

NiFe/Co/Al₂O₃/Co/IrMn 접합의 터널링 자기저항효과

홍성민 · 이한춘 · 김택기

충남대학교 공과대학 금속공학과, 대전 305-764

N. Tezuka · T. Miyazaki

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Tohoku University Sendai 980-77, Japan

(1999년 8월 12일 받음, 1999년 10월 30일 최종수정본 받음)

IrMn을 반강자성체로 사용하고 순수한 Al을 자연산화 시켜서 제작한 Al₂O₃를 절연층으로 사용한 spin-valve 형태의 NiFe/Co/Al₂O₃/Co/IrMn 터널링 접합의 자기저항효과를 조사하였다. IrMn의 두께가 약 100Å 이상일 경우 강자성체와의 교환상호작용이 발생하기 때문에 NiFe(183Å)/Co(17Å)/Al-oxide(16Å)/Co(100Å)/IrMn(100Å) 터널링 접합에서 자기저항효과가 관찰되며 TMR비(%)는 ±20 Oe의 인가자장에서 10 %이상의 값을 갖는다. 하부 자성층인 NiFe/Co의 길이방향으로 수행한 자장 중 열처리에 의해 저항은 다소 감소하고 TMR비(%)는 열처리온도에 따라 증가하여 200 °C에서 23%의 최대값을 갖는다. 자성층의 폭을 변화시켜 접합면적을 달리한 시료의 TMR비(%)는 접합면적이 증가할수록 증가하고 저항은 감소한다.

I. 서 론

Fe/Cr계 인공초격자 다층박막에서 거대자기저항(Giant Magnetoresistance, GMR)효과가 발견[1]된 이후, Diemy 등에 의해 발견된 spin-valve 다층박막[2]은 낮은 자장에서 높은 자기저항비를 나타내어 고기록밀도를 구현하기 위한 재생헤드재료로의 응용을 가능하게 했다. 한편, Fe/Cr 인공초격자의 자기저항효과보다 10년 정도전에 발견된 Fe/Ge/Co 접합에서의 터널링자기저항(Tunneling Magnetoresistance, TMR)효과[3]는 1995년 Miyazaki 등이 Fe/Al₂O₃/Fe 접합을 통해서 실온에서 커다란 자기저항효과가 나타난다는 사실을 보고[4]하면서 이러한 TMR 재료의 자기저항현상 및 응용가능성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. TMR 재료는 spin-valve MR재료에 비해서 적은 자장에서 큰 자기저항비를 나타내고 임피던스값이 커서 재생헤드 및 MRAM[5]으로의 응용면에서 MR재료에 비해 유리하다.

TMR 재료를 재생헤드 또는 자기메모리 등의 디바이스로 응용하려는 경우에 실온에서 적은 인가자장에서 커다란 자기저항효과를 안정하게 나타낼 수 있는 접합의 생성, 접합의 미세화 및 접합소자의 열적 안정성은 커다란 연구과제로 남아있다[6]. 따라서, 한쪽의 자성층을 반강자성체를 사용하여 강제적으로 고정시키고 나머지 자성층의 자화반전에 의해 자성층간의 반평행 배열을 유도하는 spin-valve 형태의 터널링 접합의 자기저항효과는 이러한 TMR

재료의 과제를 해결할 수 있다는 점에서 주목받고 있다.

본 연구에서는 반강자성체로 Ir₂₀Mn₈₀을 이용하여 NiFe/Co/Al₂O₃/Co/IrMn 형태의 spin-valve형 터널링 접합을 위한 조건을 규명하고, 이 접합의 자장 중 어닐링에 의한 자기저항거동과 저항 및 TMR비(%)의 접합 면적의존성을 각각 조사하였다.

II. 실험방법

본 실험에서 제작된 시료의 개략적인 구조는 그림 1과 같다. NiFe/Co/Al-oxide/Co/IrMn 접합 TMR 재료는 Load-Lock 형태의 5-gun target RF·DC magnetron sputtering법을 사용하여 실온에서 Si(100) wafer기판 위에 제작하였다. NiFe와 Al은 RF magnetron sputtering법을, Co와 IrMn은 DC magnetron sputtering법을 각각 사용하

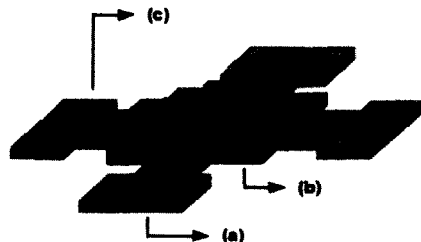


Fig. 1. Geometry of tunneling junction. (a) Bottom electrode (b) Barrier layer (c) Top electrode.

