



دانشکده علوم - گروه فیزیک

عنوان پایان نامه :

اثر ناهمواری در فصل مشترک ها بر مقاومت مغناطیسی  
تونل زنی (TMR) در  $\text{Fe/MgO/Fe}$

ارائه شده جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد  
فیزیک حالت جامد

استاد راهنما :

دکتر حسین مرادی

نگارنده :

سعیده عدالتی بوستان

شهریور 1388

تقدیم به

**خانواده ی عزیزم،**

به یاران روزهای تلخ و شیرین و همراهان همیشه همراه

## تقدیر و تشکر

سپاس خدا را که لطف و رحمت بی دریغش در لحظه لحظه ی زندگیم جاریست. در این مجال اندک از تمام کسانی تشکر می کنم که بدون کمک و محبت آنان این رساله نمی توانست به خوبی اتمام یابد.

از پدر و مادر عزیزم به دلیل کمک های روحی و معنویشان، از **خواهران** دوست داشتینم، **سمانه** و **غزاله**، به دلیل همراهی و دلسوزیشان و از **برادر** عزیزم به دلیل پشتیبانی بسیار سپاس گزارم. لطف و محبت بی دریغ آنان سبب شد تا مشکلات مسیر در نظرم کم رنگ تر جلوه گر شود. از استاد راهنمای ارجمندم، **جناب آقای دکتر مرادی** که با راهنمایی های ارزنده و دلسوزی های پدرا نه شان من را در مسیر درستی هدایت کردند، بسیار سپاس گزارم. از اساتید ارجمند، جناب **آقای دکتر سربیشه ای** و جناب **آقای دکتر عرب شاهی** به دلیل بر عهده گرفتن داوری رساله در زمان بسیار اندک سپاس گزاری می کنم. از تمامی معلمین و اساتیدی که من را تا به این مرحله رساندند تشکر می کنم و همچنین از **جناب آقای دکتر میری** مدیر گروه فیزیک و **خانم عصمت مدار** به دلیل محبت ها و کمک های بی دریغ شان سپاس گزارم.

از صمیم قلب آرزومندم که روزی قادر به جبران این همه محبت و لطف بی دریغ این عزیزان باشم.

## چکیده

در این رساله، با استفاده از تقریب بستگی قوی تک نواری و رهیافت تابع گرین، اثر ناهموازی بر مقاومت مغناطیسی تونل زنی (TMR) در پیوندگاه های Fe/MgO/Fe محاسبه شد. پدیده ی TMR در اثر تونل زنی اسپین الکترون در پیوندگاه های مغناطیسی تونل زنی مشاهده می شود. این پیوندگاه ها از لایه های فرومغناطیسی که توسط لایه ی نازک عایق از هم جدا شده اند، تشکیل شده است. به دلیل مشاهده ی مقادیر زیاد TMR برای سد بلوری MgO در دمای اتاق، این پدیده در حافظه های با دسترسی تصادفی مغناطیسی (MRAM)، حسگرها، هد خواندن داده ها در حافظه های جانبی کامپیوتر و ضبط مغناطیسی کاربرد دارد.

در پیوندگاه های حقیقی، فصل مشترک صاف نیست بلکه اتم های Fe و MgO درهم تنیده هستند. این موضوع را به دو روش بررسی می کنیم. در روش اول به دلیل افت و خیزهای موجود در فصل مشترک، میدان های الکتریکی کاتوره ای در جایگاه های فصل مشترک فرض می شود. در روش دوم، بی نظمی در فصل مشترک با جایگذاری اتم های Fe با MgO با احتمال  $n > 0/5$  منظور می شود. TMR و چگالی های جریان برای پیکربندی های موازی و پادموازی و برای هر دو نوع اسپین اکثریت و اقلیت محاسبه شد. در هر دو روش نتایج نشان می دهد که ناهموازی سبب کاهش TMR و نیز چگالی جریان در پیکربندی موازی می شود، در حالی که چگالی جریان در پیکربندی پادموازی افزایش می یابد.

## فهرست مقالات

1) **A calculation based on Green's function method for FM/MgO/FM sandwiches with roughness at interfaces**

S.Edalati Boostan, H.Moradi

**International Conference on Magnetism (ICM)**

July 26-31, 2009, Karlsruhe, Germany

2) **A calculation based on Green's function method for FM/MgO/FM sandwiches with roughness at interfaces**

S.Edalati Boostan, H.Moradi

**Journal of Physics:Condensed Matter (Impact Factor: 1.9)**

3) **Influence of Roughness at interfaces on Tunneling Magnetoresistance of Fe/MgO/Fe**

S.Edalati Boostan, H.Moradi

**International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials (NANOSMAT)**

October 19-22, 2009, Rome, Italy

4) **Influence of Roughness at interfaces on Tunneling Magnetoresistance of Fe/MgO/Fe**

