

IrMn 스핀필터 스페큘라 스핀밸브의 자기저항 특성

황재연 · 이장로*

숙명여자대학교 물리학과, 서울 용산구 청파동 2가 53-12, 서울, 140-742

(2004년 11월 30일 받음, 2004년 12월 15일 최종수정본 받음)

미소 자유자성층에 인접한 스핀필터층 (SFL; spin filter layer)을 갖는 Ta₃/NiFe₂/IrMn₇/CoFe₁/(NOL₁)/CoFe₂/Cu_{1.8}/CoFe(*t_F*)/Cu(*t_{SF}*)/(NOL₂)/Ta_{3.5} (두께단위 nm) 구조의 스페큘라 스핀밸브 (SSV; specular spin valve)를 마그네토론 스퍼터링 장치를 사용하여 제작하였다. 반강자성체 Ir₂₂Mn₇₈을 속박층으로 한 스핀필터 스페큘라 스핀밸브 (SFSSV; spin filter specular spin valve) 박막에 대하여 자유자성층의 두께 (*t_F*)와 SFL의 두께 (*t_{SF}*)가 각각 1.5 nm일 때 극대 자기저항 (MR; magnetoresistance)비 11.9%를 얻었으며, *t_{SF}*가 1.0 nm으로 감소하여도 11% 이상의 MR비를 유지하였다. 이것은 나노산화층 (NOL; nano-oxide layer)에 의한 스페큘라 전자와 SFL에 의한 전류분류효과의 증가 때문이다. 또한, 자유자성층과 피속박층 사이의 층간결합장 (*H_{int}*; interlayer coupling field)은 RKKY력과 정자기결합력으로 설명할 수 있다. 자유자성층의 보자력 (*H_{cf}*; coercivity of the free layer)은 기존의 스핀밸브 (TSV; traditional spin valve)에 비해 현저히 감소했으며, *t_F*가 1 nm에서 4 nm로 변하여도 4 Oe 이하의 값을 유지하였다. 따라서 SFL의 삽입으로 자유자성층의 연자성 특성을 떨어뜨리지 않으면서 자유자성층 두께의 감소와 MR비의 향상을 가능하게 하였다.

주제어 : 스핀필터층(SFL), 스페큘라 스핀밸브(SSV), 자유자성층, 나노산화층(NOL), 층간결합장, 보자력

I. 서 론

거대자기저항 (GMR) 헤드는 10 Gbit/in² 이상의 기억밀도 용으로 적합한 것으로 기대된다. 그러나 기억밀도가 증대함에 따라 더욱더 개선된 SV 구조가 요구된다. 자유자성층 두께가 감소하면 SV 헤드의 출력증대를 위하여 매우 효과적이거나 지금까지의 TSV에서는 자유자성층의 연자성 특성의 저하와 MR비의 감소를 가져오게 한다. 이 문제는 스핀필터 SV (SFSV)구조를 사용함으로써 해결될 수 있다 [1, 2]. GMR은 자성층 또는 자성층과 비자성층 사이의 계면에서 전도전자의 스핀의존산란 (spin dependent scattering) 때문에 생기는 현상이다. 그리고 MR비는 전자 평균자유행로 (mean free path)와 GMR 박막의 자성층 및 비자성층 두께에 상관하여 달라진다. 그러므로 GMR비의 증대는 평행 방향의 스핀 배치에 대하여 유효평균자유행로 (λ_{eff})를 증가시키면 가능하다. SFSV 구조에서 자유자성층 위에 스핀필터층 (SFL)의 첨가는 자화방향이 평행하게 정렬된 스핀전자의 λ_{eff} 증가를 기대하게 한다. SFL의 첨가는 자화방향이 평행하게 정렬한 전자의 전도도를 증가시키지만 반평행으로 정렬한 전자에 대하여 그렇지 않다. 즉 SFL의 첨가는 자유자성층의 두께를 감소할 수 있게 할 뿐 아니라 자유자성층의 연자성의 저하 없이 MR비를 증대시킬 수 있다 [3]. 반면에 MR비의 보다 큰 증대는 나노산화층 (NOL)을 갖는 스페큘라 SV (SSV)로 가능해진다 [4]. 이 MR비의 증대는 산화층 계면에서의 전도전자

의 거울면산란효과 때문이다. 따라서 이 논문에서는 22 at. % IrMn을 사용하여 Ta/NiFe/IrMn/CoFe/(NOL₁)/CoFe/Cu/CoFe/Cu/(NOL₂)/Ta 구조의 SFL층을 갖는 SSV를 제작하고, 이 SFSSV에 대하여 MR비, 층간결합장 (*H_{int}*) 및 자유자성층의 보자력 (*H_{cf}*)의 자유자성층 두께 (*t_F*)와 스핀필터층 두께 (*t_{SF}*) 의존성을 조사하였다.