여 제작하였다. 각각의 gun은 분리막에 의해 각각의 영역으로 분할하였으며, 컴퓨터로 개폐시간을 조절하는 셔터를 설치하여 원자단위의 박막을 형성할 수 있도록 하였다. Si wafer(100)기판은 $1 \times 1 \text{ inch}^2$ 의 크기로 절단하여 에탄올 및 아세톤으로 초음파 세척한 후 가열된 에탄올에 넣어 표면을 약 3000 Å 산화시켰다. 초기진공도는 6×10^{-6} Pa이었으며, sputtering시 sputtering gas로 사용된 Ar 분압은 1.2 Pa로 하였다. 이때 각 층의 성장속도는 NiFe와 Al의 경우는 각각 1.254 Å/s, 3.18 Å/s로 하였으며, Co와 IrMn은 각각 1.65 Å/s, 3.547 Å/s로 하였다. 하부 및 상부 자성층은 I형태의 마스크(SUS 430)를 사용하여 제작하였다. 하부 자성층인 NiFe와 Co를 제작한 후, Load-Lock 장치를 이용하여 정사각형의 마스크로 순수 Al층을 성장한 후, 산소분위기의 Incubator에서 60 °C, 72시간 자연산화 시켜 Al_2O_3 인 절연층을 제작하였다. 절연층인 Al_2O_3 위에 하부자성층과 직각방향으로 상부자성층인 Co와 반강자성체인 IrMn을 각각 제작하였다. 자기적 성질은 VSM을 이용하여 조사하였으며, 외부 자기장에 따른 자기저항거동은 상온에서 직류 4단자 탐침법을 이용하여 하부 자성층의 길이방향으로 -600~600 Oe의 자장을 인가하여 측정하였고, 측정값은 GPIB card를 통해 컴퓨터로 획득하였다. 자기저항 곡선으로부터 얻어지는 저항변화를 이용하여, 자기저항비, TMR을 구하였으며 TMR은 $\text{TMR}(\%) = (R_0 - R_s/R_s) \times 100$ 과 같이 정의하였다. 여기서 R_0 는 자장이 인가되지 않은 경우에서의 저항값이며 R_s 는 포화저항값이다. 열처리특성을 조사하기 위한 자장 중 열처리하는 하부 자성층의 길이방향으로 330 Oe의 자장을 인가하여 200 °C에서 1시간 동안 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

강자성체인 Co와 반강자성체인 IrMn의 강자성과 반강자성체의 교환상호작용의 여부를 조사하기 위하여 Co(50 Å)/IrMn(d Å) 박막에서 IrMn의 두께변화에 따른 M-H 곡선을 조사한 결과는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 IrMn의 두께가 25 Å일 경우에는 자기이력곡선이 자장에 대하여 대칭이나 IrMn의 두께가 50 Å부터 자기이력곡선이 자장에 대하여 비대칭적으로 이동하기 시작함을 알 수 있다. 이 이동자장을 H_{shift} 라고 하면, IrMn의 두께가 100 Å이상의 두께에서 H_{shift} 가 포화됨을 알 수 있다. 이러한 M-H 곡선의 변화는 강자성체인 Co와 반강자성체인 IrMn사이의 강자성체와 반강자성체의 교환상호작용(Ferromagnet-

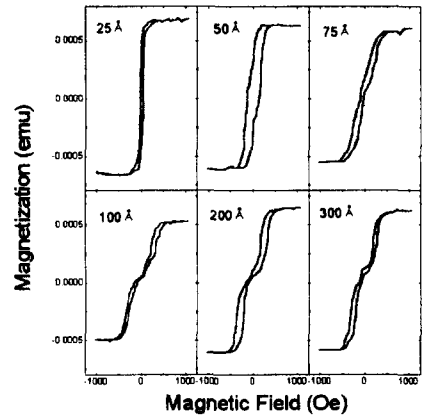


Fig. 2. Magnetization curve of Co(50 Å)/IrMn bilayer depending on IrMn thickness. Magnetic field is parallel to the bottom electrode.

