

خواص مغناطیسی اکسید روی آلائیده شده با فلزات واسطه

الهه معینی سده^{۱*}، طیبه صیاد جنگلی^۱، سیده ثریا موسوی^۲

۱- دانشکده فیزیک، دانشگاه خوارزمی، کرج

۲- دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهراء، تهران

چکیده

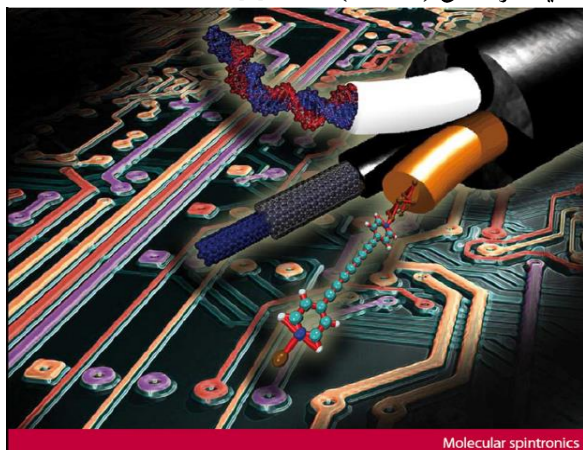
اکسید روی نیم‌رسانایی پرکاربرد و دارای ویژگی‌های منحصر به فرد از جمله باند ممنوعه بزرگ است که این ماده را در حوزه‌های مختلفی از علم وارد کرده است. از جمله این حوزه‌ها، «اسپینترونیک» است که امروزه توجهات زیادی را به خود جلب کرده است. در این بین اکسید روی آلائیده شده با فلزات واسطه خواص مغناطیسی متفاوتی از خود نشان داد که به عنوان محلول‌های مغناطیسی ضعیف در حوزه اسپینترونیک جایگاه ویژه‌ای به خود اختصاص دادند. این مقاله پس از مروری بر تئوری مغناطیسی به ارائه گزارشی از چند فلز واسطه از جمله کروم، منگنز، آهن، کبالت و نیکل به عنوان ناخالصی در اکسید روی می‌پردازد.

واژه‌های کلیدی: اکسید روی، فلزات واسطه، خاصیت مغناطیسی.

Elah.e.moeini@gmail.com: ایمیل نویسنده مسئول

۱- مقدمه

است که نقش بسیار مهمی در گستره وسیعی از کاربردها از جمله ثبت مغناطیسی دارد. حافظه‌های غیر فرار، بویژه حافظه‌های با دسترسی اتفاقی مغناطیسی (MRAMs)^۲ ساخته شده بر اساس پیوندهای تونل‌زنی مغناطیسی (MTJs)^۳، به مرحله تجاری‌سازی رسیده و در حال گسترش و جایگزینی با دیگر حافظه‌های با دسترسی اتفاقی (RAMs) یا قرارگیری در نیم‌رسانا اکسید فلز منطق (CMOS)^۴ است [۱].



شکل ۱: الگویی از طراحی ابزارهای اسپینترونیک.

