

مغناطومقاومت ناهمسانگرد در لایه‌های نازک $La_{0.4}Pr_{0.3}Ca_{0.3}MnO_3$

زهرا شاهزمانی و پرویز کاملی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

پست الکترونیکی: kameli@iut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲)

چکیده:

در این مقاله، مغناطومقاومت (MR) و مغناطومقاومت ناهمسانگرد (AMR) لایه‌های نازک $(LPCMO)$ $La_{0.4}Pr_{0.3}Ca_{0.3}MnO_3$ مورد بررسی قرار گرفته است. لایه‌های نازک LPCMO با استفاده از روش لیزر پالسی (PLD) بر روی زیرلایه‌های (LAO) $LaAlO_3(111)$ و (MGO) $MgO(100)$ لایه نشانی شده‌اند. با ضخامت بستگی لایه‌های نازک به روش بازتاب سنجی اشعه ایکس (XRR) ضخامت لایه‌ها حدود ۹۰ نانومتر برآورد شد. نمونه LPCMO بر روی زیرلایه LAO به علت تنش تراکمی زیاد دارای دمای گذار عایق-فلز پایین‌تری نسبت به نمونه لایه نشانی شده بر روی MGO است. همچنین مقدار MR در لایه‌های LPCMO/LAO و LPCMO/MGO به ترتیب ۵۷ و ۹۸ درصد به دست آمد. مقدار AMR بیشینه، در لایه LPCMO/MGO (۸۰ درصد) نسبت به نمونه LPCMO/LAO (۳۲ درصد) افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد که به لحاظ پتانسیل کاربردی اهمیت زیادی دارد.

واژه‌های کلیدی: منگنایت، لایه نازک، مغناطومقاومت ناهمسانگرد،

۱. مقدمه

یک ویژگی مهم در منگنایت‌ها پدیده مغناطومقاومت ناهمسانگرد (AMR)^۱ می‌باشد. پژوهشگران معتقدند که AMR یک خاصیت ذاتی از منگنایت‌هاست که با جفت‌شدگی اسپین-مدار و مغناطوالاستیک مرتبط است ولی هنوز منشأ اصلی AMR بطور دقیق مشخص نشده است [۳]. بیشتر کاربردهای منگنایت‌ها و به ویژه پدیده AMR مستلزم استفاده از لایه‌های نازک با خصوصیات الکتریکی و مغناطیسی خوب است. لایه‌های نازک خواص مغناطیسی متفاوتی نسبت به نمونه‌های تک بلور حجمی دارند. در لایه‌های نازک نواقص شبکه‌ای در حین لایه نشانی باعث افزایش انحراف یان-تله، جایگزیدگی حامل‌ها و همچنین افزایش انرژی فعالسازی برای حرکت حامل‌های بار می‌شود [۴]. همچنین تنش غیرذاتی ناشی از عدم

در سالهای اخیر منگنایت‌ها با فرمول شیمیایی $A_{1-x}B_xMnO_3$ (که در آن جایگاه یک کاتیون سه ظرفیتی از گروه فلزات خاکی نادر مانند La, Pr, Nd و B و Nd, Pr, La جایگاه یک کاتیون دو ظرفیتی از عناصر قلیایی خاکی مانند Sr, Ca, Ba و Sr است)، به دلیل ویژگی‌های جالب و کاربردهای فراوان آن مورد توجه محققان قرار گرفته است [۱ و ۲]. از جمله کاربردهای آن‌ها می‌توان به حافظه‌های مغناطیسی، حسگر دما، حسگر میدان و یخچال‌های مغناطیسی اشاره کرد. همچنین این مواد کاربردهای شیمیایی وسیعی در حسگرهای اکسیژن و الکترولیت‌های جامد در پیل‌های سوختی دارند.