II. 실험방법

기판/Ta₃/NiFe₂/IrMn₇/CoFe₁/(NOL₁)/CoFe₂/Cu_{1.8}/CoFe(*t_F*)/Cu(*t_{SF}*)/(NOL₂)/Ta_{3.5} 구조를 갖는 SFSSV 박막 (Fig. 1 (b))과 기판/Ta₃/NiFe₂/IrMn₇/CoFe₃/Cu_{1.8}/CoFe₄/Ta_{3.5} (두께 단위 nm)의 구조를 갖는 TSV 박막이 열산화된 Si (100) 기판에 dc 마그네토론 스퍼터링 방식으로 실온에서 제작되었다. 이중층 Ta과 매우 얇은 NiFe은 IrMn에 의한 피속박층 CoFe층의 교환결합력을 얻기 위하여 하지층으로 사용되었다. SSV 구조 (Fig. 1(a))는 이중거울반사층을 갖는 SV를 표시한다. NOL₁이 피속박층 사이에 삽입되었고 자유층의 꼭대기에 증착된 NOL₂는 자유자성층의 일부분을 사용하여 제작되었다.

자유자성층 두께가 감소하면 이 자유자성층은 산화과정에 매우 민감해질 뿐 아니라 더욱더 쉽게 망가지게 되어 보자력을 증가시키고 자화의 감소를 가져오게 한다. 이 결과 MR비의 감소로 이어지며 자화 반전을 위해 보다 높은 자기장을 필요로 하게 될 것이다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 SFSSV 구조 (Fig. 1(b))에서는 스핀필터 효과를 발생하도록

*Tel: (02)710-9404, E-mail: jrhee@sookmyung.ac.kr

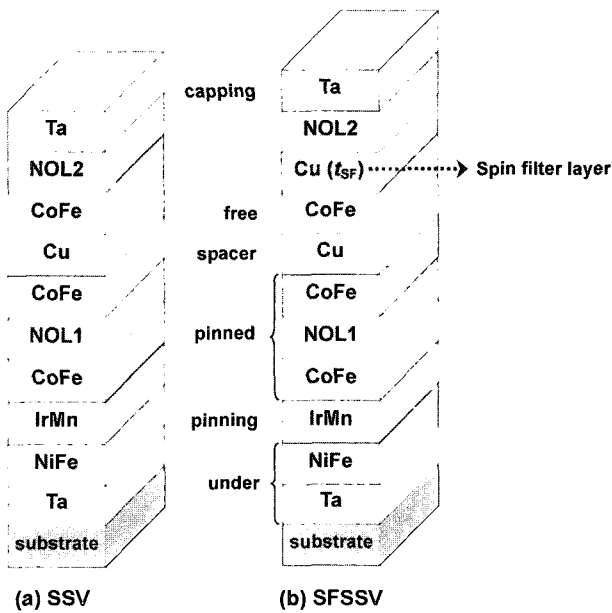


Fig. 1. Schematic structures of the SSV (a) and SFSSV (b).