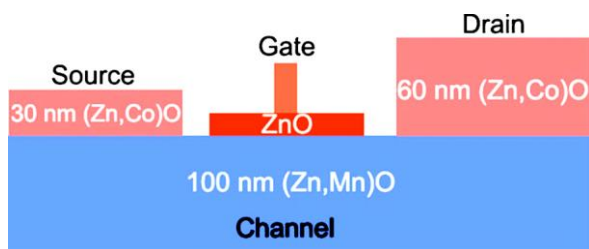
واژه‌ی اسپینترونیک -فرم اختصاری اسپین-الکترونیک است که در سال ۱۹۹۰ ابداع گردید تا افزاره‌هایی را توصیف کند که از مزایای اسپین (ویژگی کوانتوم-مکانیکی الکترون که دو مقدار اسپین بالا و پایین را دارد) بهره می‌برند. در واقع اسپینترونیک حوزه‌ای نوین از تحقیقات است که به مطالعه و به کارگیری پدیده‌هایی می‌پردازد که به اسپین الکترون‌ها مرتبط است. در این فناوری‌ها به جای انتقال اطلاعات فقط از طریق بار الکتریکی، آن‌ها را به وسیله اسپین منتقل می‌کنند. در واقع پراش وابسته به اسپین الکترون‌های رسانش مدتها قبل مشاهده شده بود اما ابداع سیستم‌های لایه‌نشانی بخار پیشرفته در سال ۱۹۸۸ منجر به مشاهده میدان مغناطیسی بزرگ وابسته به تغییرات مقاومت لایه نازک فرومغناطیسی و چندلایه‌های فلزی غیر مغناطیسی گردید. این پدیده را که مقاومت مغناطیسی بزرگ (GMR)^۱ می‌نامند، منجر به شکوفایی این شاخه علمی نوین گردید. تحقیقات در این زمینه با مطالعه بر روی گستره وسیعی از مواد و کاربردهای نوین آن‌ها در سایر زمینه‌های علمی ادامه یافت. امروزه در شبکه‌ی جهانی، اطلاعات به‌وسیله حامل‌های بار انتقال می‌یابند و ممان‌های مغناطیسی جایگزیده برای ذخیره اطلاعات به‌کار می‌روند. اما شاخه‌ای در حال پیشرفت است که در آن ابزارها از اسپین به‌عنوان انتقال‌دهنده اطلاعات استفاده می‌کنند که کارایی بالاتری نسبت به ابزارهای الکترونیکی گذشته دارد. در حال حاضر، مهم‌ترین کاربرد تجاری این افزاره‌ها شامل حسگرهای مغناطیسی

^۲ Magnetic Random Access Memories

^۳ Magnetic Tunnel Junctions

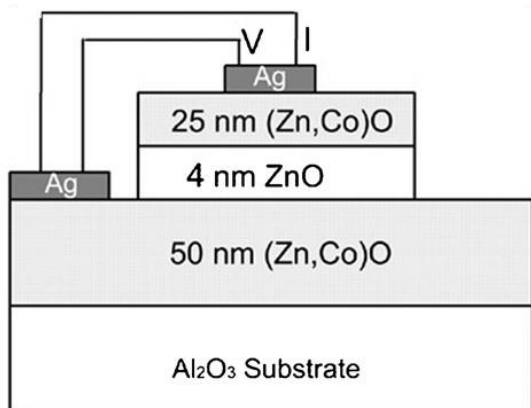
^۴ Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Logic

^۱ Giant Magneto Resistance



شکل ۳: الگوی از طرح یک ترانزیستور Spin Field Effect [۶].

برای بهبود عملکرد افزاره‌های اسپینترونیکی، لازم است مشکلات فنی از قبیل پیوندگاه‌های نامناسب، انتقالات و آشکارسازی قطبش اسپین‌ها و حامل‌های اسپینی قطبیده برطرف شوند. یکی از این مشکلات که بحثی چالشی است، انتقال حامل‌های اسپین قطبیده از اتصالات مغناطیسی به نیم‌رساناهای غیر مغناطیسی است. در حقیقت انتقال اسپین از یک قطعه اکسید روی آلاییده با فلزات واسطه به قطعه‌ای از اکسید روی خالص، یکی از اهداف مهم در ابزارهای اسپینترونیک است. بدین منظور از ابزار انتقال اسپین قطبیده در پیوندگاه استفاده می‌کنند (شکل ۴). همانطور که در شکل دیده می‌شود، دو لایه از اکسید روی آلاییده با کبالت به‌وسیله یک لایه بسیار نازک اکسید روی از هم جدا شده‌اند و از اتصالات نقره به منظور انتقال حامل استفاده شده‌است [۶].

