

الله اعلم
سنة ١٤٤٠



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش اتمی و مولکولی

طراحی، ساخت و مشخصه‌یابی سامانه‌های چند لایه‌ای نانومتری رسانای شفاف

استادان راهنما:

دکتر حمیدرضا فلاح

دکتر مرتضی حاجی محمودزاده

پژوهشگر:

حمیده کرمانی

آبان ماه ۱۳۹۱

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات
و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه اصفهان است.

پاس بی کران پروردگار یکتا را، که هستی ام بخشد و به طریق علم و دانش را منمونهم شد و به هم نشینی
رهروان علم و دانش منمخرم نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیم ساخت.
از خانواده ی عزیز، دلوز و مهربانم که برایم آرامش روحی و آسایش فکری فراهم
نمودند و در تمامی مراحل حامی و مشوق من بودند سپاسگزاری می نمایم.
از اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر حمیدرضا فلاح و جناب آقای دکتر مرتضی حاجی محمودزاده
به خاطر زحمات بی دریغ و راهنمایی هایشان تشکر می کنم.
هم چنین از تمامی دوستانم در آزمایشگاه لایه نشانی کمال تقدیر و تشکر را دارم.

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آن دو فرشته ای که از خواسته هایشان گذشتند، سختی ها را به جان خریدند و خود را سپر بلا می مشکلات و
ناطلاعات کردند تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده ام برسم.

چکیده:

برای بهبود بخشیدن به خواص الکتریکی و اپتیکی الکترودهای رسانای شفاف به منظور استفاده از آن‌ها در صفحات و وسایل فوتوولتائیک و دیودهای نور گسیل آلی، بررسی‌های فراوانی صورت گرفته است و برای طراحی و ساخت این گونه فیلم‌ها با کیفیت بالا و هزینه‌ی تولید پایین تلاش فراوانی انجام شده است. امروزه اکسیدهای رسانای شفاف بر پایه‌ی SnO_2 , ZnO , In_2O_3 به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند اما وسایل توسعه یافته و پیشرفته به الکترودهای جدید با مقاومت ویژه الکتریکی کمتر و خصوصیات اپتیکی بالاتری نسبت به الکترودهای نسل حاضر نیاز دارند. اخیراً برای بهبود بخشیدن به خواص الکتریکی و اپتیکی اکسیدهای رسانای شفاف، از یک لایه‌ی فلزی به عنوان لایه‌ی بین اکسیدهای رسانای شفاف یا مواد دی‌الکتریک استفاده می‌شود. ساختارهای (اکسید)دی‌الکتریک/فلز/(اکسید)دی‌الکتریک، خصوصیات الکتریکی و اپتیکی بهتری را نسبت به الکترودهای تک لایه‌ی TCO یا الکترودهای فلزی فراهم می‌آورند. این ساختارها باید علاوه بر رسانندگی الکتریکی بالا، به طور همزمان از شفافیت اپتیکی مناسبی در گستره‌ی نور مرئی نیز برخوردار باشند.