Antiferro-magnet exchange interaction)에 의한 결과이다.

Fig. 2에서 Co(50 Å)/IrMn(d Å) 박막에서 IrMn의 두께변화에 따른 Hshift의 변화를 조사한 결과는 Fig. 3과 같다. 반강자성체인 IrMn의 두께가 100 Å이상인 경우 H_{shift} 는 약 250 Oe이다.

Fig. 4는 자성층의 폭을 100~500 μm으로 달리한 NiFe(183 Å)/Co(17 Å)/Al-oxide/Co(100 Å)/IrMn(100 Å) 접합을 하부 자성층의 길이방향으로 자장을 인가하여 각각 측정된 자기저항곡선이다. 자기저항거동은 자성층의 폭에 무관하게 자유층(free layer)인 NiFe/Co층과 고착층(pinned layer)인 Co층이 반평행 배열을 이루는 ±20 Oe에서 최대값을 보인다. ±20 Oe 이상의 인가자장에서는 IrMn에 고착되어 있는 Co층의 모멘트의 반전이 시작되어 TMR비(%)는 감소하고 약 ±100 Oe에서 자유층과 고착

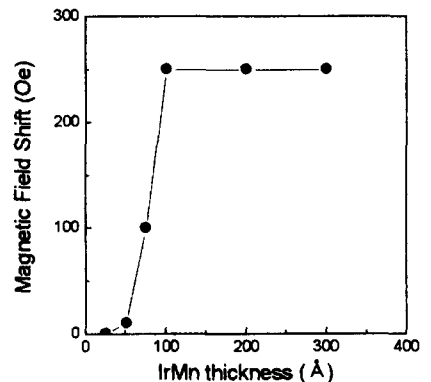


Fig. 3. Magnetic field shift of Co(50 Å)/IrMn bilayer depending on IrMn thickness.