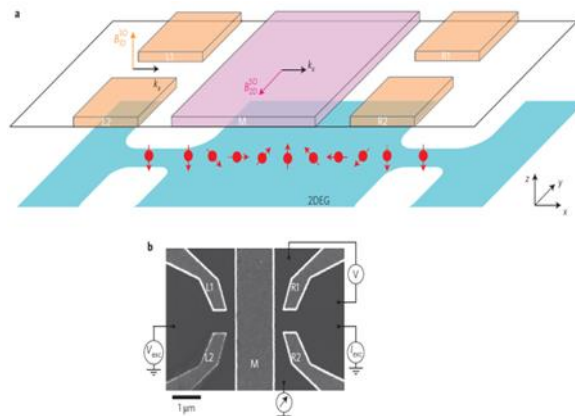


شکل ۴: الگوی از ابزار انتقال اسپین قطبیده در پیوندگاه.

۲- خلاصه‌ای از تئوری مغناطیسی

در سال‌های اخیر تلاش‌های نظری زیادی برای توضیح دقیق مکانیسم‌های برهمکنشی مغناطیسی انجام شده است و مدلهایی بر اساس تئوری میدان میانگین^۲، اول اصول محاسبات^۳، polaron مغناطیسی مقید^۴ و ... در توصیف این پدیده ارائه شده است. به دلیل پیچیدگی سیستم‌های DMS بر پایه اکسید روی، یافتن تئوری عمومی بسیار دشوار است. برای اولین بار زنر^۵ برهمکنش‌های تبادلی مغناطیسی بین حامل‌ها و یون‌های

از دیگر زمینه‌های کاربردی این شاخه‌ی جدید علمی می‌توان به اسپین ترانزیستورها، اسپین دیودها، افزاره‌های اپتو اسپینترونیک، حافظه‌ها، شیرهای اسپینی و کامپیوترهای کوانتومی اسپینی با توان مصرفی کمتر و عملکرد سریعتر و سایز کوچکتر اشاره نمود. یکی از جنبه‌های مهم کاربرد اسپینترونیک در ابزارهای امروزی، امکان تولید حامل بار اسپین قطبیده در ابزارهایی با ساختار نیم‌رسانا است. لذا در دهه اخیر بسیاری از محققین نیم‌رساناهای مغناطیسی ضعیف (DMS) را به منظور کاربردهای اسپینترونیکی مورد مطالعه قرار داده‌اند. از زمانی که Dietl و همکارانش [۲] پیش‌بینی کردند که محلول‌های مغناطیسی ضعیف بر پایه ZnO و GaN آلاییده شده با Mn در دمایی بالاتر از دمای اتاق می‌توانند خاصیت فرومغناطیسی از خود نشان دهند، این مواد در زمینه DMS‌های فرومغناطیس با دمای کوری بالا مورد توجه قرار گرفتند. درواقع نیم‌رساناهای ضعیف یا نیم‌رساناهای نیمه مغناطیسی، موادی هستند که در آن‌ها بخشی از کاتیون‌های ماده می‌توانند با یون‌های مغناطیسی (Ni, Fe, Sc, Y, La, Ce, Pr, Cu, Co, Mn, Cr) یا فلزات خاکی کمیاب (Nd, ...) جایگزین شوند. فلزات واسطه که اوربیتال d آن‌ها نیمه پر است و عناصر خاکی کمیاب که اوربیتال f پر نشده دارند، به عنوان اتم‌های مغناطیسی در DMS استفاده می‌شوند. بعنوان مثال، یک ترانزیستور اسپینی، شامل یک رساناست که بین اتصالات فرومغناطیسی ساندویچ شده است و بسیار سریعتر و کارآمدتر از ترانزیستورهای بر پایه اثرات میدان است [۴].



شکل ۲: ترانزیستور Spin Field Effect [۳].

