

Permalloy/Al₂O₃/Co 접합의 자기터널 효과*

이민숙·송현주·장현숙·김미양·이장로

숙명여자대학교 물리학과 서울 140-742

이용호

전북대학교 물리학과 전주 560-756

(1993년 1월 27일 받음, 1993년 3월 11일 최종 수정본 받음)

1×10^{-6} Torr의 진공에서 열저항 가열식 진공증착 방법으로 제작한 permalloy/Al₂O₃/Co 강자성 터널접합의 자기저항 효과를 조사하였다. 이 논문에서는 제작한 강자성 터널접합 시료의 전류-전압 특성과 자기 valve 효과를 측정하고, 시료진동형자기계로 측정된 자기이력곡선을 통하여 터널저항의 히스테리시스성 자장 의존성을 조사하였다. 터널링은 전류-전압 특성을 측정함으로써 확인 되어진다. 자기저항의 히스테리시스 곡선은 자화의 히스테리시스 곡선과 잘 대응한다. 측정된 자기저항비 $\Delta R/R$ 은 실온에서 약 0.6 % 였다.

I. 서 론

걸어준 자장에 따라 전기 저항이 변화하는 자기 저항 효과의 현상에 속하는 자기 터널 효과[1]는 얇은 절연층의 양측에 자성층을 끼우고 막면에 수직인 방향의 저항 변화를 보는 것이다. 이러한 강자성 금속의 두 전극 사이에 얇은 비자성의 절연층을 끼운 구조를 갖는 강자성 터널 접합의 특징은 tunnel conductance가 두 전극의 자화를 형성하는 각도에 의존해서 변화한다는 것이다. 이러한 자기 valve 효과에 관한 최초의 실험 보고는 1975년 Julliere [2]에 의한 Fe/Ge/Co 접합에 대한 것이었다. 또한 1982년 Gäfvert[3]등은 Ni/NiO/(Ni, Co, Fe)에 관한 보고에서 강자성체 금속에 있어서는 전도 전자가 스핀 편극을 일으키고 있기 때문에 페르미 면에 있어서 상방향 스핀과 하방향의 스핀의 전자의 상태 밀도가 달라 있고, 이러한 강자성 금속을 사용해서 강자성 터널 접합을 만들면 강자성 터널 접합의 전도 전자는 그 스핀을 가진 채로 터널하기 때문에, 양 자성층의 자화 상태에 의해서 터널 확률이 변화하고, 그것이 tunnel conductance (터널 저항)의 변화로 되어 나타난다고 하였다. 이들은 실제로 절연 장벽으

로 Ni 박막의 표면을 산화시킨 NiO를 사용하여 접합을 만들고, 저온에서 터널 저항의 변화를 관측했다. 이러한 터널 저항의 변화는 모두 저온에서 조사한 것이었지만, 최근에는 실온에 있어서도 스핀 편극 터널 효과가 관측되었다.

한편 이러한 실험에 대해서 1989년 Slonczewski[4]는 전도 전자의 자유 전자 모델을 사용해서, 강자성 터널 접합에서 tunnel conductance는 양 전극의 자화를 일으키는 각의 여현에 비례해서 변화하는 것을 이론적으로 제시하였다. 근래에 와서 금속 인공격자의 거대 자기저항효과 (Giant magnetoresistance effect)가 많은 주목의 대상이 되고 있지만[5], 자기 valve 효과 역시 그 효과와 유사한 점을 가져서 관심사가 되고 있다.

본 연구에서는 유리 기판에 열 저항가열식 진공증착방법으로 제작한 Permalloy/Al₂O₃/Co 터널 접합 박막의 전류-전압 특성과 자기 valve 효과를 측정하고 시료 진동형 자기계로 측정된 자기 이력 곡선을 이용하여 스핀 분극 터널 효과에 기인하는 자기 저항 효과와 자화 곡선과를 대응시켜 보았다.