در این پژوهش، نخست به طراحی و شبیه‌سازی الکترودهای رسانای شفاف نانومتری سه لایه‌ی $\text{ZnS}/\text{Ag}/\text{ZnS}$ و پنج لایه‌ی $\text{ZnS}/\text{Ag}/\text{ZnS}/\text{Ag}/\text{ZnS}$ برای دستیابی به شفافیت بالا و مقاومت سطحی پایین پرداخته شد و سپس این ساختارها به روش تبخیر گرمایی بر روی بسترهای شیشه‌ای انباشت شدند. تأثیر پارامترهایی نظیر آهنگ انباشت، ضخامت لایه‌ها، دمای بستره، بازپخت در خلأ و بازپخت در هوا روی ویژگی‌های ساختاری، اپتیکی و الکتریکی این نانوساختارهای چند لایه‌ای بررسی شد. در ابتدا ما به الکترودهای شفاف سه لایه‌ای با تراگسیل اپتیکی بالای ۸۲٪ و مقاومت بسیار پایین $4/4 \Omega/\text{sq}$ و الکترودهای شفاف پنج لایه‌ای با تراگسیل اپتیکی $75/5\%$ و مقاومت بسیار پایین $2/7 \Omega/\text{sq}$ بدون عملیات گرمایی حین انباشت یا بازپخت پس از انباشت لایه‌ها دست یافتیم. دستیابی به شفافیت و رسانندگی بیشتر برای سیستم‌های چند لایه‌ای تحت شرایط اعمال دما به بستره‌ها حین انباشت لایه‌ها، امکان‌پذیر نیست و همچنین بازپخت سیستم‌های چند لایه‌ای تأثیر چندانی بر افزایش تراگسیل اپتیکی آن‌ها نداشت. پس از بهینه‌سازی شرایط انباشت لایه‌ها، مقدار بیشینه‌ی تراگسیل اپتیکی برای فیلم‌های سه لایه‌ای که لایه‌ی اول ZnS در دمای 100°C بازپخت شده بود به $87/3\%$ رسید و مقاومت سطحی به $3/1 \Omega/\text{sq}$ کاهش یافت. همچنین برای ساختار سه لایه‌ای انباشت شده بر روی بستره شیشه‌ای که فقط لایه‌ی اول ZnS تحت دمای 120°C انباشت شده بود، شفافیت بالای ۸۶٪ و مقاومت سطحی $2/6 \Omega/\text{sq}$ به دست آمد. الکترودهای شفاف سه لایه‌ای $\text{ZnS}/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ نیز مورد بررسی قرار گرفت که تراگسیل اپتیکی 80% و مقاومت سطحی $5/4 \Omega/\text{sq}$ به دست آمد که بازپخت در هوا در 100°C باعث بهبود خواص الکتریکی و اپتیکی آن شده و تراگسیل اپتیکی به 85% و مقاومت سطحی به $4/5 \Omega/\text{sq}$ رسید. در نهایت دیودهای نور سبز ساخته شده بر روی آند پنج لایه‌ای، کارایی و درخشایی قابل مقایسه‌ای را با دیودهای بر پایه‌ی آند ITO از خود نشان دادند.

کلمات کلیدی: اکسید رسانای شفاف، الکترودهای رسانای شفاف چند لایه‌ای، مقاومت سطحی، تراگسیل اپتیکی، دیود

نورگسیل آلی، فرآیند بازپخت، آهنگ انباشت، دمای بستره

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول : الکترودهای رسانای شفاف
۱-۱	مقدمه
۲-۱	ویژگی‌های اپتیکی
۳-۱	ویژگی‌های الکتریکی
۱-۳-۱	تراکم حامل‌های بار
۱-۱-۳-۱	استوکیومتری
۲-۱-۳-۱	آلایش خارجی
۲-۳-۱	تحرك پذیری حامل‌های بار
۱-۲-۳-۱	پراکندگی مرز دانه‌ها
۲-۲-۳-۱	پراکندگی ناخالصی‌های یونیزه
۳-۲-۳-۱	پراکندگی شبکه
۴-۲-۳-۱	پراکندگی الکترون-الکترون
۴-۱	ضرب شایستگی
۵-۱	کاربردهای الکترودهای رسانای شفاف
۱-۵-۱	حسگرهای گازی
۲-۵-۱	سلول‌های خورشیدی
۳-۵-۱	دیودهای نور افشان آلی (OLED)
۴-۵-۱	پوشش‌های آنتی استاتیک
۵-۵-۱	پوشش‌های آینه‌ای حرارتی
۶-۵-۱	پوشش‌های گرمایی

فصل دوم : بررسی الکترودهای شفاف چند لایه‌ای و مواد مورد استفاده در آنها

۱-۲	مقدمه
۲-۲	اکسید ایندیوم آلیایده شده با قلع (ITO)
۳-۲	جایگزین‌های مناسب برای ITO

عنوان

صفحه

۲۳	۱-۳-۲ اکسید روی (ZnO) و آلیاژهای آن
۲۴	۲-۳-۲ الکترودهای شفاف چند لایه‌ای
۲۷	۴-۲ انتخاب لایه‌ی دی الکتریک
۲۸	۵-۲ انتخاب لایه فلزی
۳۱	۶-۲ نتیجه‌گیری