^۱ Anisotropic Magnetoresistance

۳. نتایج و بحث

ضخامت لایه‌ها که با استفاده از آنالیز X-Ray (XRR) reflectometry به دست آمد حدود ۹۰ نانومتر برآورد شد. برای بررسی ویژگی‌های ساختاری، از نمونه‌ها طیف پراش اشعه ایکس تهیه شد که نتایج مربوط به آن‌ها در شکل ۱ نشان می‌دهد که لایه‌ها بر روی زیر لایه LAO در راستای (111) و بر روی زیر لایه MGO در راستای (200) رشد کرده‌اند. در لایه‌های رشد یافته بر روی زیر لایه LAO قله مربوط به لایه در زاویه کوچک‌تری از زیر لایه ظاهر شده که نشان دهنده این است که لایه تحت تنش تراکمی اعمال شده از طرف زیر لایه بدلیل کوچکتر بودن پارامتر شبکه زیر لایه LAO نسبت به ترکیب LPCMO است (شکل ۱. الف). اما در لایه‌های با زیر لایه MGO قله مربوط به لایه در زاویه بزرگتری از زیر لایه مشاهده می‌شود که نشان دهنده تنش کششی اعمال شده به لایه از طرف زیر لایه است که دلیل آن بزرگتر بودن پارامتر شبکه MGO نسبت به ترکیب LPCMO است (شکل ۱. ب). در ادامه خواهیم دید که نوع تنش وارد بر لایه از طرف زیر لایه بر رفتار الکتریکی تأثیر متفاوتی دارد. همچنین دو قله‌ای بودن قله زیر لایه MGO مربوط به تابشهای K_{α} و K_{β} است. تابشهای K_{α} بر اثر گذار الکترون لایه L به K و تابش K_{β} بر اثر گذار الکترون لایه M به K است که شدت کمتری نسبت به K_{α} دارد. فاصله بین قله‌های لایه و زیر لایه نشانگر میزان تنش وارد بر نمونه‌هاست.

جهت بررسی اثرات زیر لایه و تنش، مقاومت وابسته به دما به روش چهار میله‌ای اندازه‌گیری شد. برای بررسی رفتار مغناطومقاومت ناهمسانگرد، به نمونه‌ها میدان یک تسلا در دو حالت موازی و عمود اعمال شد. در حالت موازی، جریان (I) و میدان مغناطیسی (H) در راستای صفحه اعمال گردیده است (ρ_{\parallel}) و در حالت عمود، میدان مغناطیسی در راستای عمود بر لایه به نمونه اعمال شده است (ρ_{\perp}). شکل ۲ طرح شماتیکی جهت‌گیری میدان مغناطیسی با جریان الکتریکی اعمالی بر نمونه را نشان می‌دهد.

تطابق ثابت‌های شبکه لایه و زیر لایه بر روی همزیستی فاز در لایه‌های نازک منگنیت‌ها اثر می‌گذارد.

در سال‌های اخیر در میان خانواده منگنیت‌ها، ساختار $(La_{1-y}Pr_y)_{1-x}Ca_xMnO_3$ (LPCMO) به خاطر وجود همزیستی مورد توجه قرار گرفته است و مطالعات گسترده‌ای بر روی این ساختار انجام شده است، زیرا همزیستی فاز نقش بسیار مهمی در میزان مغناطومقاومت ناهمسانگرد ایفا می‌کند [۵]. معمولاً جدایی فاز در منگنیت‌ها در مقیاس نانومتر است اما برای ساختار LPCMO این جدایی فاز در ابعاد میکرومتر دیده شده است [۶].

این ترکیب به پارامترهای خارجی از جمله میدان-مغناطیسی، جریان الکتریکی، نور و حساسیت زیادی نشان می‌دهد. در این پژوهش پدیده‌ها مغناطومقاومت (MR) و AMR در لایه‌های نازک ترکیب $La_{0.4}Pr_{0.2}Ca_{0.3}MnO_3$ (LPCMO) با فاز غالب فرومغناطیس که بر روی زیر لایه‌های تک بلور $LaAlO_3$ (LAO) و MgO (MGO) به ترتیب با جهت‌گیری‌های (۱۱۱) و (۱۰۰)، به روش لایه نشانی لیزر پالسی تهیه شده‌اند، پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که تاکنون این نوع مطالعه بر روی زیر لایه‌های MGO انجام نشده است.