II. 이 론

Sterns[6]의 이론에 의하면 철족 금속의 전극에 출입하는 터널 전자는 전도 전자이며, 이것은 자화를 주로 담당하

*본 연구는 1992년도 교육부 3차 5개년 기초과학 특성화 연구비 (BSRI 92-213)의 지원에 의한 것임.

는 3d 전자와의 상호 작용에 의해 스핀 분극하고 있다. 이렇게 스핀 분극한 전도 전자가 강자성 금속 사이에서 터널하는 현상을 생각해 보기로 한다.

Gäfvert[3]등은 두 강자성 전극 A, C 사이를 전자가 선택적으로 터널하는 것으로서, 양 전극의 자화가 평행일 때와 반평행일 때의 tunnel conductance 즉 $G_{\uparrow\uparrow}$ 과 $G_{\uparrow\downarrow}$ 에 대한 tunnel conductance의 변화율은

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{2(G_{\uparrow\uparrow} - G_{\uparrow\downarrow})}{(G_{\uparrow\uparrow} + G_{\uparrow\downarrow})} = 2P_A P_C \quad (1)$$

로 나타내었다. 여기에서 P_A, P_C 는 터널링 상태 밀도의 분극이며 전이 금속에서 이 값은 Tedrow와 Meservey [7]에 의해서 얻어졌다.

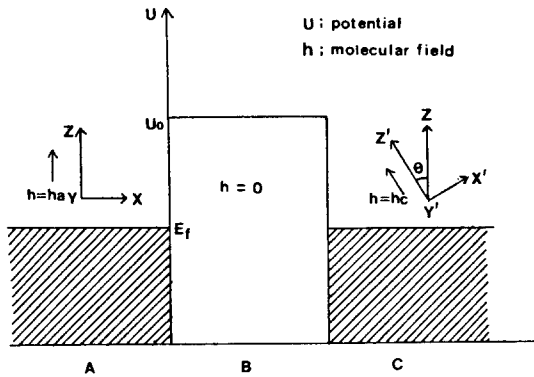


Fig. 1. Schematic potential for two metallic ferromagnets separated by an insulating barrier.

두 전극의 자화를 일으키는 각이 임의로 변화할 때 tunnel conductance는 두 강자성체의 모멘트 사이의 각에 의존한다는 Julliere[2]의 자기 valve 효과를 Slonczewski[4]는 전도 전자의 자유 전자 모델을 사용하여 Fig. 1에서와 같이 반무한의 전극 A, C가 절연층 B를 사이에 낀 일차원 구형 포텐셜 장벽 모델 (rectangular potential barrier)로써 스핀을 고려한 터널 현상을 고찰하였다.

Schrödinger 방정식의 해인 전자의 파동 함수는 Fig. 1에서 A와 B, B와 C의 경계면에 있어서 파동 함수와 그 gradient를 결합시킴으로써 구할 수 있다. 또한 전극 A와 다른 내부 자장 내에 즉 다른 좌표계 내에 전자의 파동 함수의 일부분을 두게 되므로 그 때 전자의 파동함수는 다음의 spinor 변환을 필요로 한다.

$$\begin{aligned} \psi_{\uparrow B} &= \psi_{\uparrow C} \cos(\theta/2) + \psi_{\downarrow C} \sin(\theta/2) \\ \psi_{\downarrow B} &= -\psi_{\uparrow C} \sin(\theta/2) + \psi_{\downarrow C} \cos(\theta/2) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\psi_{\uparrow B}, \psi_{\downarrow B}$ 와 $\psi_{\uparrow C}, \psi_{\downarrow C}$ 는 각각 절연층 B와 전극 C의 스핀 up과 down 상태에서의 파동 함수이다. 이러한 스핀을 고려한 파동 함수를 이용하여 전자의 투과율을 구하고, 이로부터 다음과 같이 tunnel conductance를 구할 수 있다.