S.Edalati Boostan, H.Moradi

**Journal of Nanoscience and Nanotechnology (Impact Factor: 1.987)**

# فصل 1

## مقاومت مغناطیسی

## مقدمه

امروزه مقاومت مغناطیسی تونل زنی<sup>1</sup> (TMR)، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. علت این امر، کاربردهای وسیع و مهم این نوع مقاومت به عنوان حسگرهای میدان مغناطیسی<sup>2</sup> در بسیاری از زمینه های مختلف می باشد که از آن جمله می توان به کاربردهای زیر اشاره کرد:

- کاربرد در کامپیوتر (حافظه های بادستری تصادفی غیر فرار<sup>3</sup> و ضبط مغناطیسی<sup>4</sup> و ...)
- کاربرد پزشکی (MRI و تشخیص انواع مولکول های بیولوژیکی و ...)
- کاربرد نظامی (خنثی سازی مین و موشک های هوشمند و ...)
- کاربرد محیطی (کنترل ترافیک، رباتیک و تشخیص انواع پول های جعلی و...)

برای نشان دادن اهمیت این نوع حسگر نسبت به سایر حسگرها، کاربرد حسگر TMR در کامپیوتر را بررسی می کنیم. استفاده از حسگرهای بسیار حساس TMR در هد حافظه های جانبی<sup>5</sup> به جای سایر حسگرها، چگالی داده های ذخیره شده در حافظه های جانبی و متعاقباً "سرعت خواندن و نوشتن داده ها را افزایش می دهد. شکل (1-1) منحنی افزایش چگالی ذخیره سازی داده ها را بر حسب سال نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، بیش ترین مقدار چگالی ذخیره سازی داده ها مربوط به استفاده از حسگرهای مغناطیسی TMR می باشد. نتیجه افزایش چگالی داده ها، کوچک تر شدن اندازه ی حافظه های جانبی و همچنین افزایش سرعت خواندن و نوشتن در آن ها می باشد که در تصویر بالای نمودار شکل (1-1) نشان داده شده است. علاوه بر این،

<sup>1</sup> . Tunneling magnetoresistance

<sup>2</sup> . Magnetic field sensors

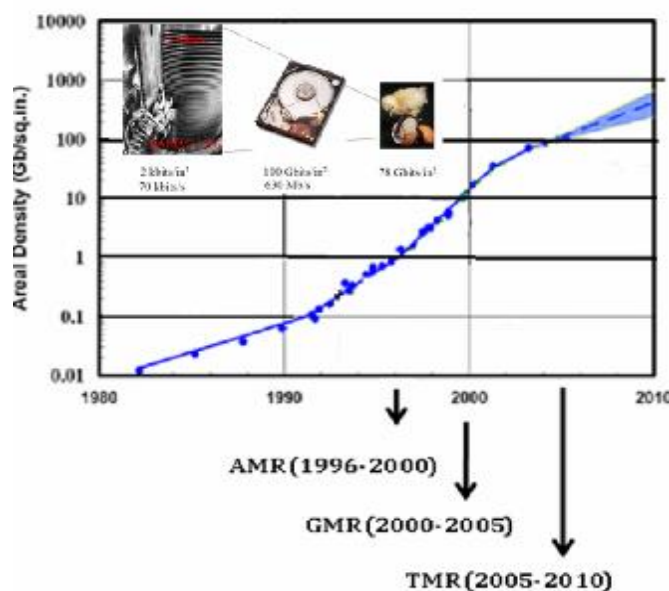
<sup>3</sup> . Non-volatile random-access memories

<sup>4</sup> . Magnetic Recording

<sup>5</sup> . Hard drive disk

درحافظه های با دسترسی تصادفی جدید که از خصوصیت اسپینی الکترون به جای بار آن استفاده می شود، با قطع برق اطلاعات ذخیره نشده از بین نمی روند. به همین دلیل این حافظه ها، حافظه های با دسترسی تصادفی غیر فرار نامیده می شوند که به راحتی نمی سوزند و تقریباً "عمر بی نهایت" دارند.

با توجه به مطالب بیان شده در ارتباط با اهمیت مقاومت مغناطیسی تونل زنی و نیز توجه به این نکته که این مقاومت یکی از انواع مقاومت های مغناطیسی است، این فصل را با تعریف مقاومت مغناطیسی<sup>1</sup> (MR) شروع کرده و سپس به معرفی انواع آن می پردازیم. در این میان توجه خود را بیش تر به پدیده ی TMR معطوف می کنیم و انواع ساختارهایی که این پدیده در آن ها مشاهده می شوند را معرفی می نماییم. در بخش پایانی این فصل نیز با استفاده از دو رهیافت انرژی و چگالی حالت ها به بررسی علت متفاوت بودن مقاومت الکتریکی در پیکربندی موازی نسبت به پیکربندی پادموازی می پردازیم.