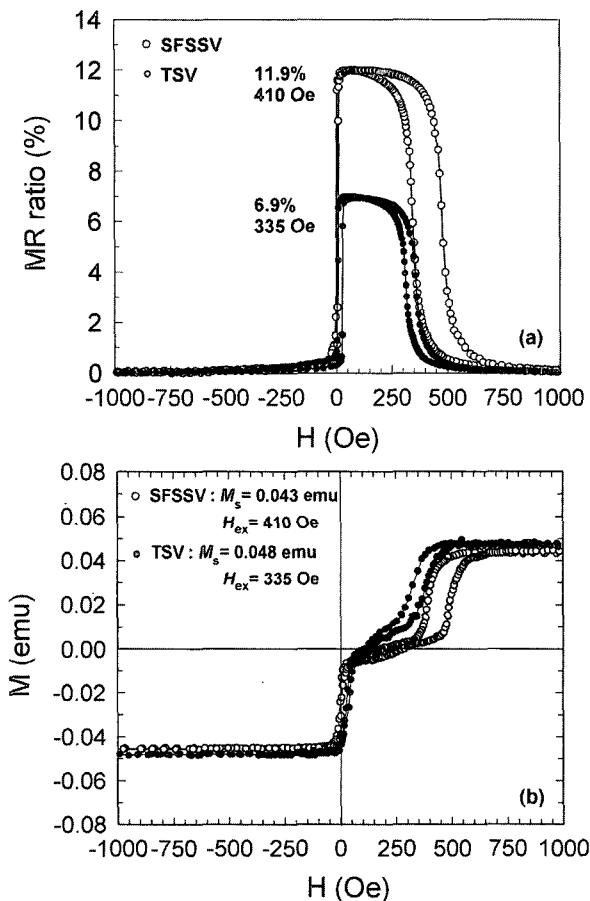


Fig. 2. Major MR curves (a) and the magnetization curves (b) for the annealed SFSSV (open symbols) Ta₃/NiFe₂/IrMn₇/CoFe₁/(NOL1)/CoFe₂/Cu_{1.8}/CoFe_{1.5}/Cu_{1.5}/(NOL2)/Ta_{3.5} film and the annealed TSV (solid symbols) Ta₃/NiFe₂/IrMn₇/CoFe₃/Cu_{1.8}/CoFe₄/Ta_{3.5} film.

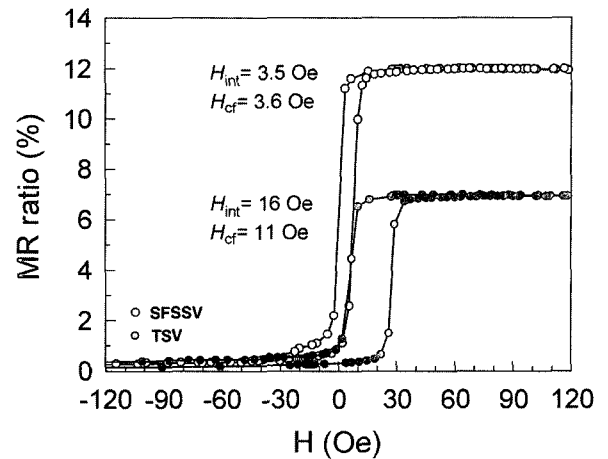


Fig. 3. Minor MR curves for the annealed SFSSV (open symbols) Ta₃/NiFe₂/IrMn₇/CoFe₁/(NOL1)/CoFe₂/Cu_{1.8}/CoFe_{1.5}/Cu_{1.5}/(NOL2)/Ta_{3.5} film and the annealed TSV (solid symbols) Ta₃/NiFe₂/IrMn₇/CoFe₃/Cu_{1.8}/CoFe₄/Ta_{3.5} film.

자유자성층의 꼭대기에 Cu SFL을 첨가하게 되었다. 스핀필터 구조에서는 보다 얇은 자유자성층 때문에 생기는 전도전자의 평균자유행로의 감소가 이 Cu 개선층에 의해 보상되게 된다. 또 Cu SFL은 NOL 생성과정에서 산화로부터 자유자성층을 보호할 수 있으며 따라서 자유자성층은 연자성 특성을 유지할 수 있게 될 것이다.

자성층 내에 일축자기이방성을 유도하기 위하여 증착하는 동안 자기장 100 Oe이 걸려 있으며 진공챔버의 압력은 2×10⁻⁸ Torr 이하이고 Ar (99.9995%) 가스 압력은 2 mTorr이다.

산화는 별도의 load lock 챔버 내에서 2 sccm O₂와 8 sccm Ar을 혼합하여 결과적으로 2 mTorr 압력 상태에서 3분 동안 이루어졌다. IrMn층과 피속박층 CoFe층 사이에 교환결합력 (H_{ex})을 유도하기 위하여 일련의 열처리가 기본압력 8×10⁻⁷ Torr를 유지하는 진공도에서 정자기장 1050 Oe가 걸린 상태로 여러 온도 (100 °C~280 °C)에서 이루어졌다. 각각의 열처리는 지정된 온도까지 상승 1시간, 유지 1시간, 실온까지 냉각 1시간으로 하였다. 열처리한 박막의 MR비와 자기 특성은 실온에서 4단자 방법과 시료진동형자기계로 측정되었다. MR비와 H_{ex}의 열처리 온도 의존성 조사에 따라서 이하 언급하는 모든 SFSSV와 TSV 박막은 210 °C에서 열처리하여 제작된 것이다.

III. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 열처리한 SFSSV Ta₃/NiFe₂/IrMn₇/CoFe₁/(NOL1)/CoFe₂/Cu_{1.8}/CoFe_{1.5}/Cu_{1.5}/(NOL2)/Ta_{3.5} 박막과 TSV Ta₃/NiFe₂/IrMn₇/CoFe₃/Cu_{1.8}/CoFe₄/Ta_{3.5} 박막의 대표적인

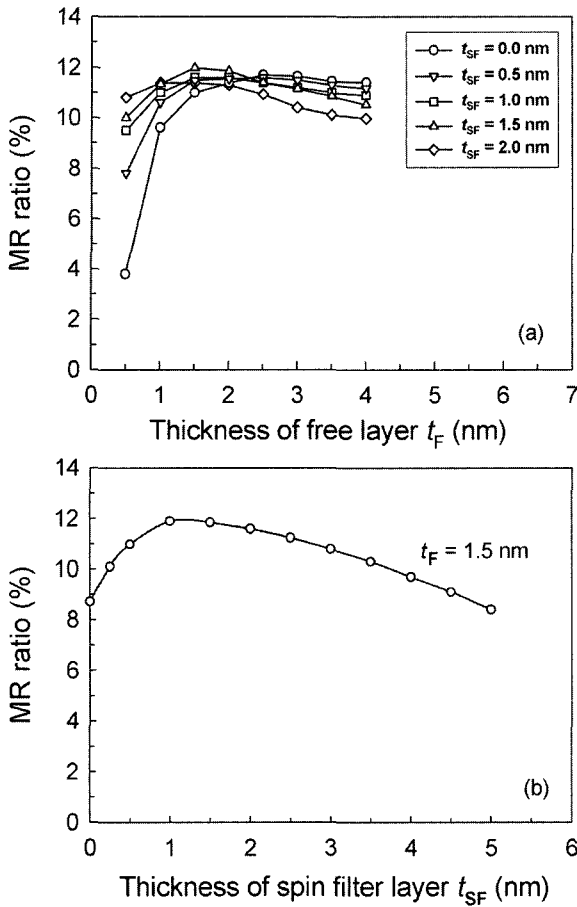


Fig. 4. (a) MR ratios as a function of the t_F for SFSSV Ta3/NiFe2/IrMn7/CoFe1/(NOL1)/CoFe2/Cu1.8/CoFe(t_F)/Cu(t_{SF})/(NOL2)/Ta3.5 and (b) MR ratios as a function of the t_{SF} for the $t_F = 1.5$ nm.

major MR곡선 (a)와 자화곡선 (b)이며, Fig. 3은 minor MR 곡선이다. Fig. 2(b)의 자화곡선에서 major MR곡선과 대응되는 히스테리시스 곡선의 상반부의 이동이 있음을 알 수 있다. SFSSV에서 CoFe의 두께 t_F 가 1.5 nm으로 감소하여도 TSV의 MR비에 비해 72% 이상의 향상된 MR비를 얻었다. 또한, TSV (MR비 = 6.9%, $H_{ex} = 335$ Oe, $H_{int} = 16$ Oe 및 $H_{cf} = 11$ Oe)와 비교하여 $H_{ex} = 410$ Oe, $H_{int} = 3.5$ Oe 및 $H_{cf} = 3.6$ Oe의 값을 나타낸다. SFSSV의 경우, 상당히 높은 H_{ex} 값을 유지하며 H_{int} 와 H_{cf} 는 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과는 t_F 가 1.5 nm일 때에도 SFL 삽입에 의해 majority 스핀 전자의 λ_{eff} 가 증가하기 때문에 스페큘라 scattering 효과에 의해 MR비가 향상되고 얇은 자유자성층의 연자성 특성이 개선되었다는 것을 보여 준다.

