

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فیزیک و مهندسی هسته ای

گرایش فیزیک حالت جامد

رساله دکتری

بررسی اپتیکی شیشه‌های پوشش یافته با نانو ساختارهای  
اکسید فلزی (مانند ZnO) و عملکرد حرارتی بهبود یافته  
برای استفاده در صنعت ساختمان

نگارنده: الهام هراتیان نژاد

اساتید راهنما:

دکتر حمید هراتی زاده

دکتر بهروز محمدکاری

اسفند ۱۳۹۷



فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)  
(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای/خانم الهام هراتیان نژاد دانشجوی دکتری رشته فیزیک حالت جامد به شماره دانشجویی ۹۴۰۱۳۸۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۴ در تاریخ ۹۷/۱۲/۱۵ از رساله نظری / عملی \* خود با عنوان: بررسی اپتیکی شیشه های پوشش یافته با نانوساختارهای اکسید فلزی (مانند ZnO) و عملکرد حرارتی بهبود یافته برای استفاده در صنعت ساختمان، دفاع و با اخذ نمره ۱۹.۱۲۰۰ به درجه عالی نائل گردید.

<input checked="" type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹	<input type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۷
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵	<input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
<input type="checkbox"/> ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبیه علمی	امضاء
۱	دکتر حمید هراتی زاده	استاد/ اساتید راهنما	استاد	
۲	دکتر بهروز محمدکاری	استاد/ اساتید راهنما	دانشیار	
۳	دکتر	مشاور/ مشاورین		
۴	دکتر مرتضی ایزدی فرد	استاد مدعو داخلی / خارجی	دانشیار	
۵	دکتر محدرضا فدوی اسلام	استاد مدعو داخلی / خارجی	دانشیار	
۶	دکتر طاهره محمودی	استاد مدعو داخلی / خارجی	استادیار	
۷	دکتر مجتبی هاشم زاده	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای/خانم الهام هراتیان نژاد بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:  
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم به

پدر و مادر عزیزم به پاس بزرگواری و مهربانی‌های بی‌دریغشان

خواهران خوبم به پاس همراهی همیشگی‌شان

و

تقدیم به

همسر عزیزم به پاس همکاری و دلگرمی‌هایش

رادین نازنینم به پاس صبر و محبتش

## تقدیر و تشکر

پروردگار را سپاسگزارم که بار دیگر به من فرصت آموختن داد.

در ابتدا بر خود لازم می‌دانم از اساتید ارجمند جناب آقای دکتر حمید هراتی‌زاده و جناب آقای دکتر بهروز محمدکاری که زحمت زیادی برای تحقق این رساله کشیده‌اند، نهایت سپاس و قدردانی را داشته باشم. مطمئناً بدون حمایت‌ها، راهنمایی‌های ارزنده و زحمات بی‌شائبه ایشان، انجام این رساله میسر نمی‌شد. بدین وسیله از بزرگواری، حسن سلوک و حمایت بی‌دریغ ایشان تشکر کرده و برایشان طول عمر توام با سربلندی آرزومندم.

از کلیه اساتیدی که در راه کسب دانش راهنمایم بودند، بسیار سپاسگزارم.

از اساتید بزرگوار آقایان دکتر مرتضی ایزدی‌فرد و دکتر محمدرضا فدوی اسلام و خانم دکتر طاهره محمودی که زحمت داوری این رساله را برعهده داشتند نیز تشکر می‌نمایم.

از همکاری و راهنمایی‌های ارزشمند جناب آقای مهندس فرهنگ کوشا و همراهی استاد ارجمند جناب آقای دکتر سهراب ویسه و همچنین از زحمات بی‌شائبه دوستان خوبم خانم‌ها دکتر مهدیه آبروش، دکتر آزاده عسگری‌نژاد، مهندس مهناز مظلومی و مهندس فهیمه فیروزیار در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی برای تمام حمایت‌هایشان تشکر می‌کنم. همچنین از جناب آقای جواد محمدیان و دوستان عزیزم خانم‌ها فاطمه باقری و فاطمه سردارآبادی برای همراهیشان بسیار سپاسگزارم.

پروردگارا حسن عاقبت، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما.

## تعهد نامه

این جانب الهام هراتیان نژاد دانشجوی دوره دکتری رشته فیزیک حالت جامد دانشکده فیزیک و مهندسی هسته ای دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله " بررسی اپتیکی شیشه‌های پوشش یافته با نانوساختارهای اکسید فلزی (مانند ZnO) و عملکرد حرارتی بهبود یافته برای استفاده در صنعت ساختمان" تحت راهنمایی دکتر حمید هراتی زاده و دکتر بهروز محمدکاری متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط این‌جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به‌دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

## تاریخ

## امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

## چکیده

پوشش‌های کم گسیل، پوشش‌های چند لایه بسیار نازکی از فلزات و اکسیدهای فلزی هستند که برای گزینش طیف عبوری روی شیشه لایه نشانی می‌شوند. استفاده از این پوشش‌ها روی شیشه در پنجره‌های ساختمان، انتقال گرمای تابشی را بدون کاهش قابل ملاحظه در عبور طیف مرئی خورشید، به شدت کاهش می‌دهد. بنابراین به کارگیری این پوشش‌ها در شیشه ضمن امکان استفاده مناسب از نور طبیعی، باعث صرفه جویی در مصرف انرژی می‌شود.

در این پژوهش، فیلم‌های فوق نازک با آرایش  $ZnO/Ag/ZnO$  روی شیشه با دستگاه مگنترون اسپاترینگ با تارگت‌های  $ZnO$  و  $Ag$  در دمای اتاق لایه‌نشانی شدند. در این فیلم‌ها، افزایش ضریب بازتاب طیف فروسرخ خورشید با کمترین کاهش در عبور طیف مرئی با روشی مقرون به صرفه و با کمترین تعداد لایه‌ها و کاهش هزینه خلاء، مدنظر قرار گرفت. ویژگی‌های اپتیکی، الکتریکی و حرارتی با هدف کاربرد پوشش در شیشه ساختمان جهت صرفه جویی در مصرف انرژی، با تغییر زمان لایه‌نشانی  $ZnO$  و  $Ag$  بررسی شدند. همچنین ویژگی‌های الکتریکی و اپتیکی پوشش‌های کم گسیل با یک یا دو لایه نقره با تغییر زمان لایه‌نشانی نقره مقایسه شدند.

هدف این رساله، بهره‌گیری از لایه‌های فوق نازک نانو ساختار  $ZnO$  و  $Ag$  در ساخت شیشه پوشش دار، به منظور دستیابی به مناسب‌ترین راه‌حل‌ها برای کاهش ضریب گسیلندگی پوشش، افزایش ضریب بازتاب فروسرخ و نسبت ضریب عبور مرئی به ضریب عبور خورشیدی، و در نهایت کاهش ضریب انتقال حرارت شیشه دوجداره متشکل از این پوشش کم گسیل می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** ویژگی‌های اپتیکی، ساختمان، صرفه جویی، پوشش کم گسیل، نقره، اکسید روی

## فهرست مقالات مستخرج از این رساله

- 1- Influence of Ag Mid-layer in the Optical and Thermal Properties of ZnO/Ag/ZnO Thin Films on the Glass Used in Buildings as Insulating Glass Unit (IGU), Elham Haratian Nezhad, Hamid Haratizadeh\*, Behrouz Mohammad Kari, *Ceramics International journal*, DOI: [10.1016/j.ceramint.2019.02.037](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.02.037)
- 2- Influence of Thickness and Number of Silver Layers in the Electrical and Optical Properties of ZnO/Ag/ZnO/Ag/ZnO ultra-Thin Films Deposited on the Glass for Low-Emissivity Applications, Elham Haratian Nezhad, Hamid Haratizadeh\*, Behrouz Mohammad Kari, *Prog. Color Colorants Coat. 12 (2019), 83-91*

۱- شبیه سازی ضریب انتقال حرارت برای شیشه کم گسیل در ساختمان در اقلیم گرم، الهام هراتیان نژاد، حمید هراتی زاده، بهروز محمدکاری، همایش ملی ساختمان پایدار و انرژی، ۲۶ و ۲۷ دی ماه ۱۳۹۷، سازمان نظام مهندسی ساختمان، اصفهان