شکل (1-1). منحنی افزایش چگالی داده ها بر حسب سال. سال ها و حسگرهای مغناطیسی مهم روی نمودار مشخص شده اند. همان گونه که منحنی نشان می دهد از سال 2005 از حسگرهای TMR به منظور افزایش چگالی ذخیره سازی اطلاعات استفاده شده است که پیش بینی می شود این روند تا سال 2010 ادامه یابد. نتیجه

<sup>1</sup> . Magnetoresistance



این افزایش، کاهش اندازه و افزایش سرعت خواندن و نوشتن در هارد درایو دیسک ها می باشد که در شکل بالای نمودار نشان داده شده است [1].

## 1-1 مقاومت مغناطیسی ( $MR$ )

مقاومت مغناطیسی مربوط به تأثیر نظم اسپینی لایه ی مغناطیسی، بر روی حرکت الکترون ها است. نظم اسپینی در حضور میدان مغناطیسی خارجی تغییر کرده و منجر به تغییر تحرک<sup>1</sup> الکترون ها می شود. تغییر تحرک الکترون ها نیز سبب تغییر در مقاومت الکتریکی سیستم خواهد شد. بنابراین مقاومت مغناطیسی یعنی تغییر مقاومت الکتریکی سیستم، در اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی که بزرگی آن از رابطه ی زیر به دست می آید.

$$MR = \frac{R(H) - R(H=0)}{R(H=0)} = \frac{\Delta R}{R} \quad (1-1)$$

$R(H)$ ، مقاومت در حضور میدان مغناطیسی خارجی است.

در ادامه به توصیف انواع مقاومت های مغناطیسی می پردازیم.

### 1-1-1 مقاومت مغناطیسی نرمال<sup>2</sup> ( $NMR$ )

مقاومت مغناطیسی نرمال در فلزهای غیر مغناطیسی و در حضور میدان مغناطیسی خارجی دیده می شود. از آن جا که به ذرات باردار متحرک (الکترون ها) در حضور میدان مغناطیسی خارجی، نیروی لورنتس،  $F = q(v \times B)$ ، وارد می شود، الکترون ها به جای حرکت بر روی مسیر مستقیم بر روی مسیر مارپیچ حرکت می کنند. حرکت مارپیچی الکترون ها سبب کاهش مسافت آزاد میانگین

<sup>1</sup> . Mobility

<sup>2</sup> . Normal magnetoresistance

مؤثر بین دو برخورد می شود و بنابراین مقاومت الکتریکی افزایش می یابد. به دلیل همین افزایش مقاومت است که این پدیده مقاومت مغناطیسی نرمال یا مثبت نامیده می شود.

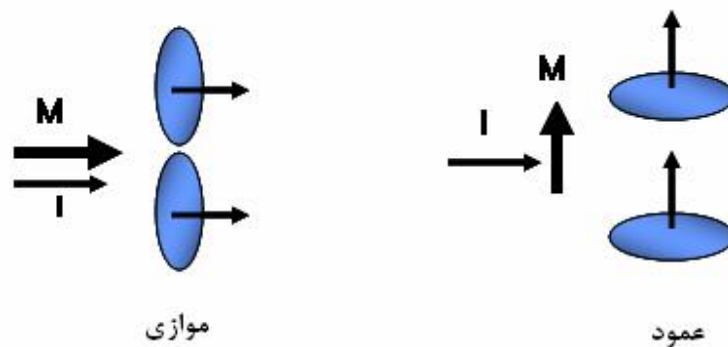
### 2-1-1 مقاومت مغناطیسی نا همسانگرد<sup>1</sup> (AMR)

مقاومت مغناطیسی نا همسانگردی در سال 1857 توسط ویلیام تامسون (لرد کلونین)<sup>2</sup> کشف شد و تا سال 1988، زمان کشف GMR، به مدت 130 سال به عنوان مهم ترین مقاومت مغناطیسی شناخته می شد. این اثر به دلیل پراکندگی نا همسانگردی، در مواد فرومغناطیسی توده ای<sup>3</sup> مانند Fe، Co، Ni رخ می دهد. درحقیقت جفت شدگی اسپین-مدار در مدارهای 3d که به دلیل اعمال میدان مغناطیسی ایجاد می شود، منشاء فیزیکی اثر AMR است. بدون برهمکنش اسپین-مدار،  $L.S=0$ ، پراکندگی الکترون های اکثریت s-d رخ نمی دهد ولی برای برهمکنش اسپین-مدار غیر صفر،  $L.S \neq 0$ ، پراکندگی چرخش اسپینی مجاز بوده یعنی الکترون های اکثریت S می توانند به حالت های اقلیت d پراکنده شوند که این امر موجب افزایش مقاومت الکتریکی سیستم می شود. همان گونه که شکل (2-1) نشان می دهد سطح مقطع پراکندگی، به دلیل نا همسانگردی مداری حالت های خالی d، برای حالت هایی که راستای مغناطش ماده با راستای جریان الکتریکی موازی با هم یا عمود بر هم باشند، متفاوت است.

