

خواص نوری - مغناطیسی و ضرایب اپتیکی لایه‌های نازک منگنز-کبالت

ابراهیم عطاران کاخکی^۱ و مهدی عادل^۲ فرد^۲

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم دانشگاه فردوسی، مشهد صندوق پستی ۹۱۷۷۵/۱۴۳۶

۲. گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، مشهد

پست الکترونیکی: attaran@ferdowsi.um.ac.ir

(دریافت مقاله: ۸۶/۱۲/۷؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۷/۷/۱۲)

چکیده

با گسترش فناوری اطلاعات و ارتباطات، استفاده از نور قطبیده لیزر، برای کاربردهای مهمی چون کلیدزنی و ذخیره اطلاعات در لایه‌های نازک فرومغناطیس و فرو الکترونیک، مورد توجه قرار گرفته است [۱]. برای انجام تحقیق و افزایش کاربری این لایه‌ها، رسم دقیق پسماندنوری و مغناطیسی لایه‌ها بسیار مهم است. در این تحقیق با استفاده از نور لیزر قطبیده شده خطی، مدارهای الکترونیکی خاص و نیز نرم افزار ویژه‌ای که برای ثبت اطلاعات و پردازش آنها طراحی شد سیستمی ساخته شده است که توانایی رسم دقیق پسماند الکترونیکی و مغناطیسی را داراست. در تحقیق انجام شده خواص نوری و مغناطیسی لایه‌های نازکی از منگنز - کبالت به صورت تک لایه‌ای و دولایه‌ای بر روی بستر شیشه‌ای بررسی شده است. لایه‌ها به روش اسپری پایرولیز و در شرایط متفاوت و لازم برای هر لایه به طور جداگانه با کنترل دما و فشار و میزان آهنگ اسپری لایه گذاری گردیده است. لایه‌های ساخته شده شامل تک لایه‌های: اکسید کبالت، اکسید منگنز و لایه‌های ترکیبی از منگنز و کبالت با فرمول شیمیایی متناسب عنصری به صورت $Mn_xCo_{1-x}O_4$ ($0 \leq x \leq 1$) و دولایه‌ای منگنز و کبالت به صورت MnO/Co_3O_4 می‌باشند. با توجه به این که در لایه نشانی دمای بستر، آهنگ اسپری و تمیزی سطح بستر از اصول مهم هستند، با رعایت این موارد لایه‌های نازک یکنواخت بر روی بستر شیشه‌ای جایگذاری شد. اندازه‌گیری چرخش اثر فارادی و اثر کر برای لایه‌های ذکر شده توسط سیستم پسماند رسم اپتیکی انجام گرفت و خواص اپتیکی لایه‌ها نیز با استفاده از نرم افزاری که بدین منظور براساس مطالعه روش تئوری سان - پل (Swane Poel) آماده شد محاسبه و تعیین شدند. اندازه‌گیریها نشان می‌دهند که اولاً لایه‌ها در مقادیر کم منگنز نسبت به کبالت (کمتر از ۲۰٪) با توجه به حلقه پسماند فرومغناطیس‌اند. ثانیاً، میزان چرخش نورقطبیده خطی در لایه‌های ترکیبی نسبت به لایه خالص اکسید کبالت افزایش می‌یابند. از طرفی نتایج به دست آمده از خواص اپتیکی نشان می‌دهد که لایه اکسید کبالت دارای دو مقدار مجازگاف انرژی بوده که در توافق با مطالعات قبلی در این زمینه بوده و از طرفی بررسیها نشان داد که در لایه‌های ترکیبی منگنز و کبالت با افزایش نسبت منگنز به کبالت تا میزان ۲۰٪، مقادیرگاف انرژی تا حدود ۱۳eV/۰ کاهش یافتند.

واژه‌های کلیدی: نوری-مغناطیسی، اثر فارادی، اثر کر

۱. مقدمه

انتقال سریع داده‌ها گشود. نشانند اطلاعات دیجیتالی به صورت صفر و یک بر روی باریکه‌ای از لیزر، اساس انتقال اطلاعات به وسیله لیزر است و برای این کار به ابزاری به نام مدوله‌ساز نیاز است که بتواند در سرعت‌های بالا و به شیوه‌ای نظام یافته، تغییری در موج ایجاد کند. این تغییر می‌تواند چرخش راستای قطبش نور لیزر باشد. به بیان ساده‌تر می‌توان یک راستای مشخص را به عنوان صفر و راستای دیگر را به