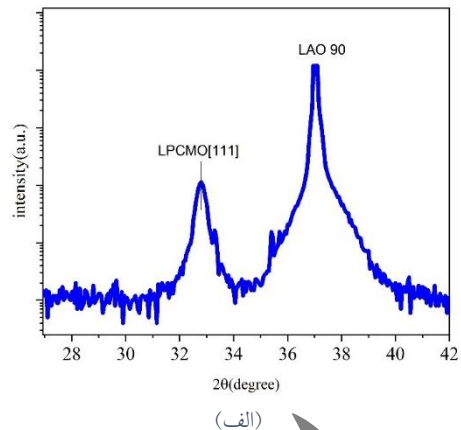
۲. مواد و روش‌ها

لایه‌های نازک LPCMO با روش لایه نشانی لیزر پالسی ساخته شدند. فرایند لایه نشانی در دمای زیر لایه ۷۳۰ درجه سانتی‌گراد، خلاء اولیه 10^{-6} تور، انرژی لیزر ۱/۹ ژول بر سانتی‌متر مربع و فشار اکسیژن با استفاده از لیزر اگزایمر ($KrF(248nm)$) انجام شد. در این پژوهش از زیر لایه‌های LAO (۱۱۱) و MGO (۱۰۰) مقاومت نمونه‌ها بر حسب دما در بازه دمایی ۳۰۰ تا ۴۰۰ کلون در حالت سرد و گرم شدن با استفاده از یخچال مدر بسته اندازه‌گیری شد. همچنین برای اندازه‌گیری مغناطومقاومت ناهمسانگرد (AMR) به لایه‌های نازک میدان مغناطیسی به اندازه یک تسلا در جهت عمودی و موازی بر جهت جریان عبوری از نمونه، اعمال شد.

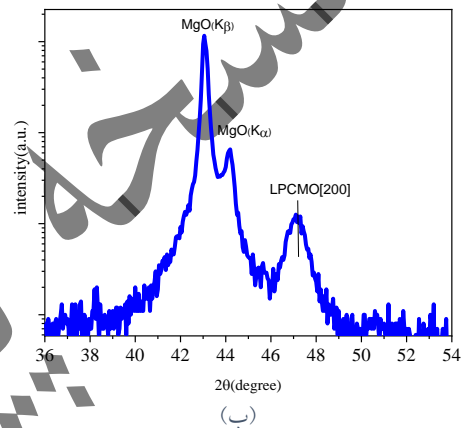
توجیه کرد که در دمای اتاق نمونه در فاز پادفرومغناطیس-عایق است. با کاهش دما (کاهش انرژی گرمایی) نظم اسپین‌ها افزایش می‌یابد و منجر به تقویت اثر برهمکنش تبدلی دوگانه می‌شود. با افزایش برهمکنش تبدلی دوگانه حوزه‌های فرومغناطیس-رسانا تشکیل می‌شود که کاهش شدید مقاومت را به دنبال دارد، و در نهایت نمونه در دماهای پایین با فاز فرومغناطیس-رسانا اشغال می‌شود نمونه LAO با این که ضخامت یکسانی با نمونه MGO دارد، ولی دارای مقاومت بسیار بیشتر و دمای گذار کمتر نسبت به این نمونه است.

جهت‌گیری فضایی [001] و [111] زیرلایه تأثیر متفاوتی بر روی ساختار ترکیب LPCMO دارند. در جهت‌گیری [001] میزان کج شدگی هشت‌وجهی‌ها MnO_6 در ساختار پروسکایتی نسبت به محور عمودی زیرلایه یکسان است. اما در مورد جهت‌گیری زیرلایه [111]، ساختار هشت‌وجهی نسبت به کناری در جهت مخالف محور عمودی کج می‌شود. در نتیجه تأثیر تنش درون صفحه‌ای در دو حالت بیان شده متفاوت است. از آنجایی که میزان و نحوه تنش بر طول و زاویه پیوند که تعیین‌کننده رفتار الکتریکی این ترکیبات است تأثیر زیادی دارد، بنابراین رفتار متفاوتی در مقاومت الکتریکی مشاهده می‌شود. وجود پسماند حرارتی در مقاومت نمونه‌ها بدلیل هم‌زیستی فازهای فرومغناطیس-رسانا و پادفرومغناطیس عایق در ترکیب LPCMO می‌باشد [Y].