۲- تاثیر ضخامت لایه فلزی در شیشه های کم گسیل برای کاهش مصرف انرژی جدارهای نورگذر ساختمان ها در دو اقلیم گرم و خشک و سرد ایران، الهام هراتیان نژاد، حمید هراتی زاده، بهروز محمدکاری، پنجمین کنفرانس بین المللی فناوری و مدیریت انرژی با رویکرد انرژی، آب و محیط زیست، ۳۰ بهمن و ۱ اسفند ۱۳۹۷، انجمن انرژی ایران، تهران



## فهرست مطالب

مقدمه.....	۱
<b>فصل ۱.....</b>	<b>۷</b>
اهداف این رساله .....	۳
ساختار رساله .....	۴
۱-۱ شیشه پوشش دار در ساختمان .....	۸
۲-۱ معرفی شیشه کم گسیل.....	۱۱
۱-۲-۱ انواع مواد مورد استفاده در پوشش های کم گسیل	۱۷
<b>فصل ۲.....</b>	<b>۲۱</b>
۱-۲ بررسی پارامترهای موثر در ویژگی های اپتیکی فیلم ها.....	۲۲
۱-۱-۲ برهمکنش نور با ماده	۲۲
۱-۱-۱-۲ معادلات ماکسول در ماده .....	۲۳
۲-۱-۲ ویژگی های اپتیکی ماده	۲۷
۱-۲-۱-۲ فرایندهای جذب اپتیکی .....	۲۹
۳-۱-۲ ضریب جذب، عبور، بازتاب و گسیلندگی	۳۳
۱-۳-۱-۲ تئوری عمومی فیلترها .....	۳۴
۲-۳-۱-۲ عبور و بازتاب از پوشش چند لایه.....	۴۰
۳-۳-۱-۲ طراحی پوشش های لایه نازک اپتیکی.....	۴۱
۴-۱-۲ روشهای لایه نشانی فیلم های لایه نازک	۴۲
۱-۴-۱-۲ کنترل ضخامت در لایه نشانی.....	۴۵
۵-۱-۲ تاثیر الکترون های آزاد، محدودیت کوانتومی و رزونانس پلاسمون های سطحی در ویژگی های اپتیکی مواد نیم رسانای شفاف و فلزات	۴۶
۱-۵-۱-۲ بررسی ویژگی های اپتیکی اکسید رسانای شفاف .....	۴۷
۲-۵-۱-۲ بررسی ویژگی های اپتیکی فلزات.....	۴۹
۶-۱-۲ عملکرد پوشش های کم گسیل روی شیشه در ساختمان	۵۲
۲-۲ پیشینه پژوهش در تعیین خصوصیات فیزیکی و اپتیکی لایه های نازک مختلف.....	۵۴
۱-۲-۲ بررسی ویژگی های اپتیکی و الکتریکی پوشش کم گسیل در چند پتنت	۵۴
۲-۲-۲ بررسی ویژگی های اپتیکی و الکتریکی پوشش های لایه نازک در مقالات دیگر	۵۸
<b>فصل ۳.....</b>	<b>۷۳</b>

۷۴	۱-۳ تعاریف .....
۷۸	۲-۳ پارامترهای موثر در محاسبه ضریب انتقال حرارت شیشه .....
۷۹	۳-۳ ورود داده‌های مورد نیاز نرم افزار .....
۸۵	۴-۳ انواع شیشه Low-E و کاربرد آن‌ها .....
۸۶	۱-۴-۳ شیشه Low-E با کسب حرارت خورشیدی بالا High-SHGC Low-E
۸۶	۲-۴-۳ شیشه Low-E با کسب حرارت خورشیدی متوسط Moderate-SHGC Low-E
۸۶	۳-۴-۳ شیشه Low-E با کسب حرارت خورشیدی پائین Low-SHGC Low-E
۸۷	۵-۳ برخی پژوهش‌های انجام شده مربوط به تعیین عملکرد حرارتی پنجره‌ها .....
۹۱	فصل ۴ .....
۹۴	۱-۴ آماده‌سازی نمونه و روش لایه‌نشانی .....
۹۶	۲-۴ روش‌های مشخصه‌یابی .....
۹۷	۱-۲-۴ اسپکتروسکوپی UV-Vis-NIR
۱۰۰	۲-۲-۴ عملکرد الکتریکی
۱۰۰	۳-۲-۴ عملکرد حرارتی
۱۰۲	۳-۴ لایه‌نشانی ZnO/Ag/ZnO با تغییر زمان لایه‌نشانی ZnO .....
۱۰۲	۱-۳-۴ پارامترهای لایه‌نشانی
۱۰۲	۲-۳-۴ تصاویر FESEM
۱۰۳	۳-۳-۴ بررسی ویژگی‌های الکتریکی
۱۰۶	۴-۳-۴ بررسی ویژگی‌های اپتیکی در طیف مرئی و فروسرخ در دماهای مختلف
۱۰۶	۱-۴-۳-۴ بررسی ویژگی‌های اپتیکی در طیف مرئی و فروسرخ در دمای اتاق .....
۱۱۸	۲-۴-۳-۴ بررسی طیف مرئی و فروسرخ لایه‌های ZnO/Ag/ZnO .....
۱۲۰	۵-۳-۴ بررسی ویژگی‌های حرارتی
۱۲۴	۶-۳-۴ نتیجه‌گیری
۱۲۵	۴-۴ لایه‌نشانی ZnO/Ag/ZnO با تغییر زمان لایه‌نشانی نقره .....
۱۲۶	۱-۴-۴ پارامترهای لایه‌نشانی
۱۲۶	۲-۴-۴ تصاویر FESEM
۱۲۷	۳-۴-۴ بررسی ویژگی‌های الکتریکی
۱۳۱	۴-۴-۴ بررسی ویژگی‌های اپتیکی در طیف مرئی و فروسرخ در دماهای مختلف
۱۳۱	۱-۴-۴-۴ بررسی ویژگی‌های اپتیکی در طیف مرئی و فروسرخ در دمای اتاق .....
۱۴۰	۲-۴-۴-۴ بررسی طیف مرئی و فروسرخ لایه‌های ZnO/Ag/ZnO .....