Fig. 4(a)는 SFSSV Ta3/NiFe2/IrMn7/CoFe1/(NOL1)/CoFe2/Cu1.8/CoFe(t_F)/Cu(t_{SF})/(NOL2)/Ta3.5의 t_F 에 따른 MR비를 나타내며 Fig. 4(b)는 t_F 가 1.5 nm일 때 t_{SF} 에 따른 MR비를 나타낸 것이다. SFL이 없는 ($t_{SF} = 0$ nm) SSV의 경우, t_F 가

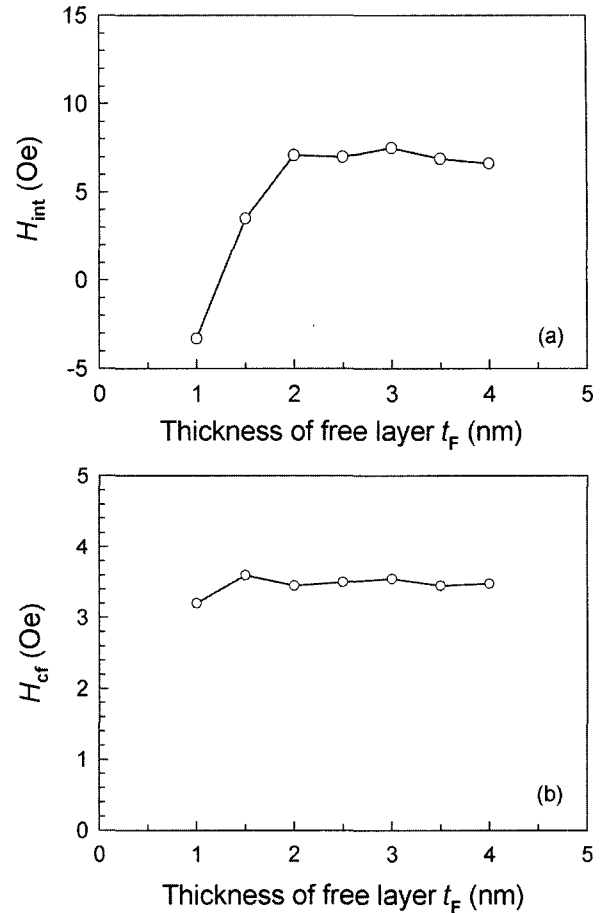


Fig. 5. (a) H_{int} and (b) H_{cf} as a function of the t_F for SFSSV Ta3/NiFe2/IrMn7/CoFe1/(NOL1)/CoFe2/Cu1.8/CoFe(t_F)/Cu1.5/(NOL2)/Ta3.5.

1.0 nm로 감소하면 MR비가 급격히 감소한다. 그러나 SFSSV의 경우엔 t_F 가 4 nm에서 1 nm로 감소하여도 높은 MR비를 유지한다. 결과적으로 Cu 전도개선층을 통한 전류분류 (shunting)효과와 전자의 평균자유행로 차의 증가 사이에 균형이 이루어져, t_F 와 t_{SF} 가 각각 1.5 nm일 때 극대 MR비 11.9%가 얻어진다.

Fig. 5(a), (b)는 SFSSV Ta3/NiFe2/IrMn7/CoFe1/(NOL1)/CoFe2/Cu1.8/CoFe(t_F)/Cu1.5/(NOL2)/Ta3.5에 대한 t_F 에 따른 H_{int} 와 H_{cf} 를 나타낸다. H_{int} 는 $t_F = 1$ nm일 때 음의 값 ($H_{int} = -3.5$ Oe)을 가지고 t_F 가 증가함에 따라 양의 값을 갖게 된다. 이는 등각파동 (conformal waviness)을 갖는 원주형 구조를 가정하는 bottom형 스핀밸브에서 음의 RKKY (Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida) 결합 상수와 정자기적 결합 효과 사이의 관계를 고려함으로써 이해할 수 있다 [6]. t_F 가 1.5 nm보다 얇아지면, 음의 RKKY결합에 의해 H_{int} 가 $1/t_F$ 에 비례하게 되며, 즉 음의 RKKY 반강자성 결합력이 양의 정자기력의 증가에 비해 매우 강해진다. t_F 가 증가하면, RKKY

결합력이 약해지고 정자기결합력이 우세해져 양의 H_{int} 가 증가하게 된다. t_F 가 약 3 nm일 때 최대 H_{int} 를 갖는다. t_F 가 3.5 nm 이상 두꺼워지면 정자기 효과가 약해져 [6], H_{int} 는 매우 감소하게 된다. 한편, t_F 가 1~4 nm일 때 H_c 는 4 Oe 미만의 값을 갖는다. 이것은 SFL을 삽입함에 따라 CoFe와 Cu 사이의 섞임이 줄기 때문에 얇은 자유자성층의 연자성 특성이 개선되었다는 것을 의미한다 [7]. 이러한 성질은 고밀도 GMR 헤드의 응용에 매력적인 특성이다.