ترکیبات II-VI مانند ZnO که با فلزات واسطه آلاییده شده‌اند، از جمله رایج‌ترین DMS‌های مورد مطالعه در این زمینه هستند [۵]. $Zn_{1-x}M_xO$ (فلزات واسطه) نه تنها به واسطه‌ی بروز خاصیت فرومغناطیسی در دمای اتاق جالب توجه هستند بلکه از نظر تشکیل مواد فرومغناطیس شفاف مورد توجه هستند.

² Mean-field theory

³ First principle calculations

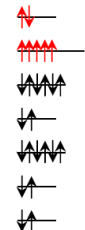
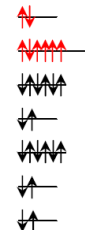
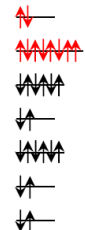
⁴ Bound magneton polaron

⁵ Zener model

¹ Dilute Magnetic Semiconductors

مغناطیسی جایگزیده را در توصیف سیستم‌های DMS ارائه داد [۸۷].

در واقع خاصیت مغناطیسی مواد به برهمکنش تبادلی مستقیم (آنتی فرومغناطیس)، برهمکنش تبادلی غیرمستقیم قوی (امکان فرومغناطیسی)، تبادل توسط حامل (فرومغناطیس) و polaronهای مغناطیسی مربوط می‌شوند. به طوری که وجود یون‌های مغناطیسی از طریق برهمکنش تبادلی sp-d بین گشتاورهای مغناطیسی جایگزیده و اسپین‌های حامل‌ها بر رفتار حامل‌های آزاد تاثیر می‌گذارد [۵]. الکترون‌های ظرفیت عناصر واسطه در اوربیتال‌های 4s کاملاً پر نیستند (همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود). در ZnO فلزات واسطه‌ای مانند Mn الکترون‌های 4s² خود را در ساختار ماده میزبان توزیع می‌کنند و به فرم TM²⁺ درمی‌آیند.

Cr	Mn	Fe	Co	Ni
4s ¹ 3d ⁵	4s ² 3d ⁵	4s ² 3d ⁶	4s ² 3d ⁷	4s ² 3d ⁸
				

شکل ۵. ساختار الکترونی برخی فلزات واسطه [۹].

در نظریه میدان میانگین خاصیت فرومغناطیسی به دلیل وجود برهمکنش‌های بین گشتاورهای موضعی حامل‌های آزاد در ماده است.

ایده‌ی بنیادی مدل برهم‌کنشی (RKKY) به بررسی جفت‌شدگی الکترون‌های نوار رسانش با یون مغناطیسی می‌پردازد [۱۰]. این جفت‌شدگی ممکن است منجر به موازی شدن گشتاورها (فرومغناطیس) و یا پاد موازی شدن آن‌ها (آنتی فرومغناطیس) شود. نظریه میدان میانگین زرنر بر اساس مدل زرنر [۷] و برهمکنش RKKY است.

در روش اول اصول محاسبات^۲ انرژی کل و ساختار الکترونیکی با استفاده از نظریه تابع چگالی در دمای T=0°K محاسبه می‌شود. این نظریه روش موافقی برای توصیف ویژگی‌های حالت پایه فلزات، نیم رساناها و نارساهاست. از تقریب‌های موثر و رایج در این نظریه تقریب چگالی موضعی^۳ و تقریب تعمیم گرادیان^۴ هستند [۱۱ و ۱۲].

علاوه بر این‌ها خاصیت فرومغناطیس در DMSها از طریق polaronهای مغناطیسی مقید نیز مشخص می‌شود [۱۳ و ۱۴]. این

مدل برای سیستم‌هایی با غلظت حامل‌های کم مانند اکسیدهای الکترونیکی جالب توجه است.