- ۱۴۳ ۵-۴-۴ بررسی ویژگی‌های حرارتی
- ۱۴۶ ۶-۴-۴ نتیجه‌گیری
- ۱۴۷..... ۵-۴ لایه‌نشانی ZnO/Ag/ZnO/Ag/ZnO با تغییر زمان لایه‌نشانی نقره در دو لایه.....
- ۱۴۷ ۱-۵-۴ پارامترهای لایه‌نشانی
- ۱۴۷ ۲-۵-۴ تصاویر FESEM
- ۱۴۸ ۳-۵-۴ بررسی ویژگی‌های الکتریکی
- ۱۵۰ ۴-۵-۴ بررسی ویژگی‌های اپتیکی در طیف مرئی و فروسرخ در دماهای مختلف نمونه هنگام آزمون اسپکتروسکوپی
- ۱۵۰..... ۱-۴-۵-۴ بررسی ویژگی‌های اپتیکی در طیف مرئی و فروسرخ در دمای اتاق.....
- ۱۶۱..... ۲-۴-۵-۴ بررسی طیف مرئی و فروسرخ لایه‌های ZnO/Ag/ZnO /Ag/ZnO.....
- ۱۶۲ ۵-۵-۴ بررسی ویژگی‌های حرارتی
- ۱۶۴ ۶-۵-۴ بررسی نتایج اپتیکی و الکتریکی پوشش‌های تک لایه و دو لایه نقره
- ۱۶۵..... ۶-۴ نتیجه‌گیری.....
- ۱۶۸..... ۷-۴ پیشنهاداتی برای کارهای آینده.....
- ۱۶۹ ..... منابع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ محدوده‌های مختلف طیف خورشید ..... ۱۴
- شکل ۲-۱ مقایسه طیف ساطع شده از خورشید و طیف ساطع شده از اجسام ..... ۱۴
- شکل ۳-۱ ویژگی‌های اپتیکی شیشه فلوت و شیشه کم گسیل ..... ۱۶
- شکل ۱-۲ توزیع انرژی چگالی حالات الکترونیکی نیمرسانا (الف) در حالت ایده آل و (ب) واقعی ..... ۳۱
- شکل ۲-۲ عبور و بازتاب نور از صفحه موازی تخت ..... ۳۵
- شکل ۳-۲ آرایش فیلترهایی که به صورت سری یا موازی قرار گرفته‌اند ..... ۴۱
- شکل ۴-۲ نحوه عملکرد دستگاه مگنترون اسپاترینگ DC ..... ۴۴
- شکل ۵-۲ ضریب جذب فیلم‌های نازک Ga-doped ZnO (ZnO:Ga) با تغییر تراکم حاملها ..... ۴۸
- شکل ۶-۲ گسیلندگی و figure of merit برای لایه‌های ZnS/Ag/ZnS برحسب ضخامت نقره ..... ۵۸
- شکل ۷-۲ طیف عبور برای چند نوع پوشش مختلف کم گسیل ..... ۵۹
- شکل ۸-۲ نمودار تغییر پارامترهای الکتریکی پوشش چندلایه FTO/Ag/FTO ..... ۶۰
- شکل ۹-۲ نمودار تغییر عبور طیف مرئی پوشش چندلایه FTO/Ag/FTO برحسب ضخامت FTO و Ag ..... ۶۱
- شکل ۱۰-۲ نمودار مقاومت سطحی لایه نقره روی شیشه و زیرلایه‌های AZO و ITO ..... ۶۲
- شکل ۱۱-۲ طیف عبور AZO/Ag/AZO (سمت راست) و ITO/Ag/ITO (سمت چپ) ..... ۶۳
- شکل ۱۲-۲ طیف عبور، بازتاب و جذب AZO/Ag/AZO با ضخامت‌های متفاوتی از لایه نقره ..... ۶۴
- شکل ۱۳-۲ نمودار تراکم حامل‌ها و مقاومت الکتریکی برای ضخامت‌های ..... ۶۵
- شکل ۱۴-۲ نمودار طیف عبور از فیلم‌های ZnO/Ag/ZnO برای ضخامت‌های مختلف ZnO و Ag ..... ۶۸
- شکل ۱۵-۲ پارامترهای اپتیکی و الکتریکی ZnO(20 nm)/Ag/ZnO(20 nm) با تغییر ضخامت نقره ..... ۶۸
- شکل ۱۶-۲ طیف عبور ZnO/Ag/ZnO با تغییر ضخامت لایه زیری و بالایی ZnO ..... ۶۹
- شکل ۱۷-۲ مقاومت سطحی ZnO/Ag/ZnO با تغییر ضخامت لایه نقره و ZnO ..... ۷۰
- شکل ۱۸-۲ منحنی عبور و بازتاب از فیلم‌های ZnO/Ag/ZnO با تغییر ضخامت لایه نقره و ZnO ..... ۷۱
- شکل ۱-۳ اجزای تشکیل دهنده نمونه‌ای از مجموعه شیشه‌های دو جداره ..... ۷۷
- شکل ۲-۳ محل قرارگیری پوشش کنترل کننده نور خورشید در یک مجموعه شیشه دو جداره ..... ۷۸
- شکل ۳-۳ برگه مشخصات شیشه در Glass Library ..... ۸۱
- شکل ۴-۳ مشخصات شیشه‌های متداول و خاص تولیدکنندگان بزرگ شیشه موجود در Glass Library ..... ۸۲
- شکل ۵-۳ مشخصات گازهای متداول پرکننده بین دو جدار Gas Library ..... ۸۳

- شکل ۳-۶ محاسبه ضرایب انتقال حرارت و بهره حرارت خورشیدی برای پوشش انتخابی در سطح ۲ ..... ۸۴
- شکل ۳-۷ محاسبه ضرایب انتقال حرارت و بهره حرارت خورشیدی برای پوشش انتخابی در سطح ۳ ..... ۸۵
- شکل ۳-۸ ضریب انتقال حرارت شیشه دوجداره برحسب ضخامت نقره ..... ۸۷
- شکل ۴-۱ آماده‌سازی و چینش زیرلایه‌ها برای لایه‌نشانی با دستگاه sputtering دانشگاه صنعتی شاهرود .. ۹۵
- شکل ۴-۲ شماتیک پارامترهای تابش فرودی به شیشه دوجداره برای بررسی ویژگی‌های اپتیکی و حرارتی آن ۹۶.
- شکل ۴-۳ شماتیک کلی اجزای تشکیل دهنده اسپکتروفوتومتر ..... ۹۷
- شکل ۴-۴ شماتیک کره جمع کننده برای اندازه‌گیری بازتاب پراکنده ..... ۹۸
- شکل ۴-۵ دستگاه اسپکتروفوتومتر با کره جمع کننده مورد استفاده برای اندازه‌گیری ..... ۹۹
- شکل ۴-۶ شماتیک پرتوهای فرودی، عبوری و بازتابی ..... ۹۹
- شکل ۴-۷ تصویر برش مقطع لایه ZnO/Ag/ZnO با ۱۵۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی ZnO ..... ۱۰۳
- شکل ۴-۸ نمودار مقاومت الکتریکی سطحی و بازتاب در محدوده فروسرخ ..... ۱۰۶
- شکل ۴-۹ طیف عبور و بازتاب از لایه ZnO با ۳۰۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی ..... ۱۰۷
- شکل ۴-۱۰ ضریب عبور در طول موج ۵۵۰ nm، مرئی، خورشیدی و فروسرخ ..... ۱۰۸
- شکل ۴-۱۱ طیف عبور (سمت چپ) و بازتاب (سمت راست) از لایه‌های ZnO/Ag/ZnO ..... ۱۰۹
- شکل ۴-۱۲ طیف عبور و بازتاب از لایه ZnO/Ag/ZnO برای ۱۵۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی ZnO ..... ۱۱۱
- شکل ۴-۱۳ طیف عبوری از شیشه کم گسیل ایده‌آل در مقایسه با طیف خورشید ..... ۱۱۳
- شکل ۴-۱۴ طیف جذب از لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های لایه‌نشانی ZnO ..... ۱۱۴
- شکل ۴-۱۵ ساختار گاف انرژی برای Ag و ZnO قبل (I) و بعد (II) از لایه‌نشانی ..... ۱۱۶
- شکل ۴-۱۶ تعیین گاف انرژی لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های لایه‌نشانی ZnO ..... ۱۱۷
- شکل ۴-۱۷ اسپکتروفوتومتر به همراه سیرکولاتور و ترموکوپل‌های نصب شده ..... ۱۱۸
- شکل ۴-۱۸ نمودار طیف عبور برای لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های لایه‌نشانی ..... ۱۲۰
- شکل ۴-۱۹ قسمت حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک نقره ..... ۱۲۵
- شکل ۴-۲۰ تصویر برش مقطع لایه ZnO/Ag/ZnO با ۴۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی نقره ..... ۱۲۷
- شکل ۴-۲۱ نمودار مقاومت الکتریکی سطحی و تراکم حامل‌ها ..... ۱۳۰
- شکل ۴-۲۲ ضریب عبور از لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های مختلف لایه‌نشانی Ag ..... ۱۳۱
- شکل ۴-۲۳ طیف عبور (سمت چپ) و بازتاب (سمت راست) از لایه‌های ZnO/Ag/ZnO ..... ۱۳۷
- شکل ۴-۲۴ طیف جذب از لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های لایه‌نشانی نقره ..... ۱۳۹
- شکل ۴-۲۵ تعیین گاف انرژی لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های لایه‌نشانی نقره از ۱۰ تا ۴۵ ثانیه .. ۱۴۰
- شکل ۴-۲۶ نمودار طیف عبور برای لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های لایه‌نشانی Ag ..... ۱۴۳

- شکل ۴-۲۷ تصاویر سطحی و برش مقطع لایه ZnO/Ag/ZnO/Ag/ZnO ..... ۱۴۸
- شکل ۴-۲۸ نمودار عبور (بالا) و بازتاب (پایین) تک لایه اکسید روی (ZnO) ..... ۱۵۱
- شکل ۴-۲۹ نمودار مقایسه پارامترهای اپتیکی و الکتریکی پوشش‌های با تک لایه و دو لایه نقره ..... ۱۵۲
- شکل ۴-۳۰ نمودار جذب، عبور و بازتاب پوشش‌های با دو لایه نقره ..... ۱۵۳
- شکل ۴-۳۱ نمودار عبور و بازتاب پوشش‌های تک لایه و دو لایه نقره ..... ۱۵۷
- شکل ۴-۳۲ نمودار جذب پوشش‌های تک لایه و دو لایه نقره ..... ۱۶۰
- شکل ۴-۳۳ نمودار طیف عبور برای پوشش‌های تک لایه و دو لایه نقره در دماهای مختلف ..... ۱۶۲
- شکل ۴-۳۴ تصویر نمونه‌های لایه‌نشانی شده در دمای اتاق و دمای  $60^{\circ}\text{C}$  با دوربین فرسرخ ..... ۱۶۶