امروزه با گسترش فن آوری اطلاعات، انتقال سریع اطلاعات و داده‌هایی که به خاطر پیشرفت سریع علوم در عرصه‌های مختلف تولید می‌شود، اهمیت فراوان یافته است. علاوه بر این ذخیره حجم عظیم این اطلاعات و بازخوانی مجدد آنها امری است که مشکلات زیادی را ایجاد کرده است. کشف لیزر و ساخت فیبرهای باریک شیشه‌ای، دریچه‌ای جدید را برای

نازک منگنز- کبالت به روش اسپری پایرولیز می‌پردازیم، بنابراین با توجه به مطالعه کارهای انجام شده در زمینه جایگذاری این لایه‌ها به روش اسپری پایرولیز، جایگذاری لایه‌ها مطابق پارامترهای جدول زیر انجام شده است.

در فرآیند جایگذاری لایه بر روی بستر به روش اسپری، محلولی که از قبل جهت اسپری آماده شده است توسط گاز یا هوای فشرده به صورت پودر در می‌آید طوری که آنها به شکل ریز قطره‌هایی به بستر می‌رسند. واکنشهای شیمیایی به صورتی انتخاب می‌شوند که غیر از محصول مورد نظر در دمای لایه نشانی، مواد دیگر حاصل از واکنش فرار باشند.

شکل ۱ یک نوع سیستم اسپری را نشان می‌دهد. اجزای تشکیل دهنده آن عبارت‌اند از: افشانه اسپری، محلول ازپیش آماده شده، گرم کننده بستر، کنترل کننده دما و هوای متراکم یا گاز فشرده. در این روش عمل جایگذاری اسپری به صورت عمودی و مایل با حرکات منظم مانا یا خطی افشانه اسپری به طور متناوب صورت می‌گیرد. خصوصیات لایه بستگی به آهنگ آنیون به کاتیون، آهنگ اسپری، دمای بستر، گاز حامل، سایز ریز قطره‌ها و همچنین آهنگ سرد شدن پس از جایگذاری دارد. ضخامت لایه بستگی به فاصله بین افشانه اسپری و بستر، کمیت و همچنین کیفیت محلول اسپری شده دارد [۲]. پارامترهای جایگذاری لایه‌های نازک منگنز-کبالت در جدولهای ۱ و ۲ و ۳ آمده است.

۳. اندازه‌گیری چرخش کر و فارادی

برای انجام آزمایشهای لازم و تحقیق در مورد رفتار نوری-مغناطیسی لایه‌ها، از طر حواره زیر (شکل ۲) استفاده گردید. ابتدا یک توصیف کلی از چگونگی عملکرد سامانه فوق را بیان نموده و سپس به معرفی اجزای سامانه و کاربرد هر یک از آنان می‌پردازیم. با توجه به آنکه راستای قطبش نور قطبیده، در هنگام گذر یا بازتابش از یک لایه فرو مغناطیس که در مجاورت میدان قرار گرفته است می‌چرخد و میزان این چرخش با شدت میدان اعمالی و به تبع آن میزان پذیرفتاری ماده رابطه دارد، می‌توان با ثبت تغییرات شدت در میدانهای مختلف و محاسبه

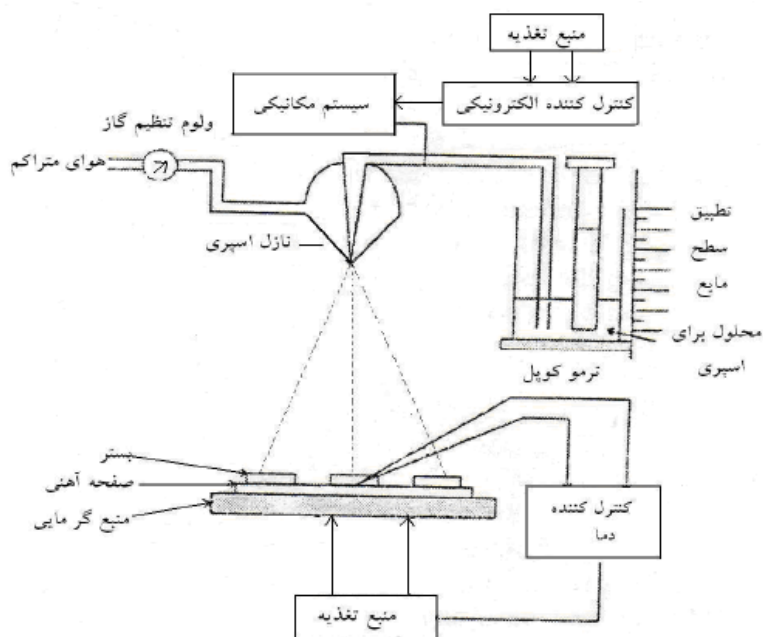
عنوان یک در نظر گرفت تا در آنسوی فیبر نوری به وسیله یک صفحه قطبشگر این صفر و یکها از هم جدا شوند. با استفاده از خواص نوری-مغناطیسی لایه‌های فرومغناطیسی یعنی اثر نوری-مغناطیسی کرواثر نوری-مغناطیسی فارادی می‌توان چنین مدوله‌سازی را ساخت.