<sup>1</sup>. Anisotropic magnetoresistance

<sup>2</sup>. William Thomson (Lord Kelvin)

<sup>3</sup>. Bulk

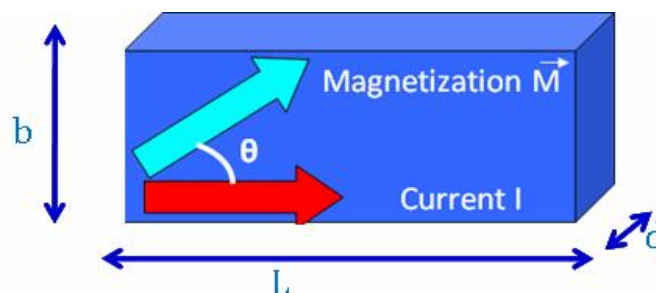


شکل (2-1). تفاوت سطح مقطع پراکندگی در حالتی که مغناطش ماده با جریان الکتریکی موازی هم هستند، نسبت به حالتی که بر هم عمودند. این تفاوت منشاء مقاومت مغناطیسی ناهمسانگردی است.

با توجه به تفاوت سطح مقطع پراکندگی در دو حالت، مقاومت لایه ی مغناطیسی برای حالتی که راستای مغناطش ماده و جریان الکتریکی با هم موازی باشند، بیش ترین مقدار خود را خواهد داشت و هرگاه این دو راستا بر هم عمود باشند، مقاومت به کم ترین مقدار خود می رسد.

تغییر زاویه ی بین دو راستای مغناطش و جریان الکتریکی توسط اعمال میدان مغناطیسی خارجی ایجاد می شود. بدین صورت که با اعمال میدان مغناطیسی به یک ماده فرو مغناطیسی، مغناطش ماده تغییر کرده و از آن جا که جریان در یک جهت ثابت اعمال می شود، زاویه ی بین مغناطش ماده و جریان الکتریکی تغییر می کند که این امر موجب تغییر مقاومت الکتریکی ماده طبق رابطه ی زیر می شود.

$$R(q) = r(q) \frac{l}{bd} = R + \Delta R \cos^2 q \quad (2-1)$$



شکل (1-3). زاویه ی بین مغناطش و جریان الکتریکی یک ماده فرومغناطیسی توده ای را نشان می دهد که با اعمال میدان مغناطیسی تغییر کرده و سبب تغییر مقاومت الکتریکی نمونه می شود.

این رابطه نیز بیان می دارد که هرگاه مغناطش ماده ( $M$ ) و جریان الکتریکی ( $I$ ) در یک راستا باشند، (موازی یا پادموازی) بیش ترین مقاومت الکتریکی ( $R$ ) و هرگاه عمود بر هم باشند، کم ترین مقاومت الکتریکی را خواهیم داشت. در این پدیده، تغییرات نسبی مقاومت الکتریکی به ازای اعمال میدان مغناطیسی خارجی در حدود 1-3% است.

### 3-1-1 مقاومت مغناطیسی ابرغول آسا<sup>1</sup> (CMR)

مقاومت مغناطیسی ابرغول آسا به دلیل پراکندگی اسپینی الکترون ها در برخی مواد توده ای ترکیبات پروسکایت منگنز، که در آن ها یون های منگنز در حالت های اکسیداسیون و گشتاورهای مغناطیسی متفاوت قرار دارند، دیده می شود. به عنوان نمونه این اثر را در ترکیب  $LaMnO_3$  که به صورت  $La^{+3} Mn^{+3} O_3^{-2}$  است، بررسی می کنیم. در این ترکیب تنها یک نوع یون منگنز،  $Mn^{+3}$ ، وجود دارد که دارای 4 الکترون در پوسته  $3d$  خود می باشد که بر اساس قوانین هوند این 4 الکترون از نظر انرژی نظم گیری موازی را ترجیح می دهند. این ترکیب عایق بوده و در زیر  $140\text{ K}$  رفتار پاد فرومغناطیسی از خود نشان می دهد.

<sup>1</sup>. Colossal magnetoresistance

با جایگزین کردن بخشی از اتم های  $La$  با اتم های  $Sr$ ، ترکیب  $La_{1-x} Sr_x MnO_3$  شکل می گیرد که دارای حالت های اکسیداسیونی به صورت  $La_{1-x}^{+3} Sr_x^{+2} Mn_{1-x}^{+3} Mn_x^{+4} O_3^{-2}$  است و دو نوع یون منگنز  $Mn^{+3}$  و  $Mn^{+4}$  در آن حضور دارند. برای این ترکیب در بازه  $0/5 < x < 0/15$  گذار از رفتار پارامغناطیسی و نیمه رسانایی به رفتار فرومغناطیسی و فلزی رخ می دهد.