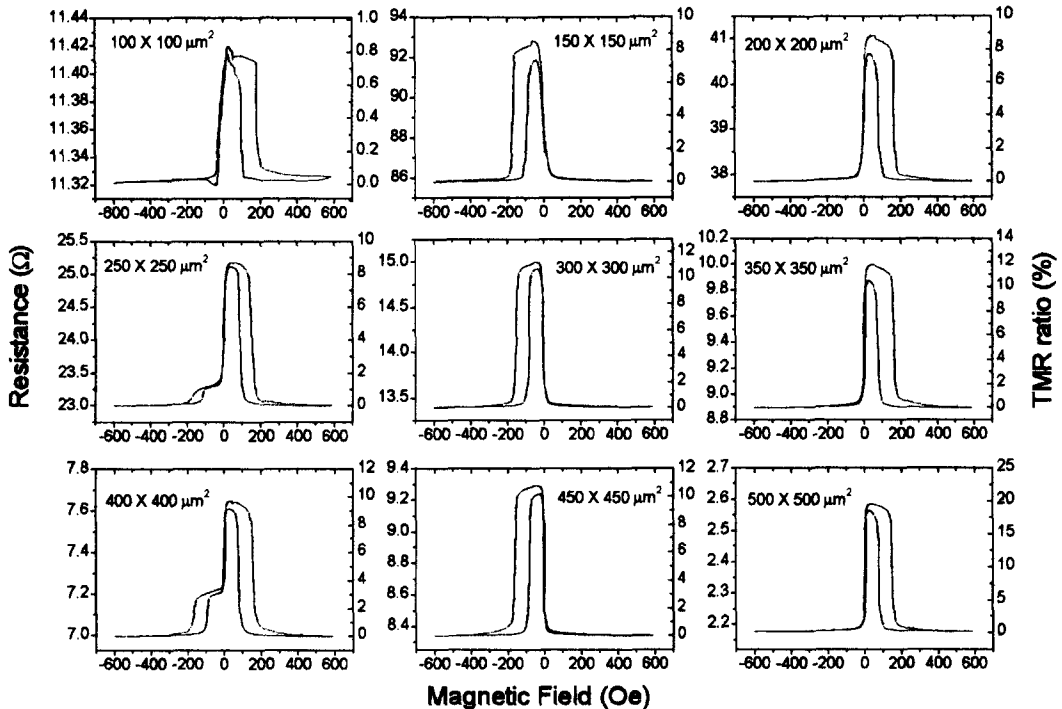


Fig. 4. Electrical resistance and TMR ratio of NiFe(183 Å)/Co(17 Å)/Al₂O₃(16 Å)/Co(100 Å)/IrMn(100 Å) junction with various active junction area. Magnetic field is parallel to the bottom electrode.

층의 평행배열이 형성되면서 자기저항거동은 포화된다. 자성층의 접합면적에 따라서 자기저항거동이 일어나는 영역이 달라지는데 이것은 각각의 제작조건에 따라서 자성층의 자화 반전이 일어나는 자장범위가 다르기 때문이라고

사료된다. 자성층의 접합면적이 증가함에 따라 TMR비는 증가하고 저항값은 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 5는 자성층의 접합 면적을 350×350 μm²로 고정된 NiFe/Co/Al-oxide/Co/IrMn 다층막의 자장 중 열처리 온도의 변화에 따른 TMR비(%)의 변화이다. 온도가 증가함에 따라 TMR비(%)는 서서히 증가하여 200 °C에서 약 23 %로 최대값을 나타내고 이보다 높은 온도에서부터 감소하여 350 °C에서는 약 2%이하로 감소한다. 이는 IrMn의 blocking temperature(T_B)가 약 240 °C이므로 250 °C 이상에서는 IrMn과 Co의 교환자기이방성이 약화되기 때문으로 판단된다.

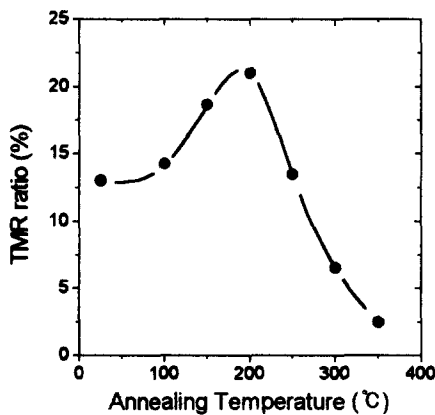


Fig. 5. TMR ratio of NiFe(183 Å)/Co(17 Å)/Al₂O₃(16 Å)/Co(100 Å)/IrMn(100 Å) junction annealed at various temperature for 1 hour in magnetic field of 330 Oe. Magnetic field is parallel to the bottom electrode.

Fig. 6은 하부 자성층의 길이방향으로 330 Oe의 자장을 인가하여 200 °C에서 1시간 동안 열처리한 NiFe/Co/Al-oxide/Co/IrMn 접합의 자기저항곡선이다. 자장 중 열처리 후에 저항은 다소 감소 하지만, TMR비(%)는 증가한다. Fig. 4에서 나타난 자기저항거동과는 달리 자장 중 열처리를 수행한 경우의 자기저항거동은 자성층의 접합 면적과는 무관하게 모든 조건에서 양(+)의 인가자장에서 관찰된다. 또한, 자성층의 접합면적이 250×250 μm²과 400×400 μm²인 시료의 자기저항곡선에서 나타나는 NiFe/Co의