بازخوانی سریع داده‌ها از روی صفحات مغناطیسی نیز با استفاده از خواص نوری-مغناطیسی لایه‌های فرومغناطیس امکان پذیر است. با اندازه‌گیری میزان چرخش راستای قطبش نور بازتابیده از سطح یک لایه مغناطیده، می‌توان صفر و یکها را از هم تفکیک کرد و اطلاعات را بازخوانی نمود. استفاده از این روش برای بازخوانی اطلاعات باعث کوچکتر شدن حوزه ثبت می‌شود، چرا که بازخوانی با هدهای مغناطیسی احتیاج به سطحی وسیعتر از لبه هد دارد. بدین ترتیب می‌توان شاهد افزایش چگالی ثبت اطلاعات تا چند ترا بایت در اینچ مربع بود. علاوه بر این سرعت بازخوانی اطلاعات نیز به طور چشمگیری افزایش خواهد یافت.

۲. ساخت لایه‌های نازک منگنز-کبالت

مواد مغناطیسی تنوع پیچیده‌ای از الگوها و ساختارهای منحصر به فردی را در مقیاسهای مختلف از خود نمایش می‌دهند. روشهایی که چنین نمونه‌هایی ساخته می‌شوند در حال حاضر به خاطر کلیدی بودن آنها در فناوریهای مربوط به حسگرها، وسایل حافظه و ثبت داده‌ها از اهمیت خاصی برخوردارند. به طور کلی روشهایی که به منظور جایگذاری لایه‌های نازک مغناطیسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند عبارت‌اند از: اسپاترینگ، جایگذاری بخار شیمیایی، جایگذاری از محلول شیمیایی، جایگذاری الکترو شیمیایی، روش فرو بردن در محلول، روش سل-ژل، روش اسپری پایرولیز، جایگذاری پالس-لیزر. از آن جا که هر یک از روشهای فوق پتانسیل معینی در تهیه لایه‌های نازک دارا می‌باشند، بنابراین جهت بررسی مشخصه‌های خاصی از لایه‌ها تنها بعضی از روشهای مذکور ارجحیت دارند.

در این تحقیق به بررسی خواص نوری مغناطیسی لایه‌های



شکل ۱. نمایی از سامانه اسپری پایرولیز.

جدول ۱. پارامترهای لازم برای جایگذاری لایه اکسید کبالت و لایه‌های ترکیبی منگنز و کبالت.

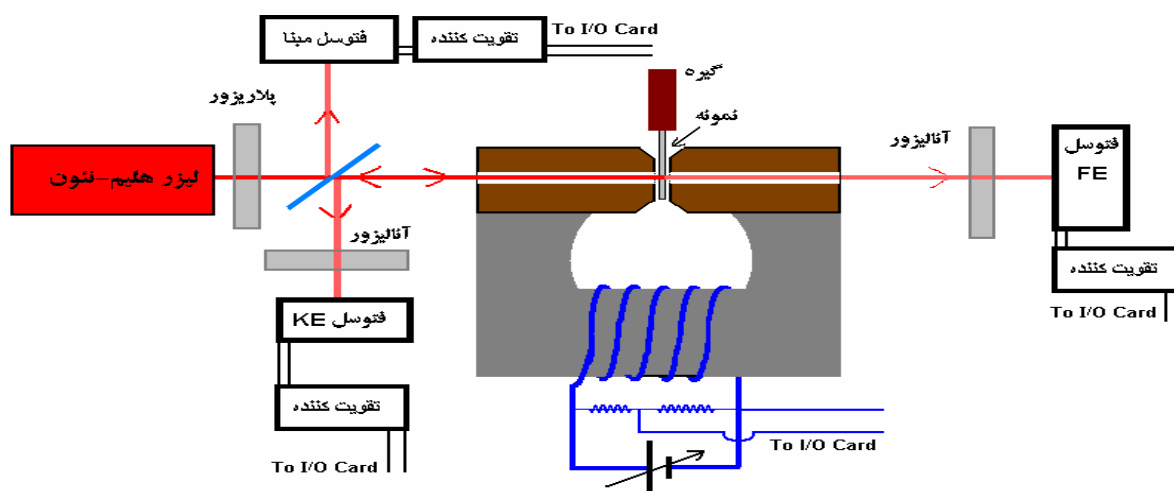
آهنگ اسپری	ارتفاع نازل تا بستر	دمای بستر	فشار هوا	حجم محلول اسپری	محلول	لایه
۱۰ cc/min	۴۵ Cm	۳۰۰ °C	۲/۵ bar	۲۰ cc	CoCl _۲ , distilled water	Co _۲ O _۳
۱۰ cc/۳min	۴۵ Cm	۳۰۰ °C	۲/۵ bar	۲۰ cc	Mn(NO _۳) _۲ ·۴H _۲ O, Co(NO _۳) _۲ ·۶H _۲ O, distilled water	Mn _{۰.۷۵} Co _{۲.۷۵} O _۳
۱۰ cc/۳min	۴۵ Cm	۳۰۰ °C	۲/۵ bar	۲۰ cc	Mn(NO _۳) _۲ ·۴H _۲ O, Co(NO _۳) _۲ ·۶H _۲ O, distilled water	Mn _{۰.۵} Co _{۲.۵} O _۳