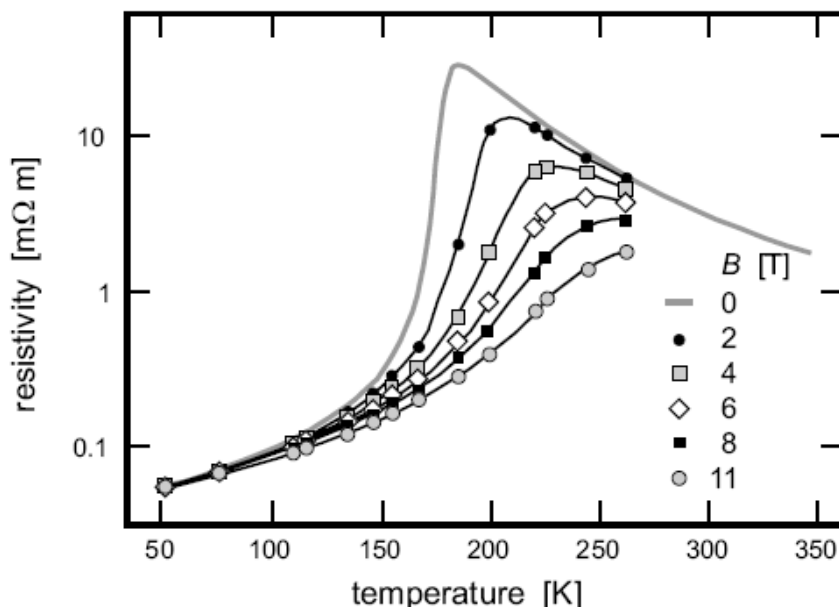
در این ترکیب الکترون باقی مانده ی  $3d$  در یون  $Mn^{+3}$  متحرک است در حالی که سایر الکترون های این یون، همانند سه الکترون یون های  $Mn^{+4}$  جایگزیده هستند. الکترون آزاد یون  $Mn^{+3}$  می تواند از طریق یون های  $O^{-2}$  به یون های  $Mn^{+4}$  منتقل شود که این امر موجب معکوس شدن حالت اکسیداسیون شده و انتقال ادامه می یابد. بنابراین الکترون تحرک پذیری<sup>1</sup> بالایی دارد.

حال جهت اسپینی را نیز در نظر می گیریم. به دلیل جفت شدگی هوند، اسپین الکترون متحرک باید با اسپین الکترون های جایگزیده موازی باشد. بنابراین جهش اسپینی تنها در صورتی می تواند رخ دهد که اسپین الکترون های جایگزیده در جایگاه های همسایه موازی باشند. آزمایش ها نشان می دهد که تحرک پذیری بالا، به نظم گیری فرومغناطیسی اتم های منگنز مجاور مربوط می شود. گذار از پارامغناطیس به فرومغناطیس مشخص کننده گذار عایق - فلز است. بی نظمی گشتاورهای اسپینی در محدوده ی پارامغناطیسی، مانع از انتقال الکترون ها شده و سبب ایجاد مقاومت الکتریکی بالایی در ترکیب می شود [2].

شکل (1-4) وابستگی دمایی مقاومت برای ترکیب  $Nd_{1-x} Pb_x MnO_3$  را با  $x = 0/5$  نشان می دهد. آزمایش ها نشان می دهد مقاومت مغناطیسی ابرغول آسا که در حضور میدان مغناطیسی منجر به کاهش بی نظمی می شود، در نزدیکی دمای کوری رخ می دهد که برای این ترکیب  $184 K$  بوده و بنابراین مقاومت الکتریکی ترکیب کاهش می یابد. در دماهای بسیار کم تر از دمای کوری، سیستم اسپینی منظم است و بنابراین میدان خارجی تأثیری بر مقاومت نخواهد داشت.

<sup>1</sup>. Mobility

بزرگی مقاومت مغناطیسی ابر غول آسا در حدود چند صد درصد در دمای اتاق بوده و تا  $10^8\%$  در دماهای پایین نیز می رسد.



شکل (4-1). مقاومت  $Nd_{1-x}Pb_xMnO_3$  با  $x=0.5$  به صورت تابعی از دما و میدان مغناطیسی اعمالی [2].