۳- خواص مغناطیسی اکسید روی آلاییده با فلزات واسطه
اسپینترونیک یا فناوری افزاره‌هایی که خواص آن‌ها به اسپین الکترون‌های رسانش بستگی دارد، اغلب مستلزم ساخت ساختارهای چند لایه‌ی نازک، با ضخامت ۱ نانومتر است. همانطور که در بخش قبل هم بیان شد، اکسید روی تحت آلائش با فلزات واسطه خواص مغناطیسی گوناگون از جمله خاصیت دیامغناطیس، پارامغناطیس، فرومغناطیس و یا اسپین گلس خواهد داشت. از این رو در این بخش، مروری داریم بر انواع مختلف این محلول‌های مغناطیسی ضعیف که در شرایط مختلف رشد از قبیل روش تهیه، میزان ناخالصی افزوده، دما و ... خواص متفاوتی از خود نشان می‌دهند. کروم، منگنز، آهن، کبالت و نیکل از جمله عناصر پرکاربردی هستند که در آلائش اکسید روی به عنوان نیم‌رسانای مغناطیسی ضعیف مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند.

کروم یکی از مهمترین عناصر فلزات واسطه است که در بسیاری از تحقیقات در این زمینه به عنوان ناخالصی در اکسید روی قرار می‌گیرد و خواص مغناطیسی این ماده را دستخوش تغییر می‌کند. برای مثال در بررسی تجربی Abdel-Baset و همکارانش رفتار فرومغناطیسی اکسیدروی آلاییده شده با کروم مشاهده شده است. دلیل این رفتار را می‌توان به جانشینی یون‌های کروم به جای یون‌های روی در ساختار شبکه اکسید روی نسبت داد که باعث ایجاد گشتاورهای مغناطیسی هم‌راستا می‌شود [۱۵]. همچنین در بررسی دیگری، wuo و همکارانش موفق شدند در همه نمونه‌های اکسیدروی آلاییده با کروم که با روش لایه‌نشانی پلاسمایی فرکانس رادیویی (RFP)^۵ سنتز کرده بودند، در دمای اتاق رفتار فرومغناطیسی را مشاهده کنند [۱۶].

عنصر دیگر منگنز است که در نتیجه‌ای از فرآیند رشد لایه به روش PLD حلالیت این عنصر در ZnO متجاوز از حد تعادل (۱۳٪) است و تا حد ۳۵٪ نیز می‌رسد [۱۶]. این در حالی است که لایه‌های نازک ZnO با غلظت Mn بالا رفتار فرومغناطیسی از خود نشان نداده‌اند.

مطابق پیش‌بینی نظریه‌های تئوری که خاصیت فرومغناطیسی را در (Zn,Mn)O اساساً در نوع p این ماده به اثبات رساندند، بررسی اثر حامل‌ها بر خواص مغناطیسی (Zn,Mn)O حاکی از آن است که نانوکریستال‌های Mn²⁺:ZnO در دمای کوری بالاتر از ۳۵۰°K خاصیت فرومغناطیسی قوی از خود نشان می‌دهند.

رفتار فرومغناطیسی همچنین در (Zn,Mn)O نوع n هم در لایه‌هایی با غلظت‌های ناخالصی منگنز 0/1 و 0/3 در دمای کوری به ترتیب ۳۰°K و ۴۵°K که به روش سل - ژل و MBE لیزری رشد یافته بود مشاهده شد [۱۷]. بررسی‌های دقیق‌تر بر اساس نتایج مشخصه‌یابی‌ها نشان داد که امکان مشاهده خاصیت فرومغناطیسی به علت رسوبات Mn₃O₄ ظاهر شده در مرز لایه و زیرلایه، محتمل تر است [۱۸].

¹ Ruderman-Kittel-Kasuya-Yoshida

² First principle calculation

³ Local Density Approximation

⁴ Generalized Gradient Approximation

⁵ Radio Frequency Plasma Deposition

اثر دما بر رفتار مغناطیسی فیلم‌های با ۲۵٪ ناخالصی به این گونه است که در یک میدان مغناطیسی مشخص، با افزایش دما خاصیت مغناطیسی کم می‌شود و یک دمای کوری مشخص مشاهده نشده است [۲۱].