جدول ۲. شرایط لایه نشانی برای دو لایه‌ای اکسید منگنز بر روی اکسید کبالت (MnO/Co_۲O_۳).

مر احل اسپری	محلول	حجم محلول	دمای بستر	فشار هوا	ارتفاع نازل تا بستر	آهنگ اسپری
۱	کلرید کبالت در آب مقطر	۲۰ cc	۳۰۰ °C	۲/۵ bar	۴۵ cm	۱۰ cc/min
۲	نترات منگنز در آب مقطر	۲۰ cc	۳۰۰ °C	۲/۵ bar	۴۵ cm	۱۰ cc/min

جدول ۳. شرایط لایه نشانی برای دو لایه‌ای اکسید کبالت بر روی اکسید منگنز Co_۲O_۳ / MnO.

مر احل اسپری	محلول	حجم محلول	دمای بستر	فشار هوا	ارتفاع نازل تا بستر	آهنگ اسپری
۱	نترات منگنز در آب مقطر	۲۰ cc	۳۰۰ °C	۲/۵ bar	۴۵ cm	۱۰ cc/min
۲	کلرید کبالت در آب مقطر	۲۰ cc	۳۰۰ °C	۲/۵ bar	۴۵ cm	۱۰ cc/min



شکل ۲. طرح واره مورد استفاده.

زاویه مربوطه نمودار چرخش نور قطبیده خطی را برای هر لایه رسم نمود. شکل این نمودار تعیین کننده امکان کاربرد یک لایه در فناوری کلید زنی یا فناوری ثبت اطلاعات است [۳].

در ابتدا نور لیزر هلیم-نئون به صفحه قطبشگر می‌رسد و در هنگام گذر در راستای مشخصی قطبیده خطی می‌شود و از یک تیغه شیشه‌ای با زاویه ۴۵ درجه عبور می‌کند. نور در مسیر خود به نمونه می‌رسد که در یک میدان مغناطیسی با راستای مشخص قرار دارد. بخشی از نور از لایه بازتابیده و بخشی از آن عبور می‌کند. نور عبوری و بازتابیده شده پس از گذر از آنالیزورهای مربوطه به فتوسلها رسیده که تغییرات شدت جریان در این فتوسلها نشان دهنده تغییرات در شدت نور دریافت شده توسط فتوسل و نوع رفتار لایه در مدهای عبوری (اثر فاراده) و بازتابی (اثر کر) است. با اعمال میدان مغناطیسی مورد نظر که سبب ناهمسانگردی در ماده خواهد شد، راستای قطبش نور می‌چرخد و نوع قطبش از حالت خطی خارج و به حالت بیضوی تبدیل می‌شود. البته میزان چرخش در اینجا به شدت میدان بستگی دارد و چون آنالیزورها ثابت‌اند شدت نور خروجی از آنها براساس قانون مالوس (رابطه ۱) تغییر خواهد کرد:

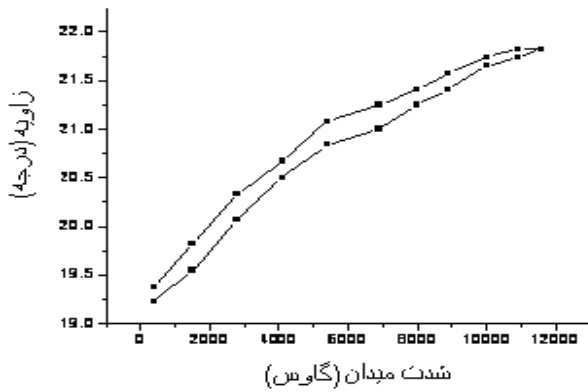
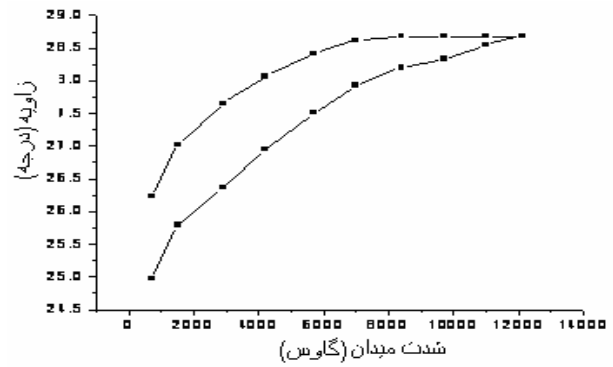
شکل ۳ مقدار چرخش را برای لایه اکسید کبالت (Co_2O_3) در مد عبوری نشان می‌دهد. این نمودار نشان دهنده مقدار چرخش حدود ۲ درجه و وجود پسماند در لایه است. علاوه بر این رفتار لایه در میدان مغناطیسی منظم است. شکل ۴ مقدار چرخش را برای لایه ترکیبی $\text{Mn}_{0.25}\text{Co}_{0.75}\text{O}_4$ در مد عبوری نشان می‌دهد. این نمودار میزان چرخش حدود ۲/۱۵ درجه را نشان می‌دهد. فرو مغناطیسی بودن لایه با توجه به حلقه پسماند محرز است.

شکل ۵ نمودار چرخش فارادی را برای لایه ترکیبی منگنز و

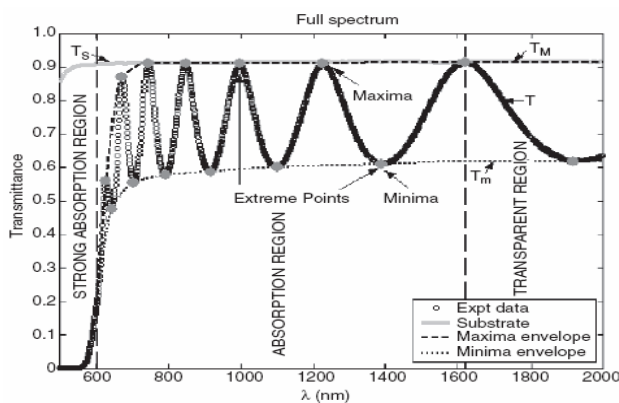
شکل ۳ مقدار چرخش را برای لایه اکسید کبالت (Co_2O_3) در مد عبوری نشان می‌دهد. این نمودار نشان دهنده مقدار چرخش حدود ۲ درجه و وجود پسماند در لایه است. علاوه بر این رفتار لایه در میدان مغناطیسی منظم است. شکل ۴ مقدار چرخش را برای لایه ترکیبی $\text{Mn}_{0.25}\text{Co}_{0.75}\text{O}_4$ در مد عبوری نشان می‌دهد. این نمودار میزان چرخش حدود ۲/۱۵ درجه را نشان می‌دهد. فرو مغناطیسی بودن لایه با توجه به حلقه پسماند محرز است.

$$I = I_0 \cos^2 \theta, \quad (1)$$

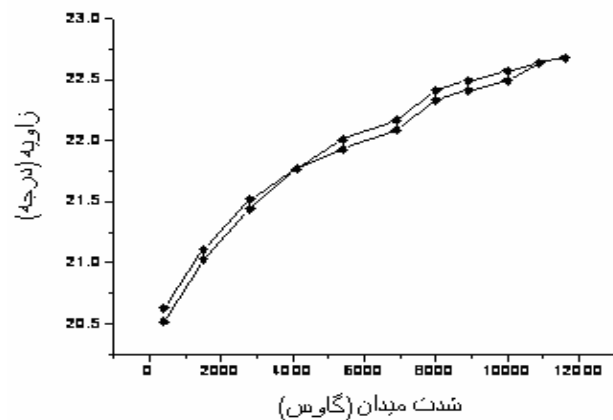
که I_0 شدت بیشینه در هنگام همراستایی محورهای تراگسیل

شکل ۴. نمودار اثر فارادی برای لایه $Mn_{0.5}Co_{0.5}O_4$.

شکل ۳. نمودار اثر فارادی برای اکسید کبالت.