فصل سوم : روش‌های ساخت لایه‌های نازک و دستگاه‌های مورد استفاده

۳۲	۱-۳ مقدمه
۳۲	۲-۳ روش‌های انباشت لایه‌های نازک
۳۳	۱-۲-۳ انباشت فیزیکی بخار (PVD)
۳۳	۱-۱-۲-۳ تبخیر حرارتی مقاومتی
۳۴	۳-۳ وسایل و دستگاه‌های مورد استفاده در قسمت لایه‌نشانی
۳۴	۱-۳-۳ دستگاه لایه نشانی موجود
۳۵	۲-۳-۳ اندازه‌گیری ضخامت با بلور کوارتز
۳۵	۳-۳-۳ دستگاه لایه نشانی پوششی چرخشی
۳۶	۴-۳-۳ کوره افقی جهت بازپخت لایه‌ها
۳۷	۵-۳-۳ انتخاب نوع بستره و شستشوی بستره‌ها
۳۹	۴-۳ روش‌های به‌کار رفته برای تعیین ویژگی‌های الکتریکی، اپتیکی و ساختاری سامانه‌های چندلایه‌ای
۳۹	۱-۴-۳ بیناب نمایی دو پرتویی UV-VIS
۴۰	۲-۴-۳ بررسی خواص ساختاری با الگوی پراش پرتو ایکس (XRD)
۴۱	۳-۴-۳ میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)
۴۳	۴-۴-۳ اندازه‌گیری مقاومت سطحی لایه‌ها با گمانه‌ی چهار نقطه
۴۴	۵-۴-۳ اندازه‌گیری مشخصه جریان-ولتاژ
۴۴	۶-۴-۳ اندازه‌گیری مشخصات الکترو لومینسانس

فصل چهارم : طراحی و شبیه سازی الکترودهای رسانای شفاف چند لایه‌ای

۴۶	۱-۴ مقدمه
----	-----------

عنوان

صفحه

طراحی الکترودهای سه لایه‌ای و پنج لایه‌ای.....	۴۷
۱-۲-۴ طراحی الکترودهای سه لایه‌ای.....	۴۷
۱-۱-۲-۴ سامانه‌های متقارن.....	۴۸
۲-۱-۲-۴ سامانه‌های نامتقارن.....	۵۱
۲-۲-۴ طراحی الکترودهای پنج لایه‌ای.....	۵۲
۱-۲-۲-۴ سامانه‌های متقارن.....	۵۲
۲-۲-۲-۴ سامانه‌های نامتقارن.....	۵۵

فصل پنجم: ساخت الکترودهای رسانای شفاف چند لایه‌ای و بررسی ویژگی‌ها

۱-۵ مقدمه.....	۵۶
۲-۵ مراحل لایه نشانی.....	۵۶
۳-۵ سامانه‌های چند لایه‌ای متقارن ساخته شده از مواد ZnS و Ag.....	۵۷
۱-۳-۵ بررسی آهنگ انباشت لایه‌ها.....	۵۷
۱-۱-۳-۵ آهنگ انباشت لایه‌ی نقره.....	۵۸
۲-۱-۳-۵ آهنگ انباشت لایه‌ی ZnS.....	۵۸
۲-۳-۵ بررسی خواص چند لایه‌ای‌ها.....	۶۱
۳-۳-۵ اثر ضخامت لایه‌ی نقره در سامانه‌های سه لایه‌ای.....	۶۳
۱-۳-۳-۵ ویژگی‌های الکتریکی.....	۶۳
۲-۳-۳-۵ ویژگی‌های ساختاری.....	۶۵
۳-۳-۳-۵ ویژگی‌های اپتیکی.....	۶۸
۴-۳-۵ بررسی اثر بازپخت بر ویژگی‌های سیستم‌های چند لایه‌ای.....	۷۰
۱-۴-۳-۵ بازپخت در مدت زمان یک ساعت.....	۷۰
۲-۴-۳-۵ بازپخت با زمان بندی افزایش دمای هر ۱۰ درجه سانتیگراد در ۶ دقیقه (بازپخت با آهنگ $1/6^{\circ}\text{C min}^{-1}$).....	۷۲
۵-۳-۵ بررسی اثر دمای بستره بر ویژگی‌های سیستم‌های چند لایه‌ای.....	۷۶
۱-۵-۳-۵ انباشت لایه‌ی ZnS در دماهای متفاوت بستره.....	۷۸

عنوان

صفحه

- ۲-۵-۳-۵ اثر بازپخت لایه ی ZnS در سیستم های چند لایه ای ۸۳
- ۴-۵ سیستم چند لایه ای نامتقارن ZnS/Ag/MoO₃ ۸۸
- ۱-۴-۵ بررسی اثر بازپخت بر ویژگی های الکتریکی و اپتیکی و ساختاری ۸۹
- ۱-۱-۴-۵ ویژگی های ساختاری ۸۹
- ۲-۱-۴-۵ ویژگی های الکتریکی ۹۱
- ۳-۱-۴-۵ ویژگی های اپتیکی ۹۲