$$G = G_0 (1 + P_A P_C \cos\theta) \quad (3)$$

$$P_A = \frac{(k_{\uparrow A} - k_{\downarrow A})}{(k_{\uparrow A} + k_{\downarrow A})} \cdot \frac{(\kappa^2 - k_{\uparrow A} k_{\downarrow A})}{(\kappa^2 + k_{\uparrow A} k_{\downarrow A})}$$

$$P_C = \frac{(k_{\uparrow C} - k_{\downarrow C})}{(k_{\uparrow C} + k_{\downarrow C})} \cdot \frac{(\kappa^2 - k_{\uparrow C} k_{\downarrow C})}{(\kappa^2 + k_{\uparrow C} k_{\downarrow C})}$$

이 식에서 G_0 는 zero 자장에서의 conductance 이며, $k_{\uparrow}, k_{\downarrow}$ 는 강자성체 내부에서 스핀 up, down일때의 전자 운동량 이며, κ 는 장벽 안에서의 전자 운동량이다. 여기에서 주목해야 할 것은 tunnel conductance가 양 전극의 자화를 일으키는 각 θ 의 여현에 비례해서 변화하는 것이다.

III. 시료의 제작 및 실험 방법

알루미늄이나 피복된 나선형 필라멘트 및 물리브덴관 증발원을 사용하여 유리기판(corning 제 2948)에 시료들을 진공 증착하였다. 1.0×10^{-6} Torr의 진공 중에서 유리 기판위에 폭 3mm, 두께 약 1000 Å의 permalloy (53Ni-Fe)를 base 전극으로 증착한 후 증착 마스크를 교환하고 Al을 24 Å의 두께로 증착했다. 이것을 대기중으로 꺼내 실온에서 산화시켜서 절연층 Al_2O_3 를 만든다. 다시 그 위에 base 전극에 직교하도록 대향 전극 Co를 1000 Å 증착하여 permalloy/ Al_2O_3 /Co 터널 접합을 제작하고 전극용 단자에는 Ag를 증착하였다.

Fig. 2는 본실험에서 사용한 L자형 접합시료를 제작하는 방법을 나타내는 그림으로 두개의 L자형 전극을 각을 증첩시켜 배치한 것으로 전류는 단자 1로 부터 permalloy 전극으로 들어가서 절연층을 통과하고 직선적으로 Co 전극으로 흘러 단자 2로 유출한다. permalloy, Al 및 Co의 증착률은 각각 2.5 Å/s, 1 Å/s 및 3 Å/s로 하였다.

제작된 시료의 I-V 특성은 base 전극의 한 단자로 일정

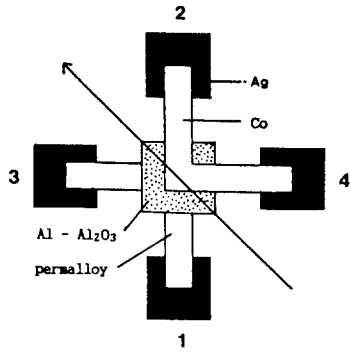


Fig. 2. Structure of L shape electrode type junctions of permalloy / Al₂O₃ / Co.

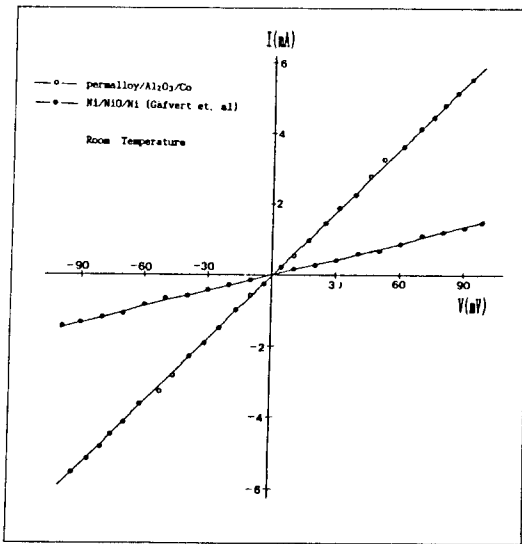


Fig. 3. Typical tunneling characteristics of permalloy / Al₂O₃ / Co junction.