شکل ۶. طیف عبوری برای یک نمونه خاص.

شکل ۵. نمودار اثر فارادی برای لایه $Mn_{0.5}Co_{0.5}O_4$.

می‌شود، موسوم به روش سان پل می‌باشد [۴]. سان پل نشان داد که ضریب شکست لایه نازک با توجه به دو محدوده ترسیم شده $T_M(\lambda)$ و $T_m(\lambda)$ و از روی مقدار ضریب شکست بستر با رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$n = \left[M + (n_s^2 - n^2) \right]^{1/2}, \quad (2)$$

که در آن:

$$M = 2n_s \left[(T_M - T_m) / T_M T_m \right] + (n_s^2 + 1) / 2.$$

با محاسبه ضریب شکست لایه، مطابق با دو ماکزیمم مجاور (دو مینیمم مجاور) در نقاط داده شده به صورت n_1 در λ_1 و n_2 در λ_2 ضخامت از معادله پایه تداخلی تعیین می‌شود:

$$d = \lambda_1 \lambda_2 / [2(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1)]. \quad (3)$$

برای حالتی که یک ماکزیمم و مینیمم مجاور در نظر بگیریم، ضخامت از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

کبالت با تناسب عنصری و فرمول شیمیایی $Mn_{0.5}Co_{0.5}O_4$ نشان می‌دهد. میزان چرخش در حدود ۲/۱ درجه است.

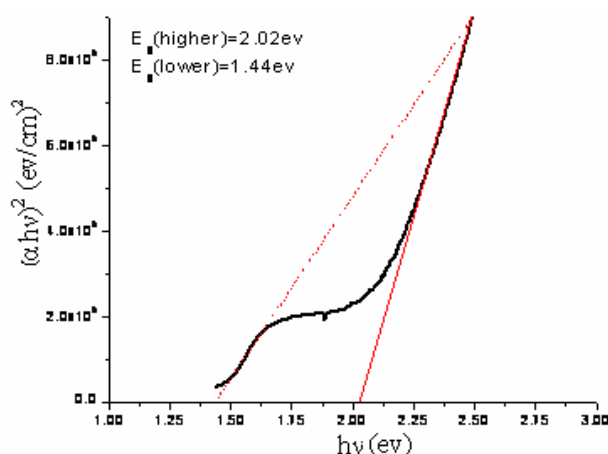
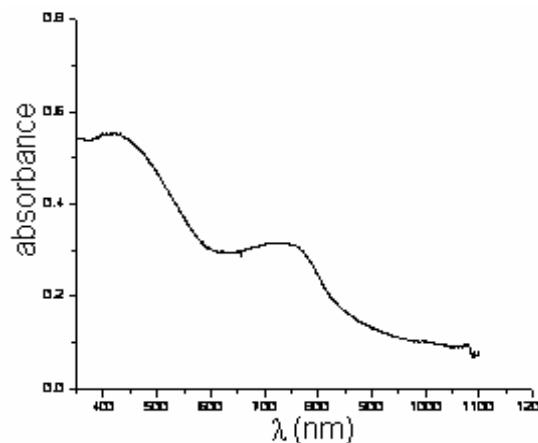
۴. تعیین خواص اپتیکی

۴.۱. محاسبه ضریب شکست و ضخامت لایه‌های نازک منگنز-کبالت

در بسیاری موارد، ثابتهای اپتیکی با عبور دادن نور از لایه نازک جایگذاری شده بر بسترشیشه‌ای اندازه‌گیری می‌شود. اگر یک لایه نازک با ضریب جذب α در نظر بگیریم، تداخلهای چندگانه‌ای در لبه لایه ایجاد می‌شود. در این حالت بعضی فریزهای تداخلی در طیف عبوری گرفته شده توسط اسپکترو متر، همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است قابل مشاهده می‌باشد. یک روش خیلی مفید و کاربردی که سبب استفاده از این فریزهای تداخلی برای تعیین خواص نوری مواد

جدول ۴. مقادیر ضریب شکست و ضخامت برای لایه‌های (Co_3O_4) و $Mn_{0.25}Co_{2.75}O_4$ و $Mn_{0.5}Co_{2.5}O_4$.

نمونه	ضریب شکست (n)	ضخامت متوسط (nm)
اکسید کبالت (Co_3O_4)	2.14 ± 0.05	200 ± 30
$Mn_{0.25}Co_{2.75}O_4$	2.22 ± 0.05	240 ± 30
$Mn_{0.5}Co_{2.5}O_4$	2.33 ± 0.05	280 ± 30

شکل ۸. نمودار $(\alpha hv)^2$ بر حسب hv برای اکسید کبالت.