فصل ششم : ساخت دیودهای نور گسیل آلی با استفاده از آندهای ساخته شده

- ۱-۶ مقدمه ۹۷
- ۲-۶ دیودهای نور گسیل آلی ۹۸
- ۳-۶ ویژگی های الکترودهای سه لایه ای و پنج لایه ای ۱۰۰
- ۱-۳-۶ بررسی سطح آندهای سه لایه ای و پنج لایه ای ۱۰۰
- ۲-۳-۶ ویژگی های الکتریکی و اپتیکی ۱۰۲
- ۴-۶ ساخت OLED با قابلیت انتشار نور سبز ۱۰۴
- ۱-۴-۶ مشخصه ی جریان- ولتاژ (J-V) ۱۰۵
- ۲-۴-۶ مشخصه ی درخشایی- ولتاژ (L-V) ۱۰۶
- ۳-۴-۶ بازده جریان ۱۰۸

فصل هفتم : نتیجه گیری و پیشنهادها

- ۱-۷ نتیجه گیری ۱۰۹
- ۲-۷ پیشنهادها ۱۱۲
- منابع و مأخذ ۱۱۳

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: طیف تراگسیل یک لایه‌ی نازک رسانای شفاف که λ_{gap} و λ_{pl} به ترتیب طول موج جذب گاف انرژی و طول موج جذب پلاسمای الکترون‌های آزاد است	۲
شکل ۱-۲: ساختار نوار انرژی پیشنهادی برای TCOها و اثر ماس-برشتاین	۴
شکل ۱-۳: رابطه‌ی بین E_g با چگالی الکترونی $n_e^{2/3}$ منحنی خطی با نظریه‌ی ماس-برشتاین محاسبه شده است	۵
شکل ۱-۴: (الف) بازتاب محاسبه شده در ناحیه‌ی طول موجی $0.4-2.4 \mu\text{m}$ برای تراکم حامل‌های مختلف. (ب) تغییرات جذب با تغییر تراکم حامل‌ها	۶
شکل ۱-۵: نمایی از سلول‌های خورشیدی (الف) سیلیکونی و (ب) لایه نازک	۱۴
شکل ۱-۶: مراحل تولید جریان از نور در یک سلول خورشیدی آلی	۱۵
شکل ۱-۷: نمایی از سلول خورشیدی با طرح و رنگ به کار رفته در پنجره ساختمان‌ها	۱۶
شکل ۲-۱: قیمت ایندیوم بر هر تن با احتساب ارزش دلار در سال ۱۹۹۸ از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۷	۲۱
شکل ۲-۲: مقاله‌های منتشر شده مربوط به جایگزین‌هایی برای ITO	۲۲
شکل ۲-۳: مقادیر تراگسیل بیشینه و مقاومت سطحی برای لایه‌های فلزی نقره و مس بر حسب ضخامت	۳۰
شکل ۲-۴: طیف تراگسیل و جذب برای لایه نقره با ضخامت ۱۰ nm و لایه مس با ضخامت ۱۵ nm	۳۰
شکل ۳-۱: نمای خارجی دستگاه لایه نشانی موجود در آزمایشگاه	۳۴
شکل ۳-۲: نمایشگر ضخامت سنج بلور کوارتز	۳۵
شکل ۳-۳: مراحل مختلف لایه نشانی چرخشی	۳۶
شکل ۳-۴: دستگاه لایه نشانی چرخشی موجود در آزمایشگاه	۳۶
شکل ۳-۵: کوره افقی جهت بازپخت نمونه‌ها	۳۷
شکل ۳-۶: نمودار تراگسیل اپتیکی بر حسب طول موج برای بستره شیشه‌ای استفاده شده در این پژوهش	۳۸
شکل ۳-۷: دستگاه لرزاننده فراصوتی برای شستشوی بستره‌ها	۳۸
شکل ۳-۸: دستگاه بیناب نمایی دو پرتویی UV-VIS مورد استفاده در این پژوهش	۳۹
شکل ۳-۹: دستگاه پراش پرتو ایکس مورد استفاده	۴۱
شکل ۳-۱۰: نمایش روبش سطح نمونه به وسیله‌ی سوزن AFM	۴۲