همچنین ملاحظه می‌شود که اعمال میدان مغناطیسی در هر دو راستا بر روی نمونه‌ها منجر به کاهش مقاومت و افزایش دمای گذار می‌شود، چون با اعمال میدان مغناطیسی اسپین‌ها منظم‌تر و هم‌خط می‌شوند و بر اساس مدل تبدلی دوگانه دامنه پرش الکترون‌ها افزایش می‌یابد که افزایش رسانش و کاهش مقاومت را در پی دارد. دمای گذار عایق-فلز در حالت میدان عمود (ρ_{\perp}) ، به ترتیب برای نمونه LAO و MGO، ۱۱۴ و ۱۴۷ کلوین و در حالت میدان موازی (ρ_{\parallel}) ، ۱۱۸ و ۱۵۲ کلوین می‌باشد. اثر میدان مغناطیسی در حالتی که میدان موازی با جریان است، بیشتر است. چون در این حالت اسپین‌ها همسویی بیشتری با میدان تجربه می‌کنند، در نتیجه حوزه‌های فرومغناطیسی بزرگ‌تر شده و افزایش تراوش الکترون‌ها، مقاومت کمتری را ایجاد می‌کند.

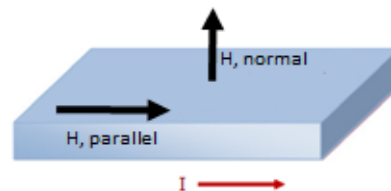


(الف)



(ب)

شکل ۱. طیف پراش پرتو ایکس لایه‌های نازک LPCMO بر زیرلایه‌های الف. LAO و ب. MGO



شکل ۲. طرح شماتیک از جهت جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی اعمالی به نمونه لایه نازک.

مقاومت نمونه‌ها در سه حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی (ρ_0) ، اعمال میدان مغناطیسی به بزرگی یک تسلا به صورت عمود بر سطح لایه (ρ_{\perp}) و موازی با سطح لایه (ρ_{\parallel}) در حالت سرد و گرم شدن اندازه‌گیری شده است. شکل ۳ نتایج اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی ابتدا با کاهش دما مقاومت نمونه‌ها افزایش یافته، سپس با کاهش بیشتر دما، نمونه LAO در دمای ۱۱۲ کلوین و نمونه MGO در دمای ۱۳۲ کلوین به فاز فلزگونه گذار می‌کنند و مقاومت آن کاهش می‌یابد. این رفتار را می‌توان به این صورت

حرارتی کم می‌باشد. دلیل این رفتار تقویت برهمکنش تبادل دوگانه و افزایش فاز فرومغناطیس می‌باشد.

تبادل دوگانه باعث افزایش انتقال حامل‌های بار می‌شود. از این رو مقاومت کاهش و دمای گذار افزایش پیدا می‌کند. منشأ مغناطومقاومت ناهمسانگرد، جفت‌شدگی اسپین-مدار در مغناطومقاومت، قطبیده شدن بیشتر اسپین‌های مغناطیسی در اثر اعمال میدان مغناطیسی است. قطبیده شدن اسپین‌ها طبق مدل اوربیتال‌های $3d$ یون منگنز است. به این صورت که با تغییر جهت میدان مغناطیسی خارجی اعمالی به نمونه، ابر الکترونی اطراف هسته تغییر می‌کند که باعث پراکندگی الکترون‌های رسانشی هنگام عبور از شبکه می‌شود.