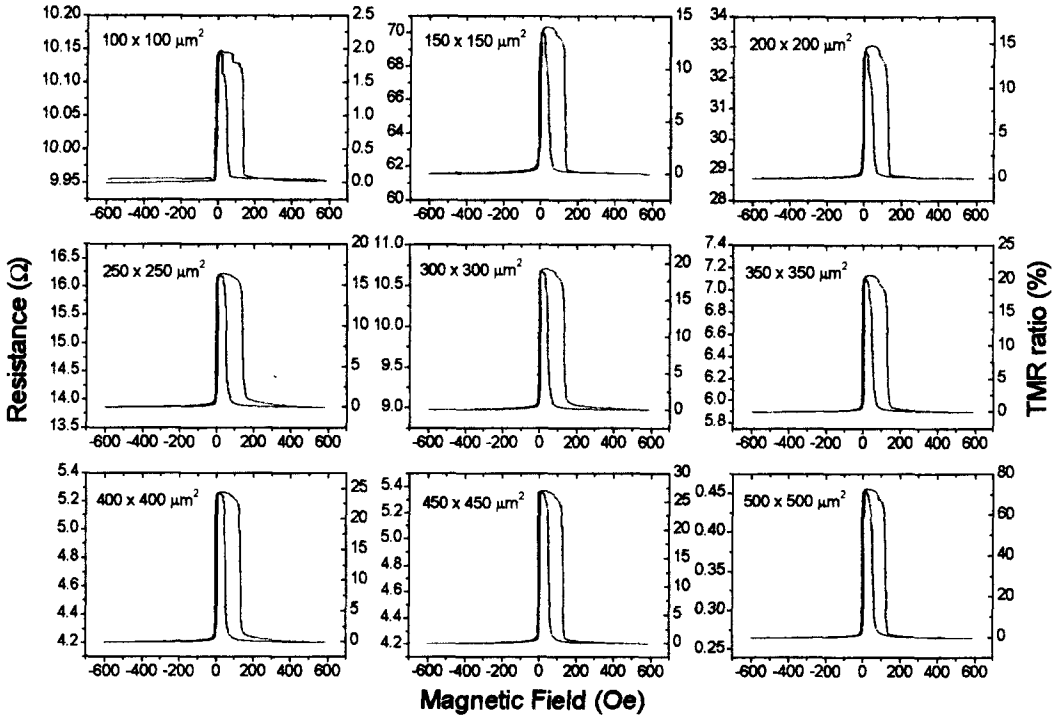


Fig. 6. Electrical resistance and TMR ratio of annealed NiFe(183 Å)/Co(17 Å)/Al₂O₃(16 Å)/Co(100 Å)/IrMn(100 Å) junction with various active junction area. The junction is annealed at 200°C for 1 hour in magnetic field of 330 Oe, parallel to the bottom electrode.

보자력 차이에 의해 형성된 step이 열처리후에 사라진다. 이러한 현상은 하부 자성층의 길이방향으로 수행한 자장 중 열처리에 의해 하부 자성층인 NiFe층과 Co층의 층간 교환에너지(exchange energy)가 증가되어 일정한 인가자장에서 두 층의 모멘트가 동시에 반전되기 때문이라고 사료된다. 따라서 이러한 교환에너지의 증가가 결과적으로 자유층과 고착층의 보다 안정적인 반평행 배열을 이루게 하고 전자산란의 거리를 증가시켜서 TMR비(%)가 증가된다고 사료된다.

Fig. 7은 자장 중 열처리를 수행한 후 시료의 자성층과 절연층간의 접합면적에 따른 저항 및 TMR비(%)의 변화이다. 접합면적이 증가할수록 저항은 감소하는 반면 TMR비는 증가한다. 접합면적의 증가에 따른 저항의 감소는 Al₂O₃의 pin hole과 같은 결함의 증가에 기인하며, 접합면적의 증가에 따른 TMR비의 증가는 접합면적이 커짐에 따라서 전극저항의 영향이 현저해져 자기저항비가 커지는 것으로 사료된다[7]. 100 μm의 폭을 가진 접합은 Al의 불균일한 성장으로 인해 절연층이 파괴되어 저항 및 TMR비(%)가 모두 적어진 것으로 생각된다. 또한 자성층의 폭이

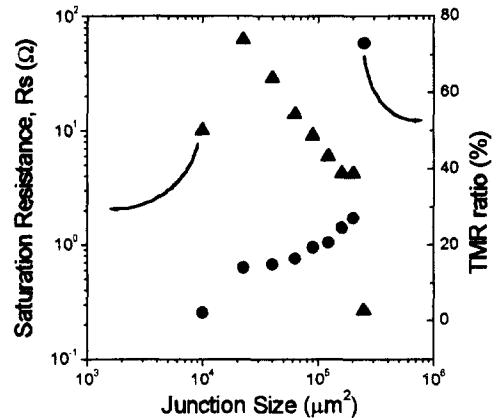


Fig. 7. Saturated electrical resistance and TMR ratio of annealed NiFe(183 Å)/Co(17 Å)/Al₂O₃(16 Å)/Co(100 Å)/IrMn(100 Å) junction as a function of active junction area. The junction is annealed at 200°C for 1 hour in magnetic field of 330 Oe.