## فهرست جداول

- جدول ۱-۱ مقایسه شیشه‌های با پوشش نرم و پوشش سخت..... ۱۰۴
- جدول ۱-۴ ضریب عبور مرئی، مقاومت سطحی، گسیلندگی و تحرک پذیری ..... ۱۰۴
- جدول ۲-۴ ضریب عبور و بازتاب برای لایه‌های ZnO/Ag/ZnO..... ۱۱۰
- جدول ۳-۴ مشخصات حرارتی و نوری شیشه‌های مورد مطالعه..... ۱۲۲
- جدول ۴-۴ مقادیر ضریب انتقال حرارت و ضریب بهره حرارتی خورشید (SHGC) برای لایه‌های ..... ۱۲۲
- جدول ۵-۴ ضریب عبور مرئی، مقاومت سطحی، گسیلندگی و تحرک پذیری ..... ۱۲۸
- جدول ۶-۴ ضریب عبور و بازتاب برای لایه‌های ZnO/Ag/ZnO..... ۱۳۲
- جدول ۷-۴ پارامترهای اپتیکی و گسیلندگی از لایه‌های ZnO/Ag/ZnO ب ..... ۱۴۴
- جدول ۸-۴ مقادیر ضریب انتقال حرارت و ضریب بهره حرارتی خورشید (SHGC) ..... ۱۴۵
- جدول ۹-۴ پارامترهای الکتریکی اندازه‌گیری شده در پوشش‌های سه لایه و پنج لایه ..... ۱۴۹
- جدول ۱۰-۴ مقادیر ضریب عبور و بازتاب پوشش‌های سه لایه و پنج لایه در طیف مرئی و فروسرخ..... ۱۵۸
- جدول ۱۱-۴ پارامترهای اپتیکی و الکتریکی مورد استفاده در نرم افزار..... ۱۶۳
- جدول ۱۲-۴ مقادیر ضریب انتقال حرارت و ضریب بهره حرارتی خورشید (SHGC) ..... ۱۶۳

## مقدمه

در سالهای اخیر، با توجه به افزایش تقاضا برای حامل‌های مختلف انرژی و استفاده بیش از حد و فزاینده از سوخت‌های فسیلی، استفاده از مواد با هدف صرفه‌جویی انرژی مورد توجه بسیاری از علاقمندان قرار گرفته است. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، با نام " چشم‌انداز انرژی جهان"، تا سال ۲۰۳۰، تقاضای انرژی در جهان ۵۵ درصد افزایش خواهد داشت و تا سال ۲۰۵۰ به دو برابر خواهد رسید [۱]. بنابراین، فشارها برای افزایش عرضه انرژی اجتناب‌ناپذیر است.

با توجه به این نکته که سهم انرژی مصرفی در بخش ساختمان نسبت به دو بخش صنعت و حمل و نقل بیشتر است (۴۰ درصد از مجموع انرژی مصرفی در ساختمان‌ها در سال ۱۹۹۶ و ۵۳ درصد از مصرف برق در بخش ساختمان بوده)، لزوم عطف توجه ویژه به این بخش محرز است.

علاوه بر این، مسائل دیگری مثل تغییر اقلیم و تبعات ناشی از آن، اهمیت صرفه‌جویی انرژی را دوچندان کرده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف زیاد انرژی‌های فسیلی به تغییر اقلیم منجر شده است. محققان در گزارشی در سازمان جهانی بهداشت اعلام کرده‌اند تغییر اقلیم سالانه باعث ۱۵۰۰۰۰ مورد مرگ و میر و ۵ میلیون بیماری می‌شود [۲]. گرم شدن زمین و بالا آمدن سطح آب دریا، کمبود آب، بحران غذا و آلودگی‌های محیط زیست که ادامه حیات موجودات زنده را تهدید می‌کنند، نیز نتیجه تغییر اقلیم است.

از طرف دیگر، ذخیره منابع نفتی حداکثر تا ۴۰ سال و منابع زغال‌سنگ تا ۲۰۰ سال پیش‌بینی شده‌اند [۱]. در چنین شرایطی، دو دیدگاه اساسی برای استفاده بهینه از منابع انرژی وجود دارد:

- استفاده از انرژی‌های جایگزین همچون انرژی هسته‌ای و انرژی‌های تجدیدپذیر، شامل انرژی خورشید، باد، امواج، آب و ...

- بهینه‌سازی مصرف انرژی با کاهش نیاز گرمایشی- سرمایشی و روشنایی (مصنوعی) ساختمان از یک طرف و افزایش بازدهی سیستم‌های مورد استفاده در ساختمان، از طرف دیگر.



در نتیجه، یکی از اولویت‌های در نظر گرفته شده در تمامی کشورهای پیشرفته، بهینه‌سازی مصرف انرژی در بخش‌های مختلف از جمله ساختمان و کاهش یا حداقل تثبیت میزان نیاز به انرژی، در جهت افزایش دوره قابل اتکا به انرژی‌های فسیلی و زمان مورد نیاز برای دستیابی به فناوری‌های جایگزین بر پایه انرژی‌های تجدیدپذیر است [۲].

با توجه به اینکه در دوره پس از انقلاب صنعتی دستیابی به انتظارات تعیین شده در زمینه صرفه‌جویی در مصرف انرژی و تأمین شرایط آسایش در فضاهای داخلی، با در نظر گرفتن عوامل تعیین کننده از جمله گرمایش، سرمایش و روشنایی به کمک تجهیزات پیشرفته، با سادگی بیشتری صورت می‌گیرد، رویکرد جدید بر مبنای نگرش پایدار، در مقررات و الزامات صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش تخریب‌های محیط زیست، بر پایه بهره‌گیری هرچه بیشتر از فناوری‌های سازگار با محیط زیست بنا شده است. در چنین شرایطی، طراحان به سمت استفاده هر چه بیشتر از امکانات طبیعی و سیستم‌های غیرفعال سوق داده می‌شوند. به عنوان مثال، برخی از مصالح ساختمانی مورد استفاده برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی، مثل پوشش‌های بازتابنده در پشت بام، پنجره‌های هوشمند، آب‌گرم‌کن‌ها و پانل‌های خورشیدی باعث کاهش مقدار زیادی از نیازهای گرمایی و سرمایی ساختمان می‌گردند. همچنین استفاده از مصالح جاذب طیف می‌تواند با تبدیل تابش خورشیدی به انرژی گرمایی کاهش مصرف برق یا گاز طبیعی را به همراه داشته باشد، و با کم‌شدن انتشار گازهای گلخانه‌ای به کاهش آلودگی محیط زیست کمک کند.

برای نیل به اهداف فوق، پیشرفت‌های فناوری نانو و توسعه کاربردهای صنعتی آن افق روشنی را پیش روی بشر گشوده است و هدف دنبال شده در این تحقیق، بهبود عملکرد شیشه‌های نما، که یکی از عناصر اصلی پوسته خارجی ساختمان محسوب می‌شوند، در جهت کاهش نیاز انرژی ناشی از آن است.

## اهداف این رساله

با توجه به بالا بودن نرخ رشد جمعیت و ساخت و ساز در کشور، مصرف انرژی در ایران به‌طور پیوسته و به سرعت در حال افزایش است. این در حالی است که ایران در منطقه‌ای از کره زمین واقع شده است که از بیشترین میزان تابش و بالاترین پتانسیل بهره‌گیری از انرژی خورشیدی برخوردار است. پس بهره‌گیری هر چه بیشتر از انرژی خورشید برای تأمین نیازهای حرارتی و بصری در فضاهای داخلی یک ساختمان مهم‌ترین راه‌حل مطرح در زمینه صرفه جویی مصرف انرژی می‌باشد.