### 4-1-1 مقاومت مغناطیسی غول آسا<sup>1</sup> (GMR)

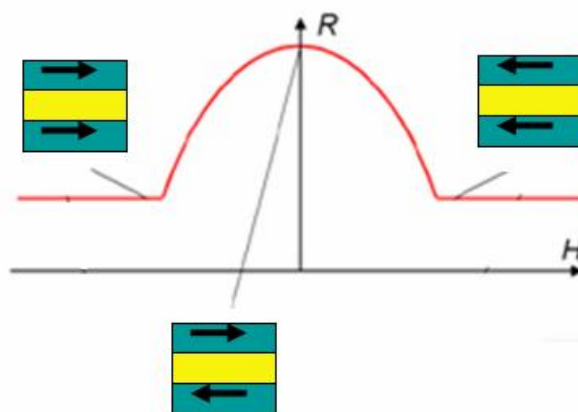
این اثر در سال 1988 توسط آلبرت فرت<sup>2</sup> [3] و پیتر گرانبرگ<sup>3</sup> [4]، برندگان جایزه نوبل سال 2007 میلادی، در چند لایه های Fe/Cr/Fe کشف شد. در حقیقت این پدیده، در لایه های فرومغناطیسی ای که توسط فیلم نازک غیر مغناطیسی یا پادفرو مغناطیسی فلزی از هم جدا شده اند، مشاهده می شود و علت آن، پراکندگی های اسپینی در فصل مشترک ها است. با اعمال میدان مغناطیسی خارجی و تغییر جهت نسبی مغناطش دو لایه ی فرومغناطیسی مجاور، مقاومت الکتریکی سیستم تغییر می کند. همان گونه که در شکل (5-1) نشان داده شده است،

<sup>1</sup>. Giant magnetoresistance

<sup>2</sup>. Albert Fert

<sup>3</sup>. Peter Grunberg

هرگاه لایه های فرومغناطیسی با هم موازی باشند، کم ترین مقاومت الکتریکی و هرگاه پادموازی باشند، بیش ترین مقاومت الکتریکی مشاهده می شود.



شکل (1-5). تغییرات مقاومت الکتریکی برحسب میدان مغناطیسی خارجی. همان گونه که شکل نشان می دهد، هرگاه دو لایه فرومغناطیسی با هم موازی باشند، کم ترین مقاومت الکتریکی و هرگاه پادموازی باشند، بیش ترین مقاومت الکتریکی را خواهیم داشت.

از آن جا که تغییرات نسبی مقاومت الکتریکی از حدود 5% تا چند صد درصد در دمای اتاق مشاهده می شود و این مقادیر نسبت به 1-3% تغییرات نسبی AMR بسیار بزرگ تر است، به این پدیده مقاومت مغناطیسی غول آسا می گوئیم که از رابطه ی زیر محاسبه می شود.

$$GMR = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P} \times 100 \quad (3-1)$$

$R_{AP}$   $R_P$  مقاومت الکتریکی سیستم در حالتی است که دو لایه فرومغناطیسی موازی (پادموازی) هستند.

## 1-1-5 مقاومت مغناطیسی تونل زنی (TMR)

این اثر در سال 1975 توسط جولیر<sup>1</sup> [5] شناخته شد، اما به دلیل نبود تکنولوژی ساخت مناسب و مقادیر بسیار کم TMR، در حدود چند درصد دردهای پایین، تا حدود 20 سال بعد مطالعه جدی ای در این زمینه صورت نگرفت تا این که در سال 1995، میازاکی<sup>2</sup> و تزوکا<sup>3</sup> [6] و همچنین مودرا و همکارانش<sup>4</sup> [7]، مستقل از هم، هر کدام مقادیر بیش از 10% را در دمای اتاق برای TMR به دست آوردند. در هر دو آزمایش از فلزهای انتقالی<sup>5</sup> به عنوان الکتروود و از اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$ ) به عنوان سد<sup>6</sup> استفاده شده بود. پس از مشاهده این نتایج، با توجه به مناسب بودن این مقادیر برای کاربردهای صنعتی و نیز ویژگی تجدید پذیری<sup>7</sup> چنین ساختارهایی، توجه زیادی به این پدیده جلب شد. سیستمی که این اثر در آن مشاهده می شود، پیوندگاه تونل زنی مغناطیسی<sup>8</sup> (MTJ) نام دارد که مهم ترین ویژگی آن، وابستگی جریان تونل زنی به جهت گیری نسبی مغناطش دو لایه ی فرو مغناطسی است که با اعمال میدان مغناطیسی خارجی قابل تغییر است. این سیستم، بسیار شبیه سیستم GMR است با این تفاوت که به جای لایه ی نازک فلزی از یک لایه عایق یا نیمه رسانای بسیار نازک، در حدود چند نانومتر یا کمتر، در بین دو لایه فلزی

فرو مغناطیسی استفاده می شود تا الکترون ها در صورت اعمال ولتاژ بایاس به دو سر الکتروودها، توانایی تونل زنی از سد عایق را داشته باشند. به همین دلیل این پدیده، مقاومت مغناطیسی تونل زنی نامیده می شود. همانند سیستم GMR و همان گونه که در شکل (1-6) نشان داده شده است، هرگاه دو لایه فرومغناطیسی باهم موازی باشند، کم ترین مقاومت الکتریکی و بیش ترین