عنوان

صفحه

- شکل ۳-۱۱: دستگاه گمانه‌ی چهار نقطه ۴۳
- شکل ۳-۱۲: دستگاه مشخصه یاب جریان-ولتاژ Keithley 2400 ۴۴
- شکل ۳-۱۳: دستگاه طیف سنج Jaz ۴۵
- شکل ۳-۱۴: صفحه‌ی کاربری نرم افزار SpectraSuite ۴۵
- شکل ۴-۱: طیف بازتاب و تراگیل سامانه‌های ZnS(40nm)/Ag(xnm)/ZnS(40nm) ۴۸
- شکل ۴-۲: طیف جذب سامانه‌های ZnS(40nm)/Ag(xnm)/ZnS(40nm) ۴۹
- شکل ۴-۳: تغییرات عدد شایستگی در سامانه‌های ZnS(40nm)/Ag(xnm)/ZnS(40nm) ۵۰
- شکل ۴-۴: تغییرات عدد شایستگی در سامانه‌های ZnS(x nm)/Ag(17nm)/ZnS(x nm) ۵۱
- شکل ۴-۵: تغییرات عدد شایستگی با ضخامت‌های متفاوت لایه ZnS در مجاورت هوا و روی بستره ۵۲
- شکل ۴-۶: طیف بازتاب و تراگیل در سامانه‌های پنج لایه‌ای (ضخامت لایه ZnS، ۲۰ nm و ضخامت لایه نقره متغییر) ۵۳
- شکل ۴-۷: تغییرات مقاومت سطحی بر حسب ضخامت لایه‌ی نقره در سامانه‌های پنج لایه‌ای ۵۳
- شکل ۴-۸: تغییرات عدد شایستگی بر حسب ضخامت لایه‌ی نقره در سامانه‌های پنج لایه‌ای ۵۴
- شکل ۴-۹: تغییرات عدد شایستگی بر حسب ضخامت لایه‌ی ZnS در سامانه‌های پنج لایه‌ای ۵۴
- شکل ۴-۱۰: تغییرات عدد شایستگی بر حسب ضخامت لایه ZnS در سامانه‌های نامتقارن پنج لایه‌ای ۵۵
- شکل ۵-۱: تغییرات مقاومت سطحی سامانه پنج لایه‌ای (ZnS/Ag/ZnS/Ag/ZnS) ۵۹
- شکل ۵-۲: طیف تراگیل سامانه‌های پنج لایه‌ای (ZnS/Ag/ZnS/Ag/ZnS) بر حسب طول موج برای آهنگ‌های انباشت متفاوت لایه ZnS ۶۰
- شکل ۵-۳: طیف تراگیل تک لایه ZnS ۶۲
- شکل ۵-۴: وابستگی مقاومت سطحی سامانه‌های سه لایه‌ای به ضخامت لایه نقره ۶۴
- شکل ۵-۶: الگوی پراش XRD برای سامانه‌های سه لایه‌ای با ضخامت متفاوت لایه نقره ۶۶
- شکل ۵-۷: تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی فیلم‌های سه لایه‌ای با ضخامت‌های متفاوت لایه نقره ۶۷
- شکل ۵-۸: طیف تراگیل فیلم سه لایه‌ای با ضخامت‌های متفاوت لایه نقره ۶۸
- شکل ۵-۹: نمودار عدد شایستگی بر حسب ضخامت مختلف لایه نقره در الکترودهای شفاف سه لایه‌ای ۶۹
- شکل ۵-۱۰: طیف تراگیل اکسید رسانای شفاف ITO ۶۹