شیشه به عنوان یک عنصر ارزشمند ساختمان جهت بهره‌گیری هرچه بیشتر از نور طبیعی شناخته می‌شود. از این رو، برای برآوردن این هدف در بخش قابل توجهی از پوسته خارجی ساختمان از شیشه استفاده می‌شود. در چنین شرایطی، نقش شیشه‌ها در پوسته خارجی ساختمان تعیین‌کننده است. اما می‌توان با لایه‌نشانی صحیح لایه‌های نانومتری فلزی و اکسید فلزی روی شیشه علاوه بر بهبود انتقال حرارت این جدارها، امکان بهره‌گیری حداکثر از نور روز در فضاهای داخلی ساختمان را به طور کنترل شده‌ای فراهم کرد.

با توجه به موارد فوق، این پژوهش از این جهت دارای ضرورت است که می‌توان با گزینش کاربردی لایه‌های به کار رفته در پوشش روی شیشه و با کمک بررسی ویژگی‌های اپتیکی این لایه‌ها به بهبود عملکرد حرارتی شیشه در ساختمان دست یابیم.

هدف مورد نظر این پژوهش، شناسایی نقش و ایجاد شرایط بهینه لایه‌های فوق نازک نانوساختار نقره و اکسید روی (ZnO) با ویژگی‌های خاص اپتیکی و تعیین تاثیر شیشه پوشش‌دار بر اصلاح عملکرد حرارتی شیشه در ساختمان است.

## ساختار رساله

- در فصل اول به معرفی پوشش‌های کم گسیل و نحوه عملکرد این پوشش‌ها روی شیشه در ساختمان می‌پردازیم.
- در فصل دوم، ابتدا به بیان و تعریف پارامترهای فیزیکی برای بررسی عملکرد اپتیکی لایه‌های نانومتری و تاثیر پدیده‌های فیزیکی در ویژگی‌های اپتیکی لایه‌ها می‌پردازیم. سپس سوابق موجود در مورد لایه‌نشانی انواع لایه‌ها (به‌ویژه لایه‌های نانومتری) با کاربرد خاص، روی شیشه به منظور بهینه‌سازی خواص اپتیکی آنها بررسی می‌گردد. در ادامه مطالعات زمینه‌ای در مورد انواع شیشه‌های کم گسیل با ویژگی‌های اپتیکی قابل استفاده در ساختمان گزارش می‌شود.
- سپس در فصل سوم به معرفی نرم افزار LBNL Window.7.1 پرداخته و مطالعات انجام شده برای تعیین ضریب انتقال حرارت شیشه پوشش‌دار مطرح می‌شود.
- در فصل چهارم پس از بیان کارهای آزمایشگاهی و شرایط لایه‌نشانی مناسب لایه‌های فوق نازک با آرایش ZnO/Ag/ZnO، ویژگی‌های اپتیکی لایه مدنظر قرار گرفته و خواص اپتیکی این لایه با اندازه‌گیری ضریب عبور و بازتاب آن با تغییر زمان لایه‌نشانی ZnO در طیف خورشیدی بررسی می‌شود. همچنین به بررسی تاثیر افزودن لایه‌های فوق نازک نقره در تغییر ویژگی‌های اپتیکی و حرارتی این پوشش چند لایه می‌پردازیم. ویژگی‌های الکتریکی هر آرایش به طور مجزا بررسی می‌شود. در نهایت، تاثیر پوشش‌گزینشی نهایی را در عملکرد حرارتی شیشه پوشش‌دار در مقایسه با شیشه بدون پوشش شبیه‌سازی و بررسی می‌کنیم.

همچنین به بررسی پارامترهای اپتیکی و الکتریکی پوشش‌های با دو لایه نقره با تغییر زمان لایه نشانی نقره در هر لایه می‌پردازیم.

در انتهای فصل چهارم به نتیجه‌گیری و بیان پارامترهای مختلف مرتبط با لایه‌های فوق نازک تاثیرگذار بر بهبود عملکرد شیشه، برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌پردازیم و پیشنهاداتی برای کارهای آینده ارائه می‌گردد.

## فصل اول

معرفی شیشه پوشش دار و

ملاحظات صرفه جویی انرژی در ساختمان

## ۱-۱ شیشه پوشش دار در ساختمان

در نیمه دوم قرن بیستم، استفاده بی‌رویه از شیشه در نمای ساختمان، مشکلات ناشی از مصرف زیاد انرژی را دوچندان کرد. با وجود اینکه عبور درصد قابل توجهی از نور مرئی خورشید از شیشه امکان تأمین روشنایی طبیعی در زمان زیادی از طول روز را فراهم می‌سازد، ولی تبعات آن، یعنی افزایش انتقال حرارت در دوره سرد و گرم سال در حدی است که این مزیت را کم‌رنگ می‌کند. این در حالی است که اتلاف حرارتی از طریق پنجره در ساختمان بیش از ۶۰ درصد برآورد شده است.

در سال‌های اخیر با توجه به تحولی که در شکل‌گیری فناوری‌های نوین و همچنین ساخت شیشه‌ها به وجود آمده است، می‌توان با لایه‌نشانی لایه‌های بسیار نازک از پوشش‌های گزینشی روی شیشه، دریافت گرمای ناخواسته خورشید را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد، بدون این‌که بهره‌گیری از روشنایی طبیعی خورشید در ساختمان تحت‌الشعاع قرار گیرد. علاوه بر این، می‌توان عملکرد جدارهای شیشه‌ای در اوقات سرد سال را، با دریافت حداکثر گرمای خورشید در طول روز و محدود کردن تلفات حرارت در طول شب، بهبود داد.

بنابراین به عنوان یکی از راه‌حل‌های مطرح به منظور بهبود عملکرد حرارتی و اپتیکی شیشه‌ها، می‌توان روی سطح آنها را با اکسیدهای فلزی و یا مواد معدنی یا فلزات خاصی پوشاند. با این کار می‌توان شیشه‌هایی با محدوده وسیعی از خواص اپتیکی متفاوت که کاربردهای مختلفی را فراهم می‌کنند، تولید کرد. به این نوع از شیشه‌ها، شیشه‌های پوشش‌دار<sup>۱</sup> گفته می‌شود. در این پژوهش بر مطالعه تأثیر لایه‌نشانی پوشش‌های بسیار نازک بر ویژگی‌های اپتیکی شیشه تمرکز می‌گردد.

با توجه به این‌که لایه‌نشانی پوشش‌های مختلف روی شیشه به عنوان یک زیرلایه شفاف با ملاحظات ویژه‌ای همراه است، برای دستیابی هم‌زمان به هدف کاهش گرمای ناخواسته انرژی

---

<sup>۱</sup> Coated Glass

خورشیدی بدون ایجاد محدودیت در بهره‌گیری از نور مرئی این طیف، نیاز به لایه‌نشانی چند پوشش نانومتری متفاوت در مجاورت هم می‌باشد. باید توجه داشت که در طراحی پوشش‌های فوق نازک با ضخامت‌های نانومتری، ویژگی‌های اپتیکی لایه‌ها مانند مقادیر ضریب جذب، عبور، بازتاب و گسیلندگی لایه در طول موج‌های نور فرودی پارامترهای بسیار موثری هستند. در این راستا پارامترهای اپتیکی مختلف لایه‌های نازک، می‌تواند پاسخگوی بسیاری از پیچیدگی‌های موجود در منحنی‌های بازتاب و عبور از این پوشش‌های چند لایه باشند.

جدا از مواد به کار رفته برای پوشش، دو نوع کلی پوشش وجود دارد که پوشش سخت<sup>۱</sup> و پوشش نرم<sup>۲</sup> نامیده می‌شود.

#### - پوشش سخت

این نوع پوشش به صورت بخارات شیمیایی، در حین فرایند تولید و در مرحله شناورسازی، در دمای حدود ۶۰۰ درجه سلسیوس روی سطح شیشه رسوب داده می‌شود. با توجه به دمای بالای فرایند، پوشش کاملاً روی سطح شیشه نفوذ می‌کند و این امر افزایش دوام این نوع پوشش و سهولت کار با این نوع شیشه را به همراه دارد، به طوری که حمل آنها بدون مشکل خاصی صورت می‌گیرد و حتی می‌توان آنها را تمپیر و یا لمینیت کرد. همچنین، با توجه به این نکته که عملیات رسوب بخارات شیمیایی در حین فرایند تولید شیشه انجام می‌شود، هزینه‌های این نوع پوشش نسبت به پوشش نرم کمتر است.