전류를 흘려 절연층을 통과시킨 후 대향 전극의 한 단자로 부터 끄집어 내고 각각의 직교하는 다른 base 전극과 대향 전극의 단자들로 부터 전압을 구하여 측정하였다. 또한 접합 시료의 터널 저항의 자장 의존성을 관측하기 위하여 전류의 방향과 직각 방향으로 자장을 가하여 그에 따른 저항의 변화량을 Wheat stone bridge 방법으로 μ -volt 까지 측정 가능한 galvanometer를 사용하여 X-Y 기록계로 관측하였다. 터널 저항의 히스테리시스성 자장 의존성과 시료의 자화 상태와의 관련성을 조사하기 위하여 시료 진동형 자기계(vibrating sample magnet-

ometer)를 사용하여 접합 시료와 동시에 제작한 15mm 평방의 permalloy / Al₂O₃ / Co 박막의 자기 이력 곡선을 관측하였다.

IV. 실험 결과 및 고찰

1. 전류-전압 특성

Fig. 3은 permalloy / Al₂O₃ / Co 접합 시료의 전류-전압 특성을 나타낸 것으로 I-V 곡선은 터널 효과 특유의 비선형인 특성을 나타낸다. Ni / NiO / Ni 접합에 대한 I-V 특성 곡선에서 실선은 Stratton[7]의 터널 이론을 사용하여 얻은 계산 곡선을 나타낸 것이다. Stratton에 의하면 터널 접합의 I-V 특성은 다음의 식과 같이 나타내어지며,

$$I = 1/b_{11}R_0 \exp(-b_{12}V^2)\sinh(b_{11}V) \quad (4)$$

$$R_0 = 1/2b_{11}I_0(2\pi b_{11}kT / \sin(2\pi b_{11}kT))$$

$$I_0 = A \exp(-b_{10}) / (2\pi b_{11}kT)^2$$

$$A = 4\pi me(kT)^2 / h^3 = 120 T^2 \text{ A/cm}^2$$

여기에서 I 는 전류(A/cm²), V 는 전압(volt), R_0 는 제로 볼트에서의 터널 저항, k 는 볼츠만 상수, T 는 절대 온도, m 은 전자의 질량, e 는 전자의 전하, h 는 플랑크 상수, b_{11} , b_{12} , b_{10} 는 상수이다. 또한 터널 장벽의 높이는 장벽의 형태를 방물선형으로 하되, $X_{tp} = b_{10} / 2 b_{11} = 4 \text{ eV}$ 로 구해진다. 그림중의 실선은 실험 결과에 Stratton의 터널 이론을 fitting시켜 구한 I-V 곡선이다.

본 실험에서 저항 $R_0 = 14 \Omega$ 이며, 이것을 비저항 ρ 로 고치면 $\rho = 6.3 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 가 되어, 금속의 비저항 ρ 가 약 $10^{-5} \sim 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 인 것과 비교하면 꽤 큰 값을 나타낸다. 이상의 것으로 부터 제작한 permalloy / Al₂O₃ / Co 접합 시료는 양호한 터널 접합을 형성하고 있다고 생각되어 진다.

2. 자기이력곡선

Fig. 4는 자기저항측정용 permalloy / Al₂O₃ / Co 접합 시료와 동시에 제작한 15mm 평방의 크기를 가진 시료의 자기 이력 곡선을 나타낸 것이다. 이 곡선은 어깨에 단을 가진 특징있는 곡선으로 되어있다. 이 어깨는 양 전극의 자화가 서로 반평행이 되는 영역에서 생긴다.

이 그림에서 양 전극의 자화의 방향을 모형적으로 나타냈지만, 두 전극의 자화의 상대 각도가 가해진 자장에 의해 제어할 수 있다는 것을 알 수 있다.