عنوان

صفحه

- شکل ۵-۱۱: طیف تراگسیل فیلم‌های پنج لایه‌ای با بازپخت در هوا به مدت یک ساعت ۷۱
- شکل ۵-۱۲: طیف تراگسیل فیلم‌های پنج لایه‌ای با بازپخت در خلاء به مدت یک ساعت ۷۱
- شکل ۵-۱۳: الگوی پراش پرتو ایکس فیلم‌های پنج لایه‌ای بازپخت شده در دماهای مختلف ۷۲
- شکل ۵-۱۴: تغییرات مقاومت سطحی با دمای بازپخت در فیلم‌های سه و پنج لایه‌ای ۷۳
- شکل ۵-۱۵: طیف تراگسیل فیلم‌های پنج لایه‌ای با بازپخت در هوا با آهنگ $1/6 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ ۷۴
- شکل ۵-۱۶: طیف تراگسیل فیلم‌های سه لایه‌ای با بازپخت در هوا با آهنگ $1/6 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ ۷۵
- شکل ۵-۱۷: بیشینه تراگسیل اپتیکی و ضریب شایستگی فیلم‌های سه لایه‌ای با بازپخت در هوا ۷۶
- شکل ۵-۱۸: طیف تراگسیل فیلم‌های سه لایه‌ای انباشت شده با دمای بستره متفاوت ۷۷
- شکل ۵-۱۹: طیف پراش پرتو ایکس با اعمال دمای بستره فقط به لایه اول ZnS در فیلم‌های سه لایه‌ای ۷۹
- شکل ۵-۲۰: تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی (الف) دمای انباشت $80 \text{ }^\circ\text{C}$ (ب) $120 \text{ }^\circ\text{C}$ (ج) $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ۸۰
- شکل ۵-۲۱: تغییرات مقاومت سطحی بر حسب دمای بستره اعمال شده بر لایه اول ZnS در فیلم‌های سه و پنج لایه‌ای ۸۱
- شکل ۵-۲۲: طیف تراگسیل فیلم‌های سه لایه‌ای با اعمال دماهای متفاوت به بستره‌های شیشه‌ای برای انباشت لایه اول ZnS ۸۲
- شکل ۵-۲۳: طیف تراگسیل فیلم‌های پنج لایه‌ای با اعمال دماهای متفاوت به بستره‌های شیشه‌ای برای انباشت لایه اول ZnS ۸۳
- شکل ۵-۲۴: طیف تراگسیل اپتیکی تک لایه ZnS بازپخت شده در دماهای متفاوت ۸۴
- شکل ۵-۲۵: طیف تراگسیل اپتیکی فیلم‌های سه لایه‌ای با بازپخت لایه اول ZnS ۸۵
- شکل ۵-۲۶: طیف پراش پرتو ایکس فیلم‌های سه لایه‌ای با بازپخت لایه اول ZnS ۸۶
- شکل ۵-۲۷: تغییرات مقاومت سطحی فیلم‌های سه و پنج لایه‌ای با بازپخت لایه اول ZnS ۸۷
- شکل ۵-۲۸: طیف تراگسیل اپتیکی فیلم پنج لایه‌ای با بازپخت لایه اول ZnS ۸۸
- شکل ۵-۲۹: طیف پراش پرتو ایکس فیلم‌های سه لایه‌ای ZAM بدون بازپخت و با بازپخت در هوا ۹۰
- شکل ۵-۳۰: تصاویر AFM: (الف) بدون بازپخت، (ب) بازپخت در $100 \text{ }^\circ\text{C}$ (ج) $200 \text{ }^\circ\text{C}$ (د) $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ۹۰
- شکل ۵-۳۱: تغییرات مقاومت سطحی فیلم سه لایه‌ای با دمای بازپخت ۹۲
- شکل ۵-۳۲: طیف تراگسیل اپتیکی فیلم‌های سه لایه‌ای ZAM بازپخت شده در دماهای متفاوت ۹۳
- شکل ۵-۳۳: طیف بازتاب اپتیکی سه لایه‌ای نانوساختاری ZAM برای بازپخت در دماهای مختلف ۹۳

عنوان

صفحه

- شکل ۳۴-۵: نمودار $(\alpha h\nu)^2$ بر حسب $h\nu$ برای سامانه‌های سه لایه‌ای ZAM..... ۹۴
- شکل ۳۵-۵: تغییرات گاف انرژی برای فیلم‌های سه لایه‌ای ZAM بدون بازپخت و با بازپخت در دماهای مختلف ۹۵
- شکل ۳۶-۵: ضریب شایستگی برای فیلم‌های سه لایه‌ای ZAM بدون بازپخت و با بازپخت در دماهای مختلف ۹۶
- شکل ۱-۶: سازوکار انتقال حامل‌ها و گسیل نور در دیودهای نور گسیل آلی ۹۹
- شکل ۲-۶: نمایی از یک OLED با ساختار بهینه ۱۰۰
- شکل ۳-۶: تصاویر AFM از سطح آندهای الف (پنج لایه‌ای، ب) سه لایه‌ای و ج) ITO ۱۰۱
- شکل ۴-۶: الگوی پراش پرتو ایکس اپتیکی الکترودهای سه و پنج لایه‌ای ۱۰۲
- شکل ۵-۶: طیف تراگسیل اپتیکی الکترودهای سه و پنج لایه‌ای ۱۰۳
- شکل ۶-۶: طیف بازتاب اپتیکی الکترودهای سه و پنج لایه‌ای ۱۰۳
- شکل ۷-۶: نمایشی از ساختار دیود نور گسیل آلی سبز ۱۰۵
- شکل ۸-۶: مشخصه J-V دیودهای آلی ساخته شده بر روی آندهای سه و پنج لایه‌ای ۱۰۶
- شکل ۹-۶: مشخصه L-V دیودهای آلی ساخته شده بر روی آندهای سه و پنج لایه‌ای ۱۰۷
- شکل ۱۰-۶: مشخصه بازده جریان دیودهای آلی ساخته شده بر روی آندهای سه و پنج لایه‌ای ۱۰۸