#### - پوشش نرم

در این روش لایه‌های پوشش طی یک سری فرایندهای شیمیایی در محفظه خلاء نسبی روی سطح شیشه اعمال می‌شود. با توجه به این نکته که این نوع پوشش به راحتی خش پذیر است به آن

---

<sup>۱</sup>Hard Coating

<sup>۲</sup>Soft Coating

پوشش نرم گفته می‌شود. همچنین، چنانچه شیشه مورد نظر نیاز به سخت کاری و تمپر شدن داشته باشد، ابتدا باید فرایند مورد نظر انجام شود، سپس پوشش روی شیشه اعمال گردد. در غیر این صورت، پوشش از بین خواهد رفت. به همین دلیل، فرایند پوشش‌دهی باید در فرایندی جداگانه از فرایند تولید شیشه انجام شود، و این امر افزایش هزینه تولید شیشه‌های دارای این نوع پوشش‌ها را، نسبت به پوشش‌های سخت، به دنبال دارد. همچنین به علت نرم بودن این نوع پوشش‌ها از آنها فقط می‌توان در لایه‌های داخلی شیشه‌های لمینیت و یا شیشه‌های چند جداره استفاده کرد. در صورت استفاده در شیشه‌های چند جداره، حتماً باید آن سطحی از شیشه که قرار است به درزبند بچسبد سنگ‌زنی شود و از پوشش پاک گردد.

علی‌رغم تمامی معیاب ذکر شده این نوع پوشش‌ها دارای مزایای مهمی نیز نسبت به پوشش‌های سخت می‌باشند. از آنجایی که ضخامت این پوشش بسیار کمتر از پوشش سخت است بنابراین ضریب عبور نور مرئی آن بسیار بالاتر بوده، به طوری که در بعضی موارد تشخیص آنها از شیشه‌های بدون پوشش به سختی صورت می‌گیرد. همچنین چون فرایند تولید صنعتی در محفظه خلاء نسبی و به صورت کاملاً کنترل شده انجام می‌شود، یکنواختی پوشش بسیار بیشتر از پوشش سخت است و کدرشدگی آن حداقل می‌باشد. اما بزرگترین مزیت این نوع پوشش نسبت به پوشش سخت ضریب انتقال حرارت<sup>۱</sup> پایین آن است.

در جدول زیر پوشش‌های سخت و نرم از نظر مزایا و معایبشان مقایسه شده‌اند.

---

<sup>1</sup> Thermal transmittance



جدول ۱-۱ مقایسه شیشه‌های با پوشش نرم و شیشه‌های با پوشش سخت [۳].

پوشش سخت	پوشش نرم	
پوشش چند لایه شامل: سرامیک شفاف، ماده نیمه رسانا، چند لایه پوشش زیری	پوشش چند لایه شامل: چند لایه فلز و اکسیدهای فلزی	نوع پوشش
در حین فرایند تولید شیشه، اعمال پوشش همزمان با فرایند تولید شیشه فلوت	جدا از فرایند تولید شیشه، نیاز به فرایند و زمان اضافه	فرایند اعمال
فشار اتمسفری	شرایط خلأ نسبی	فشار
پایین انرژی مورد نیاز از فرایند تولید شیشه فلوت کسب می‌شود	بالا انرژی مورد نیاز ۳ تا ۹ برابر پوشش سخت	انرژی مورد نیاز برای اعمال پوشش
بلی	خیر	استفاده در شیشه‌های تک جداره؟
عدم نیاز به برداشتن پوشش از سطوحی که قرار است با درزبند در تماس باشند	لازمه برداشتن پوشش از سطوح مجاور لبه که قرار است با درزبند در تماس باشند	شیشه‌های چند جداره
مقاوم و بادوام. قابل حمل با دستکش مانند شیشه‌های معمولی	به راحتی خش‌پذیر. نیاز به آموزش پرسنل و تجهیزات خاص	برش، نظافت و جابجایی
به راحتی امکان‌پذیر، پس از اعمال پوشش	مشکل، لازمه اعمال پوشش بعد از تمپر یا خم کاری	تمپر و یا خم کردن
امکان نگهداری مانند شیشه‌های معمولی، بدون ایجاد خطر برای پوشش	محدودیت زمان نگهداری، خطر از بین رفتن، در صورت قرار گرفتن محصول بیش از ۳-۴ هفته در معرض رطوبت	انبارش
امکان حمل و نقل مانند شیشه معمولی	مشکل، به دلیل خش‌پذیری و حساسیت به رطوبت	حمل و نقل
بیشتر از پوشش نرم	کمتر از پوشش سخت	ضریب انتقال حرارت
کمتر از پوشش نرم	بیشتر از پوشش سخت (گاهی قابل تشخیص از شیشه‌های معمولی نیست)	ضریب عبور نور
بیشتر	کمتر	کدر بودن
کمتر	بیشتر	قیمت

## ۲-۱ معرفی شیشه کم گسیل

شیشه کم گسیل شیشه شفاف است که لایه فوق نازک نانومتری از فلز با بازتابندگی زیاد با لایه‌های دی‌الکتریک به کمک پاشش مغناطیسی و در شرایط خلأ نسبی روی سطح آن رسوب داده

شده است. این پوشش‌ها گزینش طیفی دارند: بخش مرئی طیف الکترومغناطیس (طول موج‌های ۰/۴ تا ۰/۷ میکرون) را به خوبی عبور می‌دهند، طیف فروسرخ (طول موج‌های بزرگتر از ۰/۷ میکرون) را بازتاب کرده و طیف فرابنفش (طول موج‌های کمتر از ۰/۴ میکرون) را جذب می‌کنند.

همچنین این پوشش باعث کاهش ضریب گسیلندگی حرارتی<sup>۱</sup> سطح پوشش‌دار شیشه می‌شود. به علت نازک بودن سطح رسوب داده شده، می‌توان شیشه‌های کم گسیلی با میزان عبور نور مرئی معادل میزان عبور شیشه‌های معمولی تولید کرد. علاوه بر این، با افزودن لایه‌های خاص می‌توان این نوع شیشه‌ها را با رنگ‌های مختلف نیز تولید کرد. لازم به ذکر است که این نوع شیشه‌ها فقط در ساختار مجموعه شیشه‌های چند جداره قابل استفاده هستند.

جدای از کاربرد این پوشش‌ها در ساختمان، کاربردهای متنوع دیگری نیز به دلیل رسانندگی الکتریکی این فیلم‌ها وجود دارد. مثلاً کاربرد آنها، به عنوان رسانای شفاف<sup>۲</sup>، در بسیاری از سیستم‌های خورشیدی مانند سلول‌های خورشیدی ارگانیک یا حساس به رنگ، پنجره‌های سوئیچی هوشمند و همچنین حسگرهای گازی، ال.ای.دی‌ها و نمایشگرها متداول است. کاربردهای وسیع این پوشش‌ها، آنها را در اولویت بررسی‌های ابرتکنولوژی قرار داده است.

برای اینکه درک درستی از اساس کار شیشه‌های کم گسیل به دست آید لازم است طول موج ساطع شده از خورشید که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است مورد بررسی قرار گیرد. همان‌طور که در شکل ۱-۱ مشاهده می‌شود طیف خورشید به سه دسته تقسیم می‌شود.

- امواج فرابنفش<sup>۳</sup> که در محدوده طول موجی ۳۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر قرار دارند و پنج درصد انرژی تابشی خورشید را تشکیل می‌دهد. این امواج دارای انرژی زیادی هستند و به علت طول موج پایین به راحتی در مواد نفوذ کرده و قدرت تخریب بالایی دارند. دلیل عمده رنگ‌پریدگی

---

<sup>1</sup> Thermal emissivity

<sup>2</sup> Transient conductors (TCs)

<sup>3</sup> Ultraviolet

وسایل منزل که در معرض تابش خورشید قرار دارند همین امواج هستند این امواج همچنین برای سلامتی نیز مضر می‌باشند بنابراین حذف کامل این طیف مفید است.