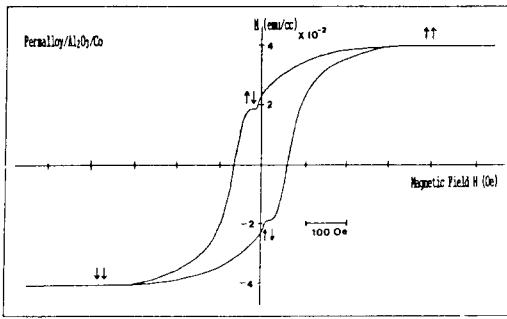


Fig. 4. Magnetization curve for permalloy / Al₂O₃ / Co junction at room temperature.

3. 자기저항곡선과 자화곡선과의 대응

Fig. 5는 제작한 L자형 구조의 Permalloy / Al₂O₃ / Co 접합 시료에 관한 터널 저항의 실온에서의 자장의 의존성을 측정 한 결과이다. 이것은 Gäfvert 등의 Ni / NiO / Co 접합 시료에서 얻은 결과와 비슷한 경향을 나타내었다.

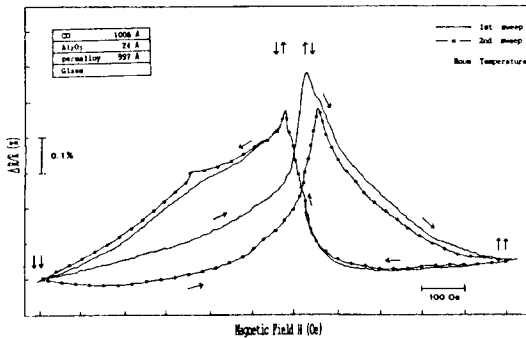


Fig. 5. Magnetic field *H* dependence of the resistance *R* for permalloy / Al₂O₃ / Co junction at room temperature.

터널 저항은 permalloy 및 Co 전극의 보자력인 20 Oe 및 220 Oe 범위내의 자장인 30 Oe 부근에서 최대가 된다. 이것은 어깨에 단을 가진 자기 이력 곡선의 자화 상태로 부터 추정이 가능한 것으로 두 전극의 자화가 서로 반평행이 된 상태에 대응하는 것으로 생각된다.

이러한 측정 결과는 Slonczewski[4]의 이론과 모순되지 않고 또 그들의 히스테리시스 특성은 시료의 자기 이력 곡선에서 측정된 두 전극의 자화 상태의 변화에도 모

Table I. Summarized results of the value of $\Delta R/R$ for magnetic tunneling junctions and those reported previously.

Junction	$\Delta R/R$ (%)		
	4.2 K	77 K	RT
53Ni-Fe / Al ₂ O ₃ / Co			0.6
[Present work]			
82Ni-Fe / Al-Al ₂ O ₃ / Co [9]		2.7	3.5
Fe-C / Al-Al ₂ O ₃ / Fe-Ru [10]			1.0
Ni / Al-Al ₂ O ₃ / Co [11]			0.07
Ni-NiO / Co [12]			0.96
Ni-NiO / Co [3]		2.5	
Ni-NiO / Ni [3]	0.5		

순되지 않는다. 실온에서 zero 자장의 저항에 대한 터널 저항의 변화율은 최대 0.6 %를 나타냈다.

Table I은 이전에 보고된 자기 터널 접합에 대한 터널 저항의 변화율인 $\Delta R/R$ 의 값을 나타내는 것으로 permalloy / Al₂O₃ / Co 경우의 터널 저항의 변화율은 Miyazaki등이 보고한 82Ni-Fe / Al-Al₂O₃ / Co 접합 시료의 실온에서의 값보다는 작았다.

그러나 Nowak[13]등은 터널 저항의 히스테리시스를 동반한 자장 의존성은 자기 valve 효과만으로 설명할 수 없고 절연층의 자구에 의해서 spin-filtering을 받기 때문 일 것이라고 하였으며, 측정을 반복할 때마다 터널 저항의 변화율이 감소하는 이유를 절연층 자신도 또 자구 구조를 가지고 그것이 양 전극과의 상호 작용 하에서 복잡하게 변화하기 때문이라고 추정하고 있다. Nowak[13] 등이 제안한 spin-filtering에 관한 문제는 좀 더 연구해야 할 과제이다.