۴- نتیجه‌گیری

اسپینترونیک حوزه‌ای بسیار جدید و پرکاربرد است که با تمرکز بر آن و حذف موانع، دنیای جدیدی در عصر ارتباطات پدید خواهد آمد. از طرفی ادغام اسپینترونیک با علم نیم‌رساناها پنجره‌ای رو به آینده الکترونیک است. با شناسایی نیم‌رساناهایی با گاف نواری پهن مانند اکسید روی و آلایش آن با فلزات واسطه، خاصیت مغناطیسی به این نیم‌رسانا افزوده شد و امکان استفاده از اسپین الکترون‌ها به عنوان حامل‌های بار فراهم شد. نکته مهم در این بین آلایش نیم‌رسانا با عناصر واسطه است که بسته به روش و فرایند تهیه آن امکان مشاهده رفتارهای مغناطیسی گوناگون از پارامغناطیس تا فرومغناطیس و سوپر پارامغناطیس وجود دارد.

۵- منابع

- [1] C. H. Smith, "Commercial applications of spintronics technology," *Nanomaterials*, pp. 1–8, 2004.
- [2] T. Dietl, H. Ohno, J. Matsukura, J. Cibert, and D. Ferrand, "Zener Model Description of Ferromagnetism in Zinc-Blende Magnetic Semiconductors," *Science* (80-.), vol. 287, no. 5455, pp. 1019–1022, Feb. 2000.
- [3] P. Chuang, S.-C. Ho, L. W. Smith, F. Sfigakis, M. Pepper, C.-H. Chen, J.-C. Fan, J. P. Griffiths, I. Farrer, H. E. Beere, G. A. C. Jones, D. A. Ritchie, and T.-M. Chen, "All-electric all-semiconductor spin field-effect transistors," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 10, no. 1, pp. 35–39, 2014.
- [4] T. Dietl, "Dilute magnetic semiconductors: Functional ferromagnets," *Nat. Mater.*, vol. 2, no. 10, pp. 646–8, 2003.
- [5] J. K. Furdyna, "Diluted magnetic semiconductors," *J. Appl. Phys.*, vol. 64, no. 4, pp. R29–R64, 1988.
- [6] F. Pan, C. Song, X. J. Liu, Y. C. Yang, and F. Zeng, "Ferromagnetism and possible application in spintronics of transition-metal-doped ZnO films," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 62, no. 1, pp. 1–35, 2008.
- [7] C. Zener, "Interaction between the d shells in the transition metals," *Phys. Rev.*, vol. 81, no. 3, pp. 440–444, 1951.
- [8] Ü. Özgür, Y. I. Alivov, C. Liu, A. Teke, M. A.

خاصیت فرومغناطیسی در قرص‌های توده‌ای، لایه‌های نازک و پودرهای ZnO آلاییده با Mn با ناخالصی کمتر از ۴٪ در دمای بالاتر از دمای اتاق نیز مشاهده شده‌است و ویژگی حائز اهمیت در تهیه نمونه‌های آن‌ها فرایند دمای پایین بود. به طوری که پخت در دمای کمتر از ۷۰۰ درجه سانتیگراد مانع تشکیل فازهای ثانویه و در نتیجه بروز خاصیت فرومغناطیسی می‌شود [۱۹].

با آلایش اکسید روی توسط درصدهای مختلف ناخالصی آهن خواص مغناطیسی آن به راحتی قابل کنترل است. برای مثال خاصیت فرومغناطیسی در ۲٪ ناخالصی آهن، گزارش شده است اما افزایش ناخالصی بیش از این مقدار، آن را به ماده‌ای پارامغناطیس تبدیل می‌کند. همچنین گزارش‌هایی مبنی بر مشاهده خاصیت فرومغناطیسی در نمونه‌هایی با درصد ناخالصی آهن از صفر تا ۰/۰۵ درصد در دمای اتاق نیز ارائه شده‌است که علت این رفتار ناشی از نقوص شبکه اکسید روی است. در بررسی دیگری ناخالصی ۲٪ در دمای اتاق مخلوطی از خواص دیامغناطیس و فرومغناطیس را نشان می‌دهد که البته ویژگی دیامغناطیسی آن غالب است و ۴ و ۶ درصد فرومغناطیس ضعیف است [۲۰].