- محدوده طول موجی ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر، طیف مرئی<sup>۱</sup> خورشید را تشکیل می‌دهند. این همان طیفی است که تا جایی که باعث ایجاد پدیده خیره‌کنندگی<sup>۲</sup> نشود مورد پذیرش و مطلوب است. نفوذ این طیف از خورشید به داخل ساختمان مفید بوده و باعث ایجاد روشنایی طبیعی در داخل ساختمان و جلوگیری از استفاده نور مصنوعی می‌شود. این طیف حدود ۴۳ درصد از انرژی تابشی خورشید را تشکیل می‌دهد.

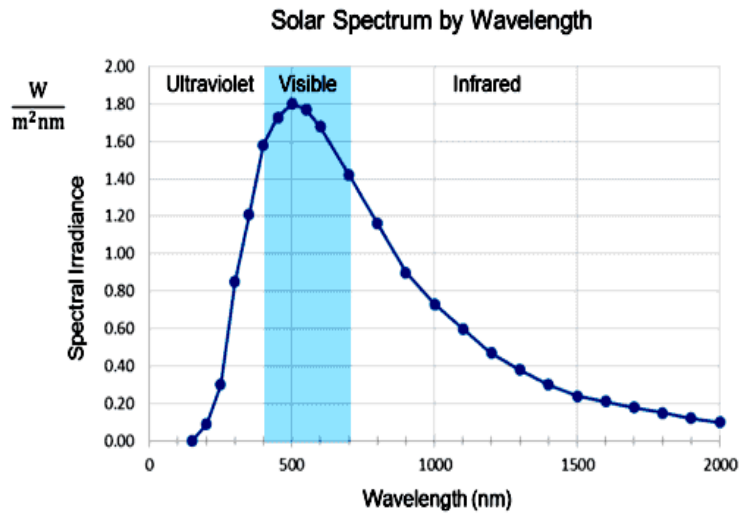
- سومین دسته از طیف خورشید از امواجی با طول موج‌هایی بین ۷۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر تشکیل شده است که امواج فروسرخ نزدیک<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند. این امواج اگرچه مرئی نیستند ولی از آنجایی که ۵۲ درصد از انرژی تابشی خورشید را تشکیل می‌دهند در زمستان می‌توانند بسیار مفید باشند و باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در بار حرارتی ساختمان در زمستان شوند. اگرچه نفوذ این امواج به داخل ساختمان در تابستان و یا در مناطق گرمسیر باعث افزایش بار سرمایشی ساختمان خواهد شد و مضر خواهد بود.

---

<sup>1</sup> Visible

<sup>2</sup> Glare

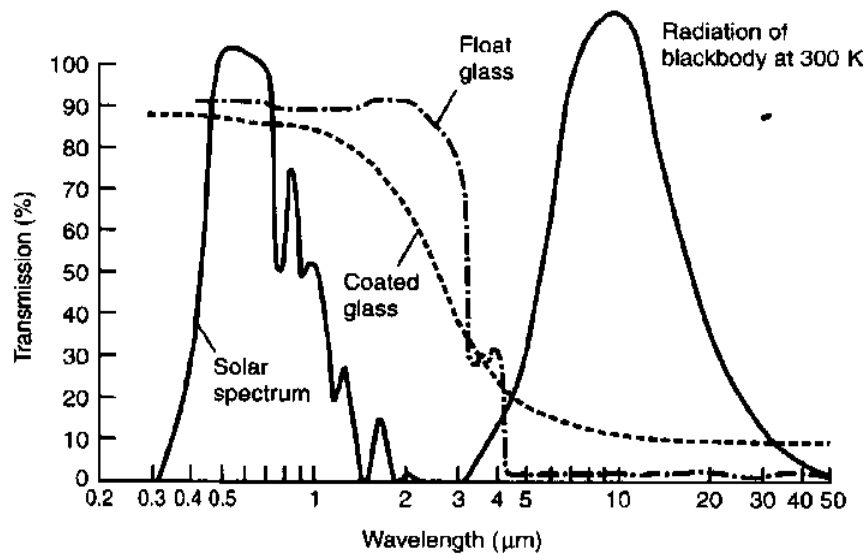
<sup>3</sup> Near Infrared



شکل ۱-۱ محدوده‌های مختلف طیف خورشید

از طرفی طیف ساطع شده از اجسام در دمای ۳۰۰ درجه کلوین که تقریباً دمای اجسام داخل

اتاق است در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱ مقایسه طیف ساطع شده از خورشید و طیف ساطع شده از اجسام در دمای ۳۰۰ کلوین همراه با طیف عبوری از شیشه فلوت ساده (منحنی خط نقطه) و شیشه پوشش‌دار (منحنی نقطه‌چین)

همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشترین شدت تابش در محدوده طول موجی ۵۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ نانومتر قرار دارد که طیف فرورسرخ دور<sup>۱</sup> نامیده می‌شود و در اصل همان انرژی حرارتی ساطع شده از اجسام است و چنانچه از طریق شیشه به بیرون ساختمان ساطع شود یک قسمت از تلفات حرارتی ساختمان را در زمستان تشکیل می‌دهد.

با توجه به توضیحات فوق برای مناطق سردسیر، شیشه‌ای ایده آل است که امواج مرئی خورشید و فرورسرخ نزدیک را از خود عبور دهد ولی اجازه عبور امواج فرورسرخ دور را از خود ندهد. بدین ترتیب در حالت ایده آل نزدیک به ۹۵ درصد از انرژی تابشی خورشید از طریق شیشه مذکور به داخل ساختمان وارد می‌شود ولی انرژی داخل ساختمان در اثر تابش به خارج ساطع نمی‌شود. حال با مراجعه به شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود که شیشه فلوت معمولی از این نظر بسیار مناسب عمل می‌کند. ولی اتفاقی که در عمل می‌افتد این است که در شیشه‌های دو جداره، جداری که در سمت داخل ساختمان است در اثر تماس با هوای داخل گرم می‌شود. همچنین علی‌رغم آنچه که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، شیشه معمولی تقریباً به هیچ وجه اجازه عبور امواج فرورسرخ دور را نمی‌دهد، این به معنی انعکاس همه این امواج به داخل ساختمان نیست، زیرا قسمت عمده آن توسط شیشه جذب می‌شود، که همین امر نیز باعث می‌شود دمای آن به‌طور چشمگیری بالاتر از دمای جدار مجاور هوای بیرون باشد، که با توجه به ضریب گسیلندگی حرارتی بالای سطوح شیشه معمولی (حدود ۰/۸۹) نتیجه این امر تبادل انرژی حرارتی با جدار بیرونی و افزایش ضریب انتقال حرارت کلی<sup>۲</sup> مجموعه می‌باشد.

در شیشه‌های با پوشش کم گسیل با پایین آوردن ضریب گسیلندگی حرارتی شیشه (حدود ۰/۰۴)، از تبادل حرارتی از طریق تشعشع جدار داخلی شیشه با جدار خارجی و اشیا بیرون ساختمان

---

<sup>۱</sup> Far infrared

<sup>۲</sup> Total thermal transmittance

در مناطق سردسیر جلوگیری به عمل می‌آید. بدین ترتیب می‌توان ضریب انتقال حرارت کلی مجموعه را حتی تا نصف تقلیل داد.

اما شیشه کم‌گسیل ایده‌آل برای مناطق گرمسیر باید مانع از ورود تابش خورشید در طیف فروسرخ نزدیک به داخل شود تا بار سرمایشی کاهش یابد. بنابراین در این نوع شیشه باید تا حد امکان مانع از عبور طیف خورشیدی با طول موج‌های بیشتر از ۸۰۰ نانومتر شود. اما باید توجه داشت که این طیف هم باید بازتاب شود چون در صورت جذب تابش گرمایی توسط شیشه، سطح بیرونی شیشه به شدت گرم شده و با توجه به گسیلندگی زیاد شیشه باعث گرم شدن داخل ساختمان می‌گردد.

در مقایسه دیگری در شکل ۱-۳ طیف عبور و بازتاب از شیشه فلوت و شیشه کم‌گسیل<sup>۱</sup> و شدت تابش خورشیدی نشان داده شده است. در شیشه فلوت عبور در طول موج‌های زیر دو میکرون زیاد است. همچنین ملاحظه می‌گردد که در منطقه تابش حرارتی (حدود ۱۰ میکرون)، ضریب عبور و بازتاب از شیشه کاهش می‌یابد.