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲: اکسیدهای فلزی با مواد قابل آلایدن در آن‌ها برای جایگزینی ITO	۲۳
جدول ۲-۲: مقادیر تراگیسل اپتیکی و مقاومت سطحی برای ساختارهای سه لایه‌ای	۲۵
جدول ۳-۲: مقادیر مقاومت الکتریکی ویژه برای فلزات در حالت حجیم	۲۹
جدول ۱-۴: نتایج محاسبات سامانه‌های سه لایه‌ای ZnS(40nm)/Ag(xnm)/ZnS(40nm)	۴۹
جدول ۲-۴: ثابت‌های اپتیکی نقره وضرب جذب برای طول موج‌های مختلف	۵۰
جدول ۱-۵: خصوصیات سامانه‌های پنج لایه‌ای با آهنگ‌های انباشت متفاوت برای لایه ZnS	۶۱
جدول ۲-۵: خواص الکتریکی و اپتیکی سامانه‌های چند لایه‌ای	۶۳
جدول ۳-۵: خصوصیات الکتریکی، اپتیکی و ساختاری الکترودهای شفاف چندلایه‌ای نانومتری متناسب با ضخامت متغییر لایه نقره (ضخامت لایه ZnS، ۳۰ nm است.)	۶۷
جدول ۴-۵: خصوصیات الکتریکی، اپتیکی و ساختاری فیلم‌های پنج لایه‌ای با بازپخت در هوا	۷۵
جدول ۵-۵: خصوصیات الکتریکی، اپتیکی و ساختاری فیلم‌های سه لایه‌ای با بازپخت در هوا	۷۶
جدول ۶-۵: خصوصیات الکتریکی، اپتیکی و ساختاری ساختار سه لایه‌ای با اعمال دمای بستره برای انباشت لایه اول ZnS	۸۲
جدول ۷-۵: ترکیبات شیمیایی لایه‌های ZnS در دمای بازپخت متفاوت و بدون بازپخت	۸۶
جدول ۸-۵: خصوصیات الکتریکی، اپتیکی و ساختاری فیلم‌های سه لایه‌ای انباشت شده بر لایه‌ی بازپخت شده ZnS در دماهای مختلف	۸۷
جدول ۱-۶: ویژگی‌های الکتریکی و ساختاری الکترودها	۱۰۴

مخفف ها

AFM : Atomic Force Microscope

Alq₃ : Tris(8-hydroxyquinoline) aluminum

Al : Aluminum

AZO : Aluminum Zinc Oxide

CBD : Chemical Bath Deposition

CVD : Chemical Vapor Deposition

EBL : Electron Blocking Layer

EIL : Electron Injection Layer

EML : Emissive Layer

ETL : Electron Transport Layer

FTO : Fluorin Tin Oxide

FWHM : Full Width at Half Maximum

GZO : Gallium Zinc Oxide

HBL : Hole Blocking Layer

HIL : Hole Injection Layer

HTL : Hole Transport Layer

HOMO : Highest Occupied Molecular Orbital

ITO : Indium Tin Oxide

LCD : Liquied Crystal Display

LED : Light Emitting Diode

LiF : Litium Fluoride

LOMO : Lowest Unoccupied Molecular Orbital

MBE : Molecular Beam Epitaxy

MoO₃ : Molybdenum trioxide

NPB : N,N'-diphenyl-N,N'-bis(1-naphthyl)-1,1'-biphenyl-4,4'-diamine

OLED : Organic Light Emitting Diode

OPV : Organic Photovoltaic

PEDOT:PSS : Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-1,3,4-oxadiazole

PLD : Pulsed-Laser Deposition

PVD : Physical Vapor Deposition

RMS : Root Mean Square

SILAR : Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction

TCO : Transparent Conductive Oxide

WO₃ : Tungsten trioxide

XRD : X-Ray Diffraction

ZnO : Zinc Oxide

ZnS : Zinc Sulfide

ZnS/Ag/ZnS : ZAZ

ZnS/Ag/ZnS/Ag/ZnS : ZAZAZ

ZnS/Ag/MoO₃ : ZAM

فصل اول

الکترودهای رسانای شفاف

۱-۱ مقدمه

اکسیدهای رسانای شفاف^۱ (TCO)، اکسیدهای فلزی و آلیاژهای آنها هستند. فیلم‌های رسانای شفاف به دلیل دارا بودن همزمان رسانندگی الکتریکی بالا برای انتقال خوب حامل‌های بار (بیش از 10^3 S/cm) و شفافیت بالای ۸۰٪ در ناحیه مرئی، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. علاوه بر اکسیدهای رسانای شفاف، لایه‌های بسیار نازک فلزی (نقره، مس و طلا) و پلیمرهای رسانا نیز این دو ویژگی را به‌طور همزمان دارند. امروزه، اکسیدهای رسانای شفاف بر پایه SnO_2 ، ZnO ، In_2O_3 به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱].