<sup>1</sup>.Julliere

<sup>2</sup>.Miyazaki

<sup>3</sup>.Tezuka

<sup>4</sup>.Moodera et al

<sup>5</sup>.Transition metals

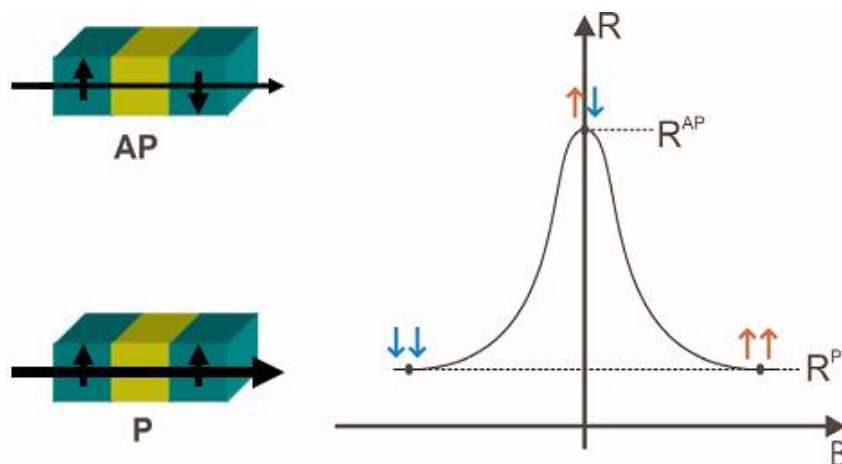
<sup>6</sup>.Barrier

<sup>7</sup>.Reproducible

<sup>8</sup>.Magnetic tunneling junction



جریان تونل زنی را خواهیم داشت و هرگاه این دو لایه، پادفرمغناطیسی باشند بیشترین مقاومت الکتریکی و کمترین جریان تونل زنی را داریم.



شکل (1-6). تغییر مقاومت الکتریکی با اعمال میدان مغناطیسی خارجی و تغییر جهت نسبی مغناطش دو لایه فرومغناطیسی مجاور.

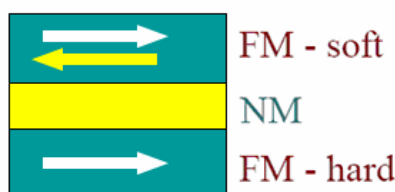
TMR می تواند در سد  $Al_2O_3$  مقادیری تا حدود 50% و در سد MgO حدود 250% داشته باشد. همان گونه که قبلاً بیان شد، به منظور مشاهده ی پدیده ی TMR در MTJ ها، لازم است که بتوانیم هر دو جهت گیری موازی و پادموازی مغناطش را بین دو لایه ی فرومغناطیس ایجاد کنیم. به این منظور از ساختارهای شبه شیراسپینی، شیراسپینی و لایه ی نازک دانه ای استفاده می شود که در زیر به توضیح تک تک آن ها می پردازیم.

### 1-5-1-1 شبه شیر اسپینی<sup>1</sup>:

احتمالاً ساده ترین روش، استفاده از دو لایه ی فرومغناطیس با میدان های اجباری ( $H_c$ ) متفاوت است. به عنوان مثال، یکی فرومغناطیس سخت، مثل Co، و دیگری نرم، مثل  $Ni_{80}Fe_{20}$ ، باشد.

<sup>1</sup>. Pseudo spin valve

هنگامی که میدان از صفر دور می شود و به مقداری بین میدان های اجباری  $20 \text{ Fe}_{80} \text{Ni}$  و  $\text{Co}$  می رسد، جهت گیری پاد موازی حاصل می شود. چرا که این میدان تنها برای غلبه بر میدان اجباری ماده فرومغناطیس نرم، کافی بوده و راستای مغناطش آن را تغییر می دهد بدون آن که راستای مغناطش ماده فرومغناطیس سخت تغییر کند، در نتیجه جهت نسبی مغناطش دو لایه فرومغناطیسی تغییر کرده و متعاقب آن مقاومت الکتریکی ماده تغییر می کند.



شکل (1-7). یک شبه شیر اسپینی که از دو ماده فرومغناطیسی سخت و نرم ساخته شده است که توسط یک لایه ی غیر مغناطیسی از هم جدا شده اند. با اعمال میدان مغناطیسی و تغییر راستای مغناطش ماده ی فرومغناطیسی نرم ، مقاوت الکتریکی نمونه تغییر می کند.

### 2-5-1-1 شیر اسپینی<sup>1</sup>:

این ساختار برای اولین بار در سال 1999 [8 و 9] معرفی شد که در آن از بایاس تبادلی<sup>2</sup> برای ثابت نگه داشتن راستای مغناطش یکی از لایه های مغناطیسی استفاده می شود. در این ساختار، یکی از لایه های فرومغناطیسی در تماس مستقیم با یک ماده ی پادفرومغناطیس، مثل  $\text{NiO}$  و  $\text{FeMn}$  قرار می گیرد. کار این لایه ، ثابت نگه داشتن جهت مغناطش ماده ی فرو مغناطیسی مجاور خود به دلیل ایجاد بر همکنش بایاس تبادلی<sup>3</sup> می باشد. به این لایه ی فرومغناطیسی، لایه ی ثابت شده<sup>4</sup> می گوئیم. حال با اعمال میدان مغناطیسی کوچک یا بزرگ، جهت مغناطش لایه ی

