^2 + T_{\downarrow\downarrow\uparrow\downarrow}^{nm} \times (1.0 - p_{sf}) \times p_{sf}^2 + T_{\downarrow\downarrow\uparrow\uparrow}^{nm} \times (1.0 - p_{sf}) \times p_{sf}^2 \}$$

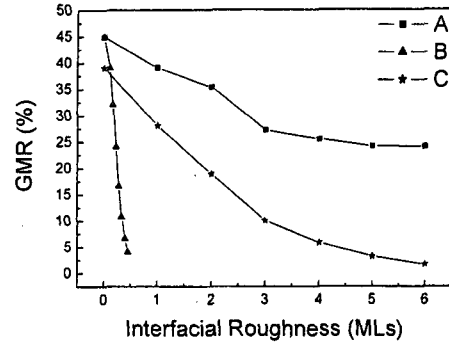
$$G^{\uparrow\downarrow} = \frac{e^2}{h} \sum_{nm} \{ T_{\uparrow\uparrow\uparrow\downarrow}^{nm} \times (1.0 - p_{sf})^2 \times p_{sf} + T_{\uparrow\uparrow\downarrow\downarrow}^{nm} \times (1.0 - p_{sf})^2 \times p_{sf} + T_{\uparrow\downarrow\downarrow\downarrow}^{nm} \times (1.0 - p_{sf})^2 \times p_{sf} + T_{\uparrow\downarrow\downarrow\uparrow}^{nm} \times p_{sf}^3 \}$$

$$G^{\downarrow\uparrow} = \frac{e^2}{h} \sum_{nm} \{ T_{\downarrow\downarrow\downarrow\uparrow}^{nm} \times (1.0 - p_{sf})^2 \times p_{sf} + T_{\downarrow\downarrow\uparrow\uparrow}^{nm} \times (1.0 - p_{sf})^2 \times p_{sf} + T_{\downarrow\uparrow\uparrow\uparrow}^{nm} \times (1.0 - p_{sf})^2 \times p_{sf} + T_{\downarrow\uparrow\uparrow\downarrow}^{nm} \times p_{sf}^3 \}$$

3. 계산결과 및 고찰



(a)



(b)

계산대상은 [자성33층/비자성17층/자성33층/비자성17층] 스핀밸브이고 Cross Sectional Area 는 14 층 × 14층 으로 설정하였다. 위 그림에서 A 는 계면거칠기에 따라 오로지 potential profile 만이 바뀔 때의 계산결과이고, B 는 오로지 spin-flip probability 만이 바뀔 때의 계산결과이며, C 는 A 와 B 가 동시에 일어날 때의 계산결과이다. A, B, C 모두 계면거칠기가 증가함에 따라 스핀분극량과 거대 자기저항이 감소하는 것을 볼 수 있고, 따라서 계면거칠기가 자기저항을 감소시키는 이유로 potential profile 과 spin-flip probability 의 변화를 들 수 있겠다. A 의 경우, 계면거칠기가 전혀 없을 때와 조금이라도 있을 때의 스핀분극량과 거대자기저항의 차이는 상대적으로 크지만, 계면거칠기가 커짐에 따라 그 차이는 미미한 것으로 나타났다. B 의 경우, 계면거칠기가 많을수록 스핀분극량과 거대자기저항이 비례적으로 감소하였다. C 의 경우, 3 층을 기준으로 그보다 계면거칠기가 작을 때는 거대자기저항의 감소가 크지만 그보다 클 때는 그다지 영향이 없었으며, 따라서 계면거칠기를 완전히 없앤다면 매우 큰 거대자기저항을 얻어낼 수 있을 것으로 기대된다.

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
- [3] J. Bass, Q. Yang, S. F. Lee, P. Holody, R. Loloee, et al., J. Appl. Phys. 75, 6699 (1994)