شکل ۷. نمودار طیف جذبی اکسید کبالت.

می‌شود که میزان جذب تا طول موج 620 nm کاهش یافته و سپس تا 742 nm افزایش و دوباره از 765 nm کاهش می‌یابد که دو ناحیه انتقال اپتیکی را نمایش می‌دهد.

شکل ۸ نمودار $(\alpha hv)^2$ بر حسب hv را برای این لایه نشان می‌دهد. این نتیجه اشاره بر این دارد که لایه‌های اکسید کبالت دارای دو مقدار E_g مجاز مستقیم دارد. داده‌های اپتیکی دلایل واضحی را برای وجود دو مقدار گاف انرژی در اکسید کبالت نشان داده است [۵ و ۶]. طیف جذبی لایه $Mn_{0.25}Co_{2.75}O_4$ در گستره طول موجهای $1000-350$ نانومتر در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به نمودار نمودار $(\alpha hv)^2$ بر حسب hv برای این لایه در شکل ۱۰، همانند لایه اکسید کبالت دو مقدار گاف انرژی به دست می‌آید. برون یابیها منجر به مقادیر 1.95 eV و 1.37 eV برای E_g می‌شود.

لایه ترکیبی $Mn_{0.5}Co_{2.5}O_4$ دارای طیف جذبی مطابق شکل ۱۱ می‌باشد. شکل ۱۲ نمودار $(\alpha hv)^2$ بر حسب hv را برای این لایه نشان می‌دهد.

$$d = \lambda_1 \lambda_2 / [4(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1)] \quad (4)$$

برای سهولت در استفاده از روش سان پل، نرم افزاری به زبان ویژوال بیسیک طراحی نمودیم که در آن با وارد کردن اطلاعات اولیه از روی طیف عبوری که توسط اسپکتروفوتومتر تهیه می‌شود، مقادیر ضریب شکست در هر طول موج و همچنین ضخامت لایه نازک محاسبه می‌شود که برای چند نمونه در جدول ۴ ارائه شده است.

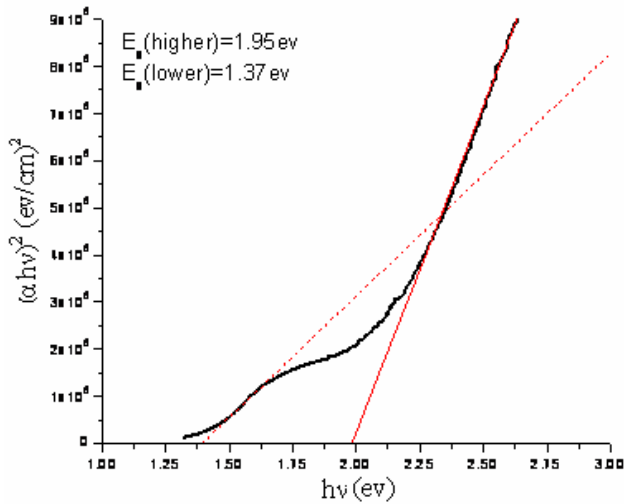
۵. تعیین گاف انرژی

به منظور تشخیص ماهیت گذار نور در لایه‌ها، داده‌های اپتیکی با استفاده از رابطه کلاسیکی زیر تحلیل شدند:

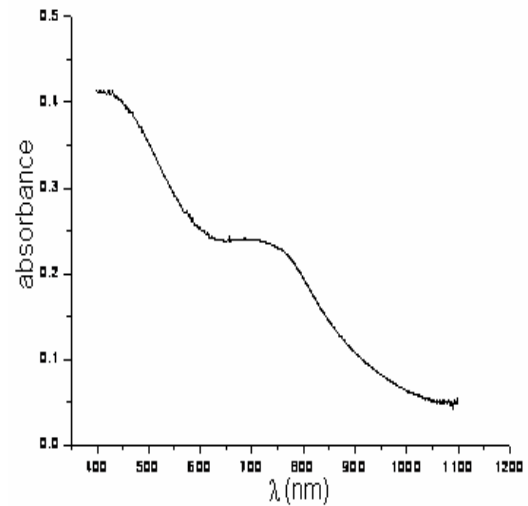
$$\alpha = \alpha_0 (hv - E_g)^n / hv \quad (5)$$

که در آن α_0 عدد ثابت و n نیز ثابتی با مقادیر 0.5 و 2 برای گذار مستقیم و غیر مستقیم مجاز می‌باشد.