IV. 결 론

반강자성 $Ir_{22}Mn_{78}$ 을 속박층으로 한 SFSSV Ta3/NiFe2/IrMn7/CoFe1/(NOL1)/CoFe2/Cu1.8/CoFe(t_F)/Cu(t_{SF})/(NOL2)/Ta3.5 구조에 대해 조사하였다. 미소 자유자성층 두께를 갖는 SV의 MR비가 크게 향상되는 것을 확인하였다. t_F 와 t_{SF} 가 각각 1.5 nm일 때 극대 MR비 11.9%를 얻었다. MR비는 t_F 가 1.0 nm로 감소하여도 11%보다 높은 값을 유지하였다. t_F 가 1~4 nm일 때 자유자성층의 H_c 는 4 Oe 미만이었다. 더욱이, H_{int} 특성은 RKKY력과 정자기결합력을 고려함으로써 해석될 수 있다. 결국, SFL 삽입은 미소 자유자성층의 연자성 특성의 저하 없이 자유자성층의 두께를 줄일 수 있고 MR비의

향상까지 가능하게 함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2004년 숙명여자대학교 교내 특별연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Huai, G. Anderson, and M. Pakala, J. Appl. Phys. **87**, 5741 (2000).
- [2] M. Uneno, H. Nishida, K. Mizukami, F. Hikami, K. Tabuchi, and T. Sawasaki, IEEE Trans. Magn. **36**, 2572 (2000).
- [3] A. Al-Jibouri, M. Hoban, Z. Lu, and G. Pan, J. Appl. Phys. **91**(10), 7098 (2002).
- [4] J. Y. Hwang, M. Y. Kim, J. R. Rhee, S. S. Lee, D. G. Hwang, J. K. Kim, S. H. Lee, and S. C. Yu, J. Appl. Phys. **93**, 8394 (2003).
- [5] A. Al-Jibouri and M. Hoban, Datatech **7**, 41 (2001).
- [6] J. C. S. Kools, W. Kula, D. Mauri, and T. Lin, J. Appl. Phys. **85**, 4466 (1999).
- [7] J. Q. Xiao, J. S. Jing, and C. L. Chien, Phys. Rev. Lett. **68**, 3749 (1992).

Magnetoresistance of IrMn-Based Spin Filter Specular Spin Valves

J. Y. Hwang, J. R. Rhee*

Dept. of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul 140-742, Korea

(Received 30 November 2004, in final form 15 December 2004)

We studied the specular spin valve (SSV) having the spin filter layer (SFL) in contact with the ultrathin free layer composed of Ta3/NiFe2/IrMn7/CoFe1/(NOL1)/CoFe2/Cu1.8/CoFe(t_F)/Cu(t_{SF})/(NOL2)/Ta3.5 (in nm) by the magnetron sputtering system. For this antiferromagnetic $Ir_{22}Mn_{78}$ -pinned spin filter specular spin valve (SFSSV) films, an optimal magnetoresistance (MR) ratio of 11.9% was obtained when both the free layer thickness (t_F) and the SFL thickness (t_{SF}) were 1.5 nm, and the MR ratio higher than 11% was maintained even when the t_F was reduced to 1.0 nm. It was due to increase of specular electron by the nano-oxide layer (NOL) and of current shunting through the SFL. Moreover, the interlayer coupling field (H_{int}) between free layer and pinned layer could be explained by considering the RKKY and magnetostatic coupling. The coercivity of the free layer (H_c) was significantly reduced as compared to the traditional spin valve (TSV), and was remained as low as 4 Oe when the t_F varied from 1 nm to 4 nm. It was found that the SFL made it possible to reduce the free layer thickness and enhance the MR ratio without degrading the soft magnetic property of the free layer.

Key words : spin filter layer, specular spin valve, free magnetic layer, nano-oxide layer, interlayer coupling field, coercivity