مقدار MR و AMR برای نمونه‌ها به ترتیب طبق رابطه‌های ۱ و ۲ و در میدان مغناطیسی یک تسلا محاسبه شد که در شکل ۵ و شکل ۶ نشان داده شده است.

$$MR = \frac{\rho(0) - \rho(H)}{\rho(0)} \times 100 \quad (۱)$$

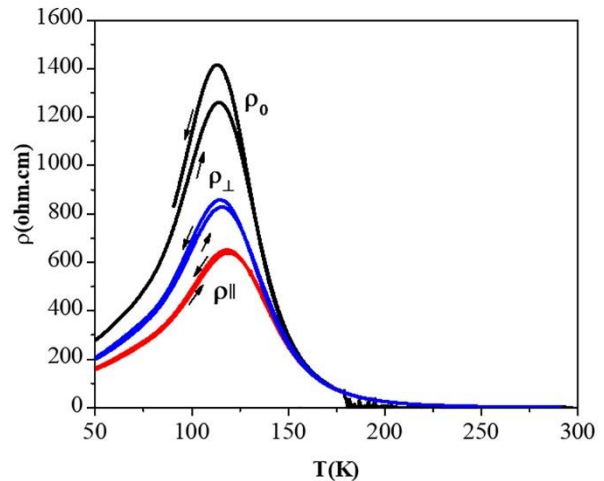
$$\rho_{av} = \left(\frac{1}{3}\right)\rho_{||} + \left(\frac{2}{3}\right)\rho_{\perp} \quad (۲)$$

شکل ۴ طرح شماتیکی از انواع تنش اعمالی بر نمونه (هشت وجهی و MnO_6) را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که تنش کششی و تراکمی تأثیر متفاوتی بر طول و زاویه پیوند در راستای موازی و عمود بر سطح لایه نازک دارند که منجر به رفتار الکتریکی متفاوت خواهد شد.

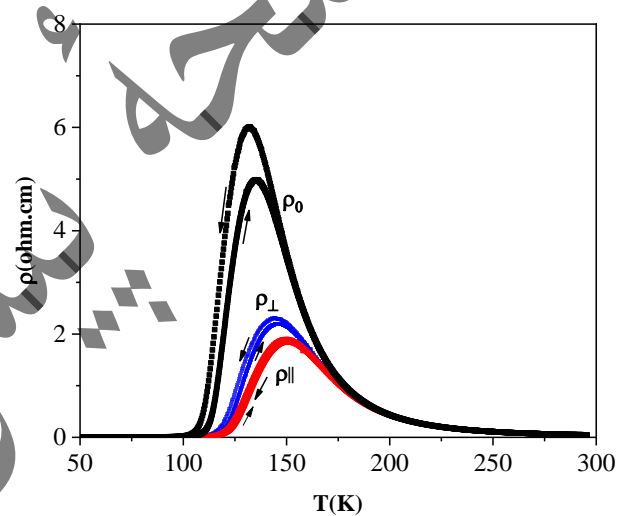
در ادامه به بررسی دو ویژگی الکتریکی مغناطومقاومت و مغناطومقاومت ناهمسانگرد نمونه‌ها پرداخته شده است. منشأ ایجاد MR و AMR متفاوت است. منشأ فیزیکی

مقادیر بیشینه MR و AMR برای نمونه LAO و MGO به ترتیب برابر ۵۷ و ۳۲ درصد و ۹۸ و ۸۰ درصد است که در حوالی دمای گذار عایق-فلز اتفاق می‌افتد. آلاگوز و همکارانش بیشینه AMR ترکیب

La_{0.4}Pr_{0.3}Ca_{0.3}MnO₃/LAO را نیز ۳۲ درصد به دست آوردند. چن و همکارانش نیز به همین نتیجه دست یافتند. اما مقدار بیشینه AMR به دست آمده برای نمونه MGO در مقایسه با مقادیر گزارش شده افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد.

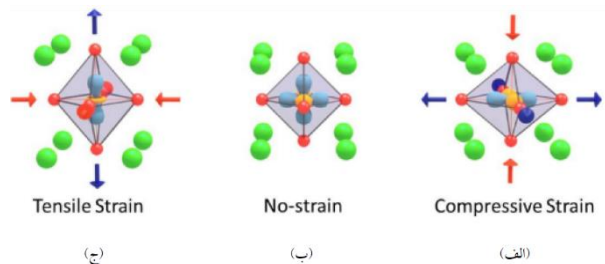


(الف)



(ب)

شکل ۳. تغییرات مقاومت بر حسب دمای لایه‌های نازک LPCMO بر زیرلایه‌های الف. LAO و ب. MGO.



