

강자성 공명 조건에서 전자 수송기구

고려대학교

이제형 이궁원*

ELECTRON TRANSPORT AT FMR CONDIIION

Korea University

J. H. Lee, K. Rhie*

1. 서론

강자성 공명과 전자수송기구는 각기 전자의 자기적에너지 상태의 측정과 전도전자의 흐름을 측정한다는 그 기본적인 성격에서부터 다른 물리학 분야이다. 그러나 강자성 공명에서 사용하는 마이크로파가 전자를 다수스핀 (\uparrow) 상태에서 소수 스핀 상태로 (\downarrow)으로 전이 시키므로 이 공명점에서는 전자스핀의 분포를 일부 바꾸어줄 수 있다. 자성체에서 측정되는 거의 대부분의 전자 수송기구는 이 스핀 분포에 따라 나타나게되므로 결국 강자성공명이 일어나는 적절한 주파수의 마이크로파가 강자성 금속에 주어질 경우 전자수송기구의 신호가 원래 신호에서 다르게 변화하는 것을 볼 수 있을 것이다.

이 때 마이크로파를 꺼 주게되면 열적요동에 의해 시간이 흐르면서 전자의 스핀 분포는 다시 평형에 이르게 된다. 주어진 dc 자기장에서 계속 마이크로파가 주어지면 결국 높은 에너지 상태의 스핀 수와 낮은 에너지 상태의 스핀 수는 분포가 바뀐 채로, 즉 높은 에너지 상태인 소수 전자의 수가 원래보다 더 많아진 상태로 새로운 평형에 도달하게된다. 이러한 스핀 분포의 평형점이 이동 되었을 때 전기신호, 즉 홀 효과나 자기저항을 측정하게 되면 이 전기신호는 새롭게 형성된 평형 지점의 스핀 분포를 따르므로 공명이 일어나기전과 다른 전기 신호를 보내주게된다.

스핀의 분포에 따른 전기신호의 변화를 측정하는 방법은 여러 가지가 있다. 요즈음 광범위하게 각광을 받고 있는 자기 다층박막의 터널링 접합이나 스핀 밸브구조, 스핀 주입 등도 생각할 수 있다. 그러나 이들 효과는 다층막 효과 즉 표면 산란 효과에 의해 전기신호가 나타나게되므로 이보다 근본적인 이방성자기저항 (Anisotropic Magnetoresistance)와 같이 금속 내부의 효과를 보는 것이 현재 상태로서는 더욱 유리할 것이다.

2. 실험방법, 고찰 및 결론

AMR (Anisotropic Magnetoresistance)의 텐서 성분 중에서 전류에 수직한 방향의 성분, 즉 평면 홀 효과 성분은

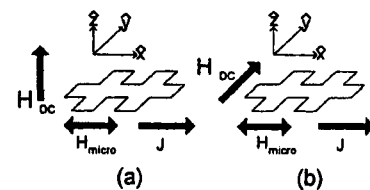


Fig. 1 Diagram of applied magnetic fields and current for (a): perpendicular Hall effect and (b): planar Hall effect.

$$\begin{aligned}
E_y &= [(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})\alpha_x\alpha_y + \rho_H^{\text{perpendicular}}\alpha_z]J_x \\
&= \left[\frac{1}{2}(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})\sin^2\theta\sin 2\xi + \rho_H^{\text{perpendicular}}\right]J_x \\
&= \rho_H^{\text{measured}}J_x
\end{aligned}$$

으로 표현이 된다. 여기에서 ξ 는 전류와 면내 자화벡터와의 각도이다. 그림 1은 마이크로파를 주입시키며 수직 홀 효과와 평면 홀 효과를 측정하는 방향을 표시한 것이다. 시료로는 300nm 두께의 Co81Nb19 박막을 사용하였으며 시료에 500nA의 전류를 흘리며 ESR 장비의 공명통 안에서 실험을 수행하였다. 박막에 수직하게 dc 자기장이 인가된 경우 자기공명지점에서 아무런 홀 효과의 변화가 측정되지 않았다. 그러나 박막면내에 dc 자기장이 가해지게하고 측정한 평면 홀 효과의 경우 홀

효과의 변화가 관측되었고, 그림 2에 이것을 나타내었다. 강자성 공명 신호와 홀 효과의 변화 정점이 약간 어긋나는 이유로는 홀 효과의 측정이 Lock-in amplifier로 수행되어 time constant에 의한 지연 효과로 추정된다. 주입한 microwave 강도에 따라 홀 신호의 크기가 변화한 이유로는 강자성 공명에 참여하는 전자의 수가 광자의 수에 비례하기 때문이다.

평면 홀 효과에서만 이 효과가 관측되는 이유는 아래와 같다. 자화가 z축으로 포화되게하고 마이크로파를 x축 또는 y축 방향으로 진동하게 하면 z축으로부터 세차운동각 θ_s (angle from the direction of saturated moment)를 갖으며 자화벡터 M 이 세차운동을 하게되고, 그 변화각 θ_s 에 의해 z 방향으로는

$$\Delta M_z = M(1 - \cos \theta_s) \approx -M\theta_s^2 \quad (16)$$

의 자화 변화가 생기되 작은 세차운동각 θ_s 의 제곱 항이 되어 그 크기 변화를 감지하기 어렵는데 반해 M_x 와 M_y 의 변화는

$$\begin{aligned}
\Delta M_x &= M\sin\theta_s\cos\phi \approx M\theta_s\cos\phi \\
\Delta M_y &= M\sin\theta_s\sin\phi \approx M\theta_s\sin\phi
\end{aligned} \quad (17)$$

이 되어 θ_s 의 1차항으로 표현되어 측정범위에 들게 된다.

본 연구진의 지식 이내에서 마이크로파에 의한 전자 수송효과의 변화가 관측된 것은 처음이다. 또한, 이는 특정마이크로파 주파수만을 감지하는 선택적 센서개발의 새로운 원리를 제공한 것이기도 하다. 예컨대 영구자석을 시료와 결합시켜 특정 자기장이 항상 인가되게 한 뒤 마이크로파를 측정하면 측정하고자하는 주파수만의 강도를 측정할 수 있는 것이다. 이는 특정 주파수 이상의 모든 파장에 개방된 유형의 기존 센서와 다른 개념의 센서가 될 것이다.

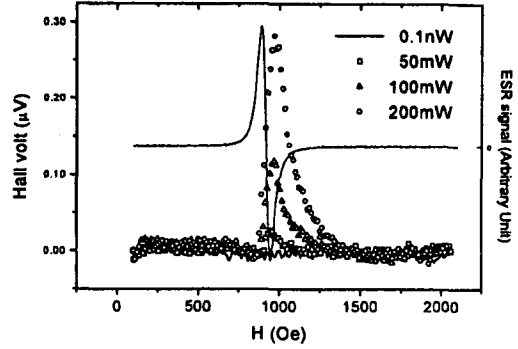


Fig. 2 Differential FMR signal in arbitrary unit (line) and planar Hall voltage difference between resonance and nonresonance conditions for several microwave intensity