وجود خاصیت فرومغناطیسی در اکسید روی آلاییده با کبالت اولین بار به صورت تئوری به برهم‌کنش تبادل دوتایی [۲۱] یا برهم‌کنش RKKY بین یون‌های کبالت [۲۲] نسبت داده شد و به صورت تجربی اولین گزارش از ویژگی فرومغناطیس در دمای اتاق توسط Ueda و همکارانش [۲۳] اعلام شد که البته قابلیت تکرار این روش کمتر از ۱۰٪ بود. پس از آن ZnO آلاییده با Co با درصد ناخالصی ۲۵٪ که به روش سل-ژل تهیه شده‌بود، خاصیت فرومغناطیسی با دمای کوری بیش از ۳۵۰°K را نشان داد. این در حالی بود که در این نمونه مغناطش و غلظت حامل‌ها با افزایش دما افزایش می‌یافت [۲۴].

آلایش ZnO با نیکل و خواص مغناطیسی آن هم از نظر تئوری و هم تجربی، در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. بر طبق نتایج عددی بر پایه محاسبات تئوری [۲۵] اکسید روی با خاصیت دیامغناطیسی در اثر آلایش با نیکل در دمای اتاق خاصیت فرومغناطیسی پیدا می‌کند و با افزایش غلظت نیکل، خاصیت مغناطیسی آن به تدریج کم می‌شود که این نتیجه با نتایج تجربی سازگاری کامل داشت [۲۶ و ۲۷]. اکسید روی را می‌توان تا ۲۵٪ با نیکل آلایش [۲۰] به گونه‌ای که برای لایه‌هایی با ناخالصی ۳–۲۵ درصد نیکل، در دمای ۲°K خاصیت فرومغناطیسی گزارش شده و در دماهای بالاتر از ۳۰°K رفتار مغناطیسی آن تغییر کرده و خاصیت سوپرپارامغناطیس از خود نشان داده است.

در جایی دیگر رفتار مغناطیسی لایه‌های ZnO لایه نشانی شده به روش PLD در ۳۰۰ درجه سانتیگراد آلاییده با درصدهای مختلف نیکل شامل ۱، ۳، ۵، ۱۰ درصد بررسی شد که فیلم‌های آلاییده با مقادیر ۱ و ۳ درصد رفتار فرومغناطیس نشان دادند. فیلم با ناخالصی ۲۵٪ در دمای ۲°K رفتار فرومغناطیسی واضحی از خود نشان داد اما این خاصیت در دمای بالاتر از ۳۰°K از بین رفت و در دمای ۳۰۰°K رفتار سوپرپارامغناطیسی مشاهده شد.