طبق قانون کرشهف در حالت تعادل گرمایی داریم:

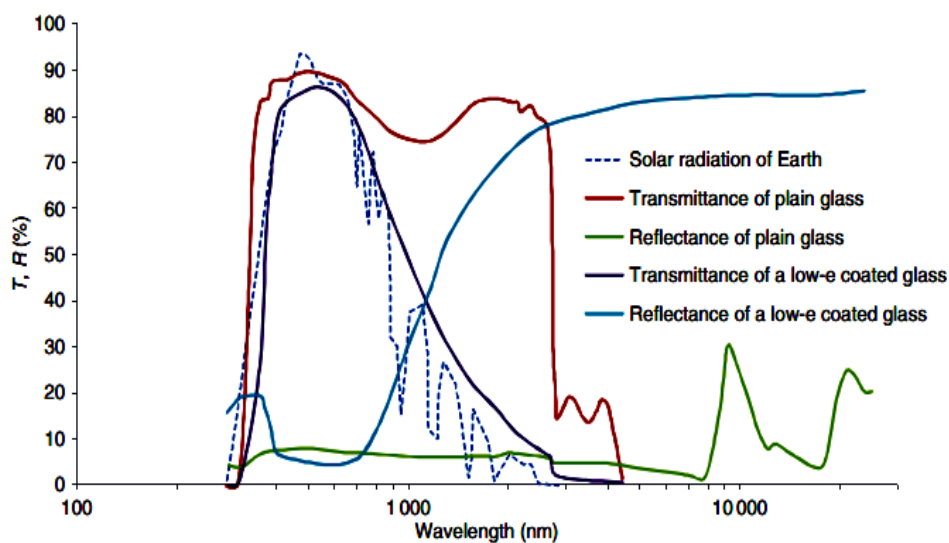
$$A+R+T=1 \quad , \quad A=\varepsilon \quad (1-1)$$

که در آن  $\varepsilon, T, A, R$  به ترتیب ضریب بازتاب، جذب، عبور و گسیلندگی حرارتی هستند.

و بنابر معادله فوق و همان‌طور که در شکل ۱-۳ مشاهده می‌شود، برای شیشه معمولی در منطقه تابش حرارتی، جذب (و متعاقباً گسیلندگی حرارتی) قابل ملاحظه است. در مورد شیشه‌های کم‌گسیل در طول موج ۱۰ میکرون، جذب (و گسیل) پوشش کم و ضریب بازتاب زیاد است.

---

<sup>1</sup> Low e coated glass



شکل ۱-۳ ویژگی‌های اپتیکی شیشه فلوت و شیشه کم گسیل [۴]

### ۱-۲-۱ انواع مواد مورد استفاده در پوشش‌های کم گسیل

دو گروه از مواد برای کاربرد به عنوان پوشش‌های کم گسیل مورد توجه هستند:

#### ۱- اکسیدهای فلزی آلاییده:

ضخامت متداول این گروه از فیلم‌ها، از مرتبه  $10^{-1}$  میکرون است. این پوشش‌ها سخت، کم حجم، با چسبندگی خوب به شیشه، از نظر شیمیایی بی اثر، امکان عبور مرئی و جذب فرورسرخ کم دارند و ضخامت آنها بر مقاومت الکتریکی لایه، تاثیر ناچیزی دارند.

پوشش‌های کم گسیل بر پایه این گروه، شامل یک شبکه میزبان (معمولاً  $\text{In}_2\text{O}_3$ ،  $\text{SnO}_2$  یا  $\text{ZnO}$ ) است که با فلز یا اتم‌های هالید آلاییده شده است. متداولترین نمایندگان این گروه  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  (ITO)،  $\text{SnO}_2:\text{F}$  (FTO) و  $\text{ZnO}:\text{Ga}$  (GZO) هستند. در این فیلم‌ها، مقدار آلایش، موقعیت طول موج گذار ( $\lambda_T$ )، طول موجی که در آن گذار از حالت عبور زیاد به بازتاب زیاد تغییر می‌کند، را تعیین می‌کند. آلایش بیشتر باعث شبه فلزی شدن فیلم‌ها شده و  $\lambda_T$  در طول موج‌های کوتاهتری اتفاق می‌افتد. اما در این فیلم‌ها، آلایش نمی‌تواند ترازهای به اندازه کافی بالا برای مقاصد کنترل طیف خورشیدی را ایجاد کند و  $\lambda_T$  در ناحیه

فروسرخ واقع می‌شود و برای کاربردهای فیلم عایق حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بزرگترین مزیت این گروه از پوشش‌ها نسبت به پوشش‌های پایه فلزی، پایداری شیمیایی و مکانیکی آنهاست که کاربرد آن را در سطح شیشه در معرض شرایط محیطی مجاز می‌کند. این فیلم‌ها اغلب به صورت "پوشش سخت" با روش اسپری پایرولیزیز ایجاد می‌شوند و دارای ویژگی‌های زیر هستند:

$$T_{vis} \cong 90\% , \quad T_{sol} \cong 75\% , \quad \varepsilon \cong 0.2 \quad (2-1)$$

برخی از ترکیبات متداول این گروه عبارتند از:

ITO:ZnO, ITO:Ti, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO (IZO), In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Ti, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Mo, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Ga, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:W, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Zr, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Nb, ZnO:(Al,F), ZnO:B, ZnO(Ga,B), Zn<sub>0.9</sub>Mg<sub>0.1</sub>O:Ga

## ۲- پوشش‌های با لایه فلزی:

ضخامت فیلم‌های گروه دوم از مرتبه  $10^{-2}$  میکرون است، این پوشش‌ها نرم، متخلخل، با چسبندگی کم به شیشه و از نظر شیمیایی فعال هستند. در این گروه از فیلم‌ها مقاومت الکتریکی به شدت وابسته به ضخامت فیلم می‌باشد. در این نوع پوشش یک لایه فلزی بسیار بازتابنده (که در بخش مرئی هم کدر است) بین دو لایه دی‌الکتریک با تاثیر ضد بازتابندگی، ساندویچ می‌شود. در یک لایه دی‌الکتریک با ضخامت و ضریب شکست مناسب، پرتوهای نوری فرودی از دو طرف پشت و جلوی لایه دی‌الکتریک، با فازهای مخالف و دامنه یکسان بازتاب می‌شوند. بنابراین تداخل ویرانگر، بازتابندگی فیلم برای نور مرئی کاهش می‌یابد و ترکیب چندلایه دی‌الکتریک / فلز / دی‌الکتریک (D/M/D) با این دلیل توجیه می‌شود. معمولاً از اکسیدهای فلزی با ضریب شکست بالا مانند TiO<sub>2</sub>, ZnO, ZnS, SnO<sub>2</sub>, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به عنوان دی‌الکتریک استفاده می‌شود. فلزات مناسب برای این کاربرد نیز Ag، Au، Cu و Al می‌باشند که در بین آنها لایه‌های فوق نازک نقره به دلیل جذب کم در ناحیه طیف مرئی مناسبترین فلز است و طلا و مس به دلیل رنگ طلایی قهوه‌ای آنها نامطلوبترین ویژگی



اپتیکی را دارند. پس برای به دست آوردن ضریب عبور بالا در طیف مرئی، ضخامت لایه فلزی باید تا حد امکان کاهش یابد. البته باید توجه داشت که ویژگی‌های اپتیکی، ناشی از ضخامت مناسب لایه فلزی است، به طوری که با افزایش ضخامت فلز، رسانندگی الکترونیکی پوشش افزایش و گسیلندگی حرارتی آن کاهش می‌یابد. پس باید توجه داشت که در پوشش‌های D/M/D با انتخاب ضخامت مناسب هرلایه، می‌توان آن را برای کاربرد مورد نظر بهبود داد.

از معایب این گروه از پوشش‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد:

کنترل شرایط لایه‌نشانی باید به دقت انجام شود تا تداخل اپتیکی در لایه‌ها منجر به از دست دادن ویژگی اپتیکی با کاربرد خاص نگردد، دوام این پوشش‌ها در برابر شرایط جوی کم است، این لایه‌ها عملیات حرارتی با دمای بیش از ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه را تحمل نمی‌کنند.

در هر دو گروه پوشش‌های