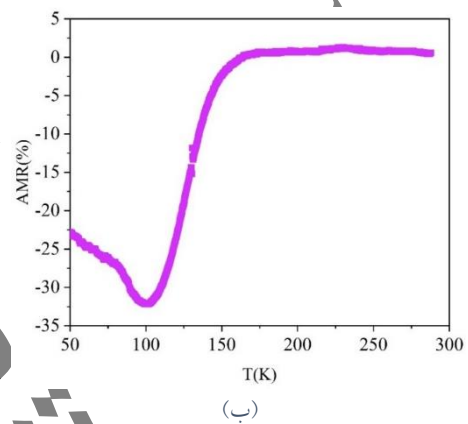
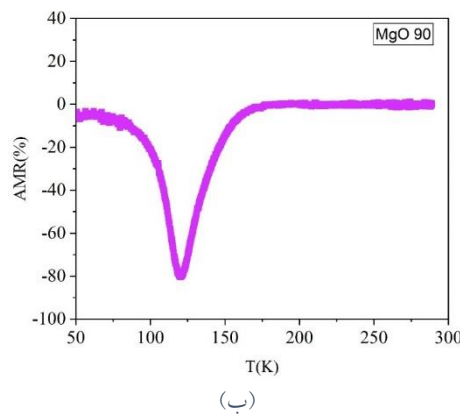
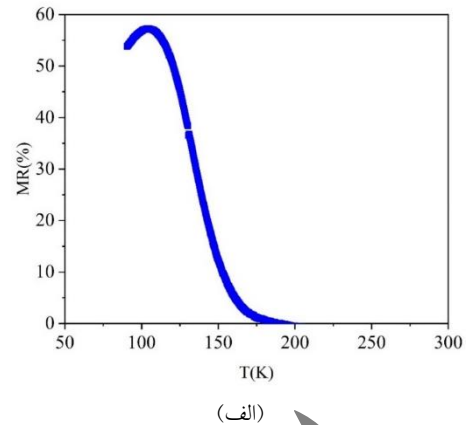
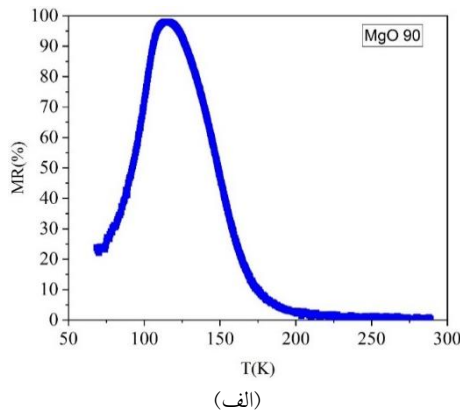
(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۴. الف) تنش کششی (ب) بدون تنش (ج) تنش تراکمی.

اما با اعمال میدان مغناطیسی عمود بر صفحه لایه به دلیل برهمکنش قوی بین مدار و شبکه و همچنین برهمکنش اسپین-مدار، اسپین‌ها همسویی کمتری با میدان خواهند داشت. اختلاف دمای گذار عایق-فلز در حالت سرد و گرم شدن در هر دو حالت (ρ_{\perp} , $\rho_{||}$) ناچیز است که نشان دهنده پسماند



شکل ۶. وابستگی دمایی لایه نازک LPCMO بر زیرلایه MgO در میدان مغناطیسی یک تسلا.

شکل ۵. وابستگی دمایی و AMR لایه نازک LPCMO بر زیرلایه LAO در میدان مغناطیسی یک تسلا.