V. 결 론

열저항 가열식 진공 증착 방법으로 제작한 permalloy / Al₂O₃ / Co 터널 접합 박막의 자기 valve 효과의 조사를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) Permalloy / Al₂O₃ / Co 터널 접합 시료의 전류-전압 실험측정치와 이 실험치에 Stratton 의 터널이론을 fitting 시켜 구한 계산 I-V 곡선의 특성이 터널 효과 특유의 비선형특성을 나타 내는 것으로 보아 이 접합 시료는 양호한 터널 접합을 형성하고 있는 것으로 생

각된다.

- 2) 시료진동형 자기계로 측정된 자화의 자기 이력곡선은 Wheat stone bridge 방법으로 측정된 자기저항의 히스테리시스 곡선과 잘 대응한다.
- 3) 집합시료의 터널 저항이 최대가 되는 경우는 어깨에 단을 가진 자기 이력곡선의 자화상태와 관련지워 볼때 두 전극의 자화가 서로 반평행이 되는 상태에 대응하는 것으로 생각된다.
- 4) Permalloy / Al₂O₃ / Co 터널 집합 시료에 관하여 실온에서 자기 valve 효과를 관찰 할 수 있었으며 자기 저항의 변화율은 실온에서 최대 0.6% 를 나타 내었다.

참 고 문 헌

[1] 末澤慶孝, 日本 應用 磁氣 學會誌, **16**, 631 (1992).

[2] M. Julliere, Phys. Lett., **54A**, 225 (1975).

[3] U. G fvert and S. Maekawa, IEEE Trans. Magn. MAG-**18**, 707 (1982).

[4] J. C. Slonczewski, Phys. Rev., B**39**, 6995 (1989).

[5] 山本英文, 新壓輝也, 日本 應用 磁氣 學會誌, 15, 813

(1991).

[6] M. B. Sterns, J. Magn. Magn. Mater., **5**, 167 (1977).

[7] P. M. Tedrow and R. Meservey, Phys. Rev. Lett., **26**, 192 (1971).

[8] R. Stratton, J. Phys. Chem. Solid, **23**, 1177 (1962).

[9] T. Miyazaki, T. Yaoi and S. Ishio, J. Magn. Magn. Mater., **98**, L7 (1991).

[10] R. Nakatani and M. Kitada, Abstracts of the Japan Institute of Metals p.394 (Autumn 1990).

[11] F. Takahashi, M. Murata, H. Kogure, Y. Suezawa and Y. Gondo, Digests of the 14th Annual Conf. on Magnetism p.197 (1990).

[12] Y. Suezawa and Y. Gondo, Proc. Intern. Symp. on Physics of Magnetic Materials, Sendi, 1987, p.303 (World Scientific, Singapore, 1987).

[13] J. Nowak and J. Rauluszkiewicz, J. Magn. Magn. Mater., **109**, 79 (1992).

Magnetic Tunneling Effects in Permalloy / Al₂O₃ / Co Junction

M. S. Lee, H. J. Song, H. S. Jang, M. Y. KIM, and J. R. Rhee

Department of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul 140-742

Y. H. Lee

Department of Physics, Jeonbuk National University, JeonJu 560-756

(Received 27 January 1993, in final form 11 March 1993)

Magnetoresistance was studied for the ferromagnetic tunneling junction in permalloy / Al₂O₃ / Co prepared by evaporation in a vacuum of 1×10^{-6} Torr. We measured voltage-current characteristic and magnetic valve effect of prepared ferromagnetic tunneling junction sample. We investigated field-dependency of tunnel resistance by Wheat-stone bridge method and measured magnetic hysteresis curve by vibrating sample magnetometer. The tunneling is confirmed by measuring voltage-current characteristic. The hysteresis curve of magnetoresistance corresponds well with that of magnetization. The magnetoresistance ratio $\Delta R/R$ is 0.6% at room temperature.