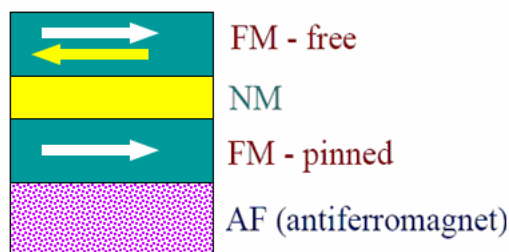
<sup>1</sup> Spin valve

<sup>2</sup> Exchange biasing

<sup>3</sup> Exchange biasing interaction

<sup>4</sup> Pinned layer

فرو مغناطیسی دیگر که به آن لایه ی آزاد<sup>1</sup> می گوئیم، تغییر می یابد. این امر موجب تغییر جهت نسبی مغناطش دو لایه فرومغناطیسی و در نتیجه تغییر مقاومت الکتریکی سیستم می شود.



شکل (1-8). یک شیر اسپینی که در آن لایه ی پادفرومغناطیسی، مغناطش لایه ی فرومغناطیسی مجاور خود را ثابت کرده و مغناطش لایه ی فرومغناطیسی دیگر با اعمال میدان مغناطیسی تغییر می کند، در نتیجه مقاومت الکتریکی نمونه نیز تغییر می کند.

حضور نا همسانگردی تبدالی<sup>2</sup> در فصل مشترک فرومغناطیس / پاد فرومغناطیس (AFM/FM)، سبب جابه جایی حلقه ی مغناطش از میدان صفر شده و بنابراین گذار مقاومت<sup>3</sup>، در حوالی میدان مغناطیسی صفر رخ می دهد، به این معنی که با اعمال میدان مغناطیسی کوچکی می توان تغییر مقاومت را در سیستم ایجاد نمود. به همین دلیل شیر اسپینی کاربرد وسیعی در صنعت دارد و حساس ترین نوع سنسور TMR محسوب می شود.

### 3-5-1-1 لایه ی نازک دانه ای<sup>4</sup>

در این ساختار رسوب های مغناطیسی وارد ماده ی عایق غیر مغناطیسی می شوند. در غیاب میدان مغناطیسی خارجی، گشتاورهای مغناطیسی دانه ها به صورت تصادفی در جهت های متفاوت قرار دارند. اعمال میدان مغناطیسی سبب می شود تا تمامی گشتاورها در جهت میدان مغناطیسی قرار گیرند و بنابراین مقاومت الکتریکی سیستم نسبت به حالت قبل کاهش یابد.

<sup>1</sup>. Free layer

<sup>2</sup>. Exchange anisotropy

<sup>3</sup>. Resistance transition

<sup>4</sup>. Granular thin film



شکل (1-9). یک لایه ی نازک دانه ای را نشان می دهد که رسوب های مغناطیسی موجود در آن با اعمال میدان مغناطیسی تغییر کرده و سبب تغییر مقاومت الکتریکی نمونه می شود.

در این بخش به توجیه تفاوت مقاومت الکتریکی در دو حالتی که راستای مغناطش دو لایه مغناطیسی مجاور با هم موازی یا پادموازی باشند، می پردازیم. به این منظور از دو رهیافت انرژی و چگالی حالت ها استفاده می کنیم.

## 2-1 رهیافت انرژی

می دانیم در سیستم های اسپینی، انرژی طبق رابطه ی  $H = -J M_1 \cdot M_2$  محاسبه می شود که در آن  $M_1$  جهت اسپین الکترون و  $M_2$  جهت مغناطش ماده است. هنگامی که الکترونی با جهت اسپینی مشخص به ماده فرومغناطیسی وارد می شود، اگر جهت اسپین الکترون با جهت مغناطش ماده ی فرومغناطیسی یکسان باشد،  $M_1 \cdot M_2 > 0$  بوده و در نتیجه  $H < 0$  و کمینه مقدار را خواهد داشت. حال اگر جهت اسپینی الکترون و مغناطش ماده در جهت مخالف هم باشند،  $M_1 \cdot M_2 < 0$  شده و بنابراین  $H > 0$  و بیشینه مقدار را خواهد داشت. در نتیجه با ورود الکترون به ماده ی فرومغناطیسی، اگر جهت اسپین الکترون با جهت مغناطش ماده متفاوت باشد، به الکترون نیروی زیادی وارد شده و بنابراین الکترون پراکنده می شود. از آن جا که پراکندگی با مقاومت رابطه ی مستقیم دارد و تعداد پراکندگی ها تعیین کننده ی میزان مقاومت سیستم است، می توانیم این نتیجه را بگیریم که هرگاه الکترونی با جهت اسپینی موافق با مغناطش ماده وارد سیستم شود، به