این مواد رسانندگی قابل توجهی ندارند و به دلیل گاف انرژی پهن $E_g > 3$ eV دارای شفافیت بالا در ناحیه مرئی هستند [۲]. برای رسانش این مواد به رسانندگی غیر استوکیومتری یا به اصطلاح داپ کردن^۲ (Sn در In_2O_3 یا Al و Ga در ZnO) نیاز است که باعث ایجاد الکترون در گاف انرژی پهن آنها می‌شود. به‌طور کلی برای استفاده‌ی TCO به‌عنوان الکترودهای رسانای شفاف، باید دارای تراکم حامل‌های بار از مرتبه‌ی 10^{20} cm^{-3} برای دستیابی به مقاومت پایین‌تر باشند. هم‌چنین باید گاف انرژی بزرگتر از ۳۸۰ nm داشته باشند تا از جذب نور

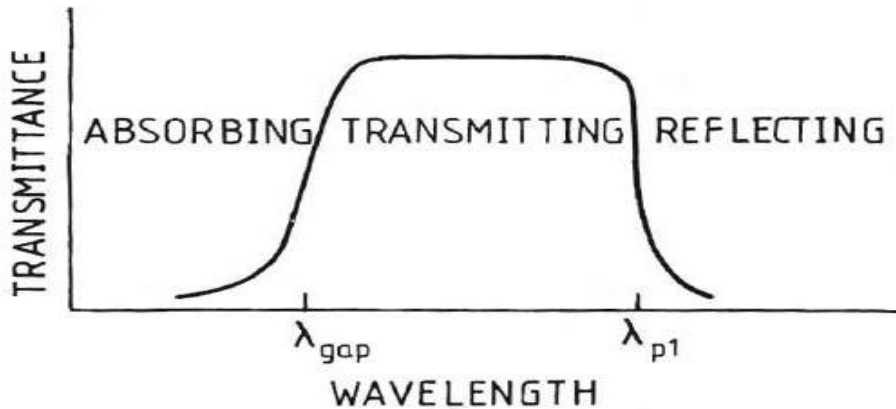
^۱ Transparent Conductive Oxide

^۲ Doping

جلوگیری شود. در این فصل ابتدا به معرفی ویژگی‌های الکتریکی و اپتیکی رساناهای شفاف می‌پردازیم و در ادامه به کاربردهای آن‌ها در وسایل اپتوالکترونیک به‌عنوان الکتروود شفاف اشاره می‌کنیم.

۲-۱ ویژگی‌های اپتیکی

لایه‌های نازک رسانای شفاف باید دارای ضریب جذب بسیار کوچکی در ناحیه‌ی مرئی و فروسرخ نزدیک باشند. طیف تراگسیل یک فیلم اکسیدی رسانای شفاف در شکل ۱-۱ آمده است که تراگسیل را در سه ناحیه‌ی مجزا نشان می‌دهد [۳].



شکل ۱-۱: طیف تراگسیل یک لایه‌ی نازک رسانای شفاف که λ_{gap} و λ_{pi} به ترتیب طول موج جذب گاف انرژی و طول موج جذب پلاسماهای آزاد است [۳].

ناحیه‌ی تراگسیل اپتیکی به‌وسیله‌ی لبه‌ی جذب (λ_{gap}) و لبه‌ی پلاسما (λ_{pi}) محدود می‌شود. این ناحیه به پنجره‌ی شفاف نیز معروف است. لبه‌ی جذب (λ_{gap}) مربوط به جذب گاف انرژی^۱ است و لبه‌ی پلاسما (λ_{pi}) به‌وسیله‌ی جذب پلاسماهای الکترون آزاد تعیین می‌شود. برای طول موج‌های فرابنفش، جذب به‌واسطه‌ی گاف انرژی اتفاق می‌افتد و برای طول موج‌های بزرگ، بازتاب بالا به‌واسطه‌ی الکترون‌های آزاد رخ می‌دهد. خصوصیات اپتیکی لایه‌های رسانای شفاف، تراگسیل اپتیکی (T)، بازتاب (R) و جذب (A) توسط ضریب شکست (n)، ضریب خاموشی (k)، گاف انرژی (E_g) و هندسه تعیین می‌شود. هندسه شامل ضخامت لایه، یکنواختی ضخامت و نا

^۱ Band Gap