- transparent thin films of Mn-doped ZnO,” *Nat. Mater.*, vol. 2, no. 10, pp. 673–677, 2003.
- [20] T. Wakano, N. Fujimura, Y. Morinaga, N. Abe, a. Ashida, and T. Ito, “Magnetic and magneto-transport properties of ZnO:Ni films,” *Phys. E Low-dimensional Syst. Nanostructures*, vol. 10, pp. 260–264, 2001.
- [21] K. Sato and H. Katayama-Yoshida, “Stabilization of ferromagnetic states by electron doping in Fe-, Co- or Ni-doped ZnO,” *Japanese J. Appl. Physics, Part 2 Lett.*, vol. 40, no. 4 A, pp. L334–L336, 2001.
- [22] A. F. Jalbout, H. Chen, and S. L. Whittenburg, “Monte Carlo simulation on the indirect exchange interactions of Co-doped ZnO film,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, no. 12, pp. 2217–2219, 2002.
- [23] K. Ueda, H. Tabata, and T. Kawai, “Magnetic and electric properties of transition-metal-doped ZnO films,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, no. 7, pp. 988–990, 2001.
- [24] H.-J. Lee, S.-Y. Jeong, C. R. Cho, and C. H. Park, “Study of diluted magnetic semiconductor: Co-doped ZnO,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, no. 21, p. 4020, 2002.
- [25] J. M. Wesselinowa and A. T. Apostolov, “A possibility to obtain room temperature ferromagnetism by transition metal doping of ZnO nanoparticles,” *J. Appl. Phys.*, vol. 107, no. 5, 2010.
- [26] G. J. Huang, J. B. Wang, X. L. Zhong, G. C. Zhou, and H. L. Yan, “Synthesis, structure, and room-temperature ferromagnetism of Ni-doped ZnO nanoparticles,” *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 15, pp. 6464–6468, 2007.
- [27] Z. X. Cheng, X. L. Wang, S. X. Dou, K. Ozawa, H. Kimura, and P. Munroe, “Fabrication, Raman spectra and ferromagnetic properties of the transition metal doped ZnO nanocrystals,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 40, no. 21, pp. 6518–6521, 2007.
- Reshchikov, S. Doğan, V. Avrutin, S. J. Cho, and H. Morkoç, “A comprehensive review of ZnO materials and devices,” *J. Appl. Phys.*, vol. 98, no. 4, pp. 1–103, 2005.
- [9] C. Liu, F. Yun, and H. Morkoç, “Ferromagnetism of ZnO and GaN: A Review,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 16, no. 9, pp. 555–597, 2005.
- [10] T. Story, R. R. Galazka, R. B. Frankel, and P. A. Wolff, “Carrier-concentration-induced ferromagnetism in PbSnMnTe,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 56, no. 7, pp. 777–779, 1986.
- [11] A. K. Rajagopal and J. Callaway, “Inhomogeneous electron gas,” *Phys. Rev. B*, vol. 7, no. 5, pp. 1912–1919, 1973.
- [12] W. Kohn and L. J. Sham, “Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects,” *Phys. Rev.*, vol. 140, no. 4A, pp. A1133–A1138, 1965.
- [13] T. Dietl, F. Matsukura, and H. Ohno, “Ferromagnetism of magnetic semiconductors--Zhang-Rice limit,” *Phys. Rev. B*, vol. 66, p. 33203, 2002.
- [14] D. M. L., *Chapter 4: Magnetic Properties of Solid Materials*. 2011.
- [15] T. A. Abdel-Baset, Y.-W. Fang, C.-G. Duan, and M. Abdel-Hafiez, “Magnetic Properties of Chromium-Doped ZnO,” *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 29, no. 7, pp. 1937–1942, 2016.
- [16] T. Fukumura, Z. Jin, A. Ohtomo, H. Koinuma, and M. Kawasaki, “An oxide-diluted magnetic semiconductor: Mn-doped ZnO,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 75, no. 21, p. 3366, 1999.
- [17] S. W. Jung, S. J. An, G. C. Yi, C. U. Jung, S. I. Lee, and S. Cho, “Ferromagnetic properties of Zn_{1-x}Mn_xO epitaxial thin films,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, no. 24, pp. 4561–4563, 2002.
- [18] Y. M. Kim, M. Yoon, I. W. Park, Y. J. Park, and J. H. Lyoo, “Synthesis and magnetic properties of Zn_{1-x}Mn_xO films prepared by the sol-gel method,” *Solid State Commun.*, vol. 129, no. 3, pp. 175–178, 2004.
- [19] P. Sharma, A. Gupta, K. V Rao, F. J. Owens, R. Sharma, R. Ahuja, J. M. O. Guillen, B. Johansson, and G. a Gehring, “Ferromagnetism above room temperature in bulk and