500 μm인 접합에서는 급격한 저항의 감소와 TMR비의 증가를 나타내는데, 이러한 조건에서 제작된 접합은 너무 적은 저항을 나타내어 소자로 응용하기는 어렵다고 판단된다.

IV. 결 론

하고 저항은 오히려 감소한다.

반강자성체인 IrMn을 이용하여 NiFe/Co/Al₂O₃/Co/IrMn 형태의 spin-valve형 터널링 접합막을 제작한 후, 자장중 열처리에 따른 막의 저항 및 TMR비의 열처리 온도의 의존성과 접합면적의존성을 조사하여 다음과 같은 결론이 얻어진다.

(1) Co/IrMn 박막에서 IrMn의 두께가 약 100 Å 이상에서 강자성체와 반강자성체의 교환 상호작용이 나타나므로 100 Å 이상의 IrMn을 반강자성체로 사용한 spin-valve 형태의 NiFe/Co/Al₂O₃/Co/IrMn 터널링접합막의 제작이 가능하며 ±20 Oe에서 약 10 % 이상의 TMR비(%)를 갖는 자기저항거동이 관찰된다.

(2) NiFe/Co/Al₂O₃/Co/IrMn 접합막의 자장중 열처리에 의하여 TMR비(%)는 열처리온도의 증가에 따라 증가하여 200 °C에서 최대값을 나타낸다. 이것은 자장중 열처리에 의해 하부 자성층인 NiFe/Co의 층간 교환에너지의 증가에 기인하는 것으로 사료된다.

(3) 자성층의 폭을 100~500 μm로 변화시켜 접합면적을 달리한 시료의 TMR비(%)는 접합면적이 증가할수록 증가

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 핵심전문연구[과제번호981-0806-036-2]비 지원에 의한 결과의 일부이며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich and J. Chazelas, Phys. Rev. Lett, **61**, 2472 (1988).
- [2] B. Dieny, V. S. Speriosu, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, D. R. Wilhoit, and D. Mauri, Phys. Rev. B, **43**, 1297 (1991).
- [3] M. Julliere, Phys. Lett., **54**, 225 (1975).
- [4] T. Miyazaki and N. Tezuka, J. Magn. Magn. Mater., **139**, L231 (1995).
- [5] J. M. Daughton, J. Appl. Phys., **81**, 8 (1997).
- [6] S. Kumagai, N. Tezuka and T. Miyazaki. Jpn. J. Appl. Phys., **36**, L1498 (1997).
- [7] N. Tezuka, T. Miyazaki. Jpn. J. Appl. Phys. (in press).

Tunneling Magnetoresistance Effect for NiFe/Co/Al₂O₃/Co/IrMn Junctions

Seong-Min Hong, Han-Choon Lee and Taik-Kee Kim

School of Materials Engineering, Chungnam National University, Taejeon, 305-764, Korea

N. Tezuka and T. Miyazaki

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Tohoku University, Sendai, 980-77, Japan

(Received 12 August 1999, in final form 30 October 1999)

NiFe/Co/Al₂O₃/Co/IrMn tunneling junctions were grown on (100)Si wafer and their spin-valve tunneling magnetoresistance (TMR) was studied. The tunneling junctions were grown by using a 5-gun RF/DC magnetron sputter. Al₂O₃ barrier layer was formed by exposing Al layer to oxygen atmosphere at 60°C for 72 hours. Strong exchange coupling interaction is observed between the ferromagnetic Co and the antiferromagnetic IrMn of Co/IrMn bilayer when IrMn is 100 Å thick. NiFe(183 Å)/Co(17 Å)/Al₂O₃(16 Å)/Co(100 Å)/IrMn(100 Å) tunneling junction shows best TMR ratio of about 10% in the applied magnetic field range of ±20 Oe. The TMR ratio is improved about 23% and electrical resistance is decreased about 34% when annealed at 200 °C for 1 hour in magnetic field of 330 Oe, parallel to the bottom electrode. With increasing the active area of junction the TMR ratio increases while electrical resistance decreases.