۴. نتیجه گیری

لایه‌های نازک LPCMO با استفاده از روش لایه نشانی لیزر پالسی (PLD) بر روی زیرلایه‌های $(LaO)(LaAlO_3)$ و $(MgO)(MgO)$ تهیه شدند. نوع و جهت‌گیری بلوری زیرلایه‌ها از عوامل تأثیرگذار بر رفتار الکتریکی لایه‌های نازک منگنیت‌ها می‌باشد. مقدار MR و AMR برای نمونه LAO کمتر از نمونه MGO دست آمد. در واقع تنش تراکمی زیاد در نمونه LAO در مقایسه با تنش کششی در نمونه MGO باعث افزایش اثر یان-تلا و برهمکنش اسپین-مدار می‌شود. در نتیجه میدان مغناطیسی یک تسلا در حالت موازی و عمود قادر به تغییر محسوس در رفتار اسپین الکترون در دو حالت نسبت به هم دیگر نیست و بنابراین مقدار مغناطومقاومت ناهمسانگرد قابل توجه نمی‌باشد.

در واقع پایین بودن مقدار AMR در نمونه LAO ناشی از تنش تراکمی زیاد در نمونه است که باعث می‌شود اثرات یان-تلا قویتر و برهمکنش اسپین-مدار افزایش یابد. در نتیجه میدان مغناطیسی یک تسلا در حالت موازی و عمود قادر به تغییر رفتار اسپین الکترون نیست. لازم به ذکر است که تاکنون برای لایه نازک LPCMO بر روی زیرلایه MGO گزارشی در مقاله‌ها ارائه نشده است.

ملاحظه می‌شود که مقدار بیشینه AMR در لایه‌های MgO بیش از دو برابر لایه‌های LAO است. همچنین لازم به ذکر است که زیرلایه‌های MgO به لحاظ قیمت خیلی پایین‌تر از زیرلایه‌های دیگر مانند LAO و STO هستند. بنابراین این نتیجه به لحاظ پتانسیل کاربردی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد.

1. Y. Tokura, "Critical features of colossal magnetoresistive manganites," Reports Prog. Phys., vol. 69, no. 3, pp. 797–851, 2006.
2. Shuaizhao Jin, Xin Gu, Xiaohan Yu, Xiaoli Guan, Yixin Yan, Kaikai Wu, Liming Zhao, Yan Zhu, Shuhong Sun, Jinkun Liu, Jin Hu, Jun Zhao, Lingde Kong, Wenyun Yang, Qingming Chen, Parviz Kameli, Xiang Liu, Adjusting the K-doping of $\text{La}_{1-x}\text{K}_x\text{MnO}_3$ ($0.1 \leq x \leq 0.35$) films to obtain high TCR and LFMR at room-temperature, Applied Surface Science vol. 589, P.152905, 2022.
3. V. Agarwal, G. Sharma, P. Siwach, K. Maurya, H. Singh, Magnetism and electrical transport properties of $\text{La}_{1-x-y}\text{Pr}_y\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ($x \approx 0.42$, $y \approx 0.40$) thin films: role of microstructural disorder. Appl. Phys. A 119(3), 899–908 (2015).

۴. آدم حسین زاده، پرویز کاملی، هادی سلامتی و باقر اصلی بیکی، مطالعه اثر تهی جا در جایگاه لانتانیم روی خصوصیات ساختاری، الکتریکی و مغناطیسی ترکیب منگنیت $\text{La}_{1-x}\text{MnO}_{3+\delta}$ ، ساخته شده تحت شرایط متفاوت. مجله پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۲، شماره ۱، بهار ۹۱.

5. L. Hu et al., Static and dynamic signatures of anisotropic electronic phase separation in $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ thin films under anisotropic strain. Phys. Rev. B 97(21), 214428 (2018).
6. H. S. Alagoz, J. Desomberg, M. Taheri, F. S. Razavi, K. H. Chow, and J. Jung, "Mechanism of sign crossover of the anisotropic magneto-resistance in $\text{La}_{0.7-x}\text{Pr}_x\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ thin films," Appl. Phys. Lett., vol. 106, no. 8, p. 082407, 2015.
7. M. Zarifi, P. Kameli, M. H. Ehsani, H. Ahmadvand, H. Salamati, Effects of strain on the magnetic and transport properties of the epitaxial $\text{La}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{MnO}_3$ thin films, Journal of Magnetism and Magnetic Materials , 420, (2016) 33-38.
8. B. Zhi et al., "Effect of growth oxygen pressure on anisotropic-strain-induced phase separation in epitaxial $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{NdGaO}_3$ (001) films," J. Appl. Phys., vol. 113, no. 20, p. 203701, 2013.
9. H. Zhou, L. Wang, Y. Hou, Z. Huang, Q. Lu, and W. Wu, "Evolution and control of the phase competition morphology in a manganite film," Nat. Commun., vol. 6, no. 1, p. 8980, 2015.
10. Uehara, M., Mori, S., Chen, C. et al. Percolative phase separation underlies colossal magnetoresistance in mixed-valent manganites. Nature 399, 560–563 (1999).
11. Y. Sun, Y. Zhao, R. Wang, Electric current-induced giant electroresistance in $\text{La}_{0.36}\text{Pr}_{0.26}\text{Ca}_{0.375}\text{MnO}_3$ thin films. Chin. Phys. B-26(4), 047103 (2017).
12. S. Singh et al., "Effect of phase separation induced supercooling on magnetotransport properties of epitaxial $\text{La}_{5/8-y}\text{Pr}_y\text{Ca}_{3/8}\text{MnO}_3$ ($y \approx 0.4$) thin film," AIP Adv., vol. 5, no. 2, pp. 0–14, 2015.
13. K. H. Kim, M. Uehara, C. Hess, P. A. Sharma, and S.-W. Cheong, "Thermal and Electronic Transport Properties and Two-Phase Mixtures in $\text{La}_{5/8-x}\text{Pr}_x\text{Ca}_{3/8}\text{MnO}_3$," Phys. Rev. Lett., vol. 84, no. 13, pp. 2961–2964, 2000.
14. Rulaniya, M.S., Kumari, N., Sarita et al. Temperature-dependent magnetic and electrical behavior in the $\text{La}_{0.50}\text{Pr}_{0.50}\text{Mn}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_3$ perovskite. emergent mater. (2023).
15. J. F. Wang, Y. Zhou, D. Cao, S. J. Yu, Z. W. Jiao, and J. Gao, "Tuning competition between metallic and insulating phases with strain, light and electric field in thin films of $\text{La}_{0.39}\text{Pr}_{0.24}\text{Ca}_{0.37}\text{MnO}_3$," J. Phys. D. Appl. Phys., vol. 48, no. 17, p. 175302, 2015.
16. Y. Y. Zhao , "Influence of Lattice Strain on Phase Separation and Percolative Behaviors in a $\text{La}_{0.325}\text{Pr}_{0.3}\text{Ca}_{0.375}\text{MnO}_3$ Thin Films," IEEE Trans. Magn., vol. 51, no. 11, pp. 1–4, 2015.
17. S. Hu., "Substrate-dependent post-annealing effects on the strain state and electrical transport of epitaxial $\text{La}_{5/8-y}\text{Pr}_y\text{Ca}_{3/8}\text{MnO}_3$ films," AIP Adv., vol. 4, no. 6, p. 067109, 2014.
18. M. Zarifi, P. Kameli, A. Ghotbi Varzaneh , H. Nikmanesh, H. Ahmadvand "The correlation between anisotropic magnetoresistance and phase separation in $\text{La}_{0.4}\text{Pr}_{0.3}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{NGO}$ films" Vacuum 192 (2021) 110437.

19. L. M. Kandpal, "Magnetic anisotropy and anisotropic magnetoresistance in strongly phase separated manganite thin films," J. Magn. Magn. Mater., vol. 408, pp. 60–66, 2016.
20. N. Kambhala and S. Angappane, "Anisotropic Magnetotransport Properties of La_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃ Thin Film," Phys. Procedia, vol. 54, pp. 164–167, 2014.
21. J. Chen, "Unusual giant anisotropic magnetoresistance in manganite strips," Appl. Phys. Lett., vol. 104, no. 24, pp. 18–21, 2014.
22. M. K. Srivastava, A. Kaur, and H. K. Singh, "Carrier localization and out of plane anisotropic magnetoresistance in Nd_{0.55-x}Sm_xSr_{0.45}MnO₃ thin films," Appl. Phys. Lett., vol. 100, no. 22, p. 222408, 2012.

نسخه
پس
از انتشار