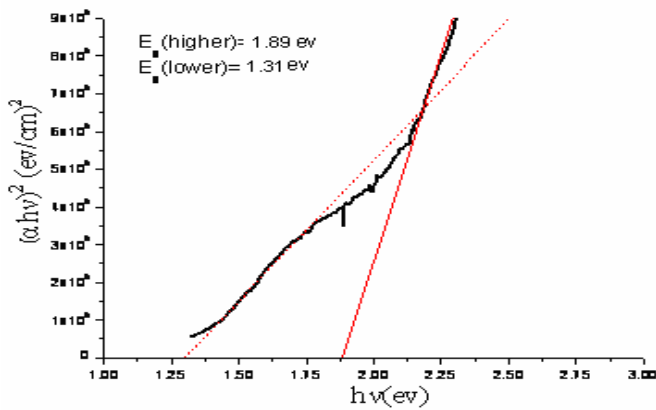
طیف جذبی لایه اکسید کبالت در گستره طول موجهای $1000-350$ نانومتر در شکل ۷ نشان داده شده است. دیده



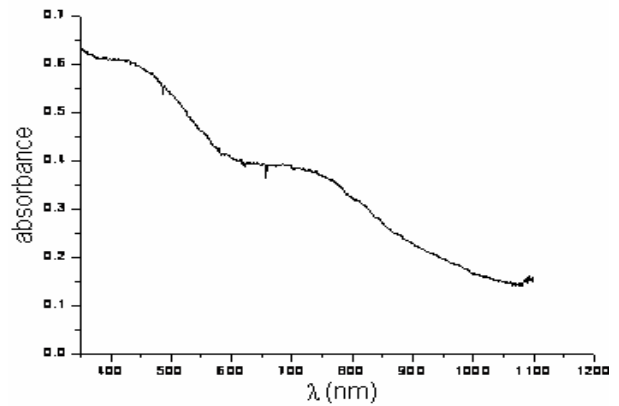
شکل ۱۰. نمودار $(\alpha \cdot hv)^2$ بر حسب $h\nu$ لایه $Mn_{0.20}Co_{0.70}O_4$.



شکل ۹. نمودار جذب اپتیکی لایه $Mn_{0.20}Co_{0.70}O_4$.



شکل ۱۲. نمودار $(\alpha \cdot hv)^2$ بر حسب $h\nu$ لایه $Mn_{0.50}Co_{0.50}O_4$.



شکل ۱۱. نمودار جذب اپتیکی لایه $Mn_{0.50}Co_{0.50}O_4$.

فرو مغناطیسی بودن این لایه‌ها در مقادیر کم منگنز نسبت به کبالت (کمتر از ۲۰٪) با توجه به حلقه پسماند محرز می‌باشد. از طرفی نتایج به دست آمده از خواص اپتیکی نشان داد که لایه اکسید کبالت دارای دو مقدار مجازگاف انرژی بوده که در توافق با مطالعات قبلی در این زمینه بوده و از طرفی بررسیها نشان داد که در لایه‌های ترکیبی منگنز و کبالت با افزایش نسبت منگنز به کبالت تا میزان ۲۰٪، مقادیرگاف انرژی تا حدود 0.13eV کاهش یافتند.

۵. نتیجه گیری

با توجه به کاربردهای روز افزون و گسترش فناوری اطلاعات، لایه‌های Mn-Co در تحقیقات از اهمیت خاصی برخوردارند. مطالعات نشان داد که لایه‌های ترکیبی با فرمول شیمیایی و تناسب عنصری $Mn_xCo_{3-x}O_4$ ($0 \leq x \leq 1$) که به روش اسپری پایرولیز و در شرایط لازم جایگذاری بر روی بستر شیشه‌ای تهیه شدند، با توجه به اندازه‌گیریهای مغناطیسی - نوری اثر کر و اثر فارادی، میزان چرخش نورقطبیده خطی را نسبت به لایه خالص اکسید کبالت افزایش می‌دهند و

مراجع

1. M U Gonzalez, G Armelles, C Martenez Boubeta, A Cebollada, *Applied Physics Letters*, 20 January (2003).
2. Pramod S Patial, *Materials Chemistry and Physics* **59** (1999) 185–198.
3. D W Moon, Y H Ha, Y Park, *Nano-Surface Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon, Korea*, 23 July (2001) 305-600.
4. R Swanepoel, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **16** (1983) 1214.
5. L D Kadam, P S Patial, *Materials Chemistry and Physics* **68** (2001) 225-232.
6. V R Shinde, S B Mahadik, T P Gugar, and C D Lokhande. *Applied Surface Science* **252** (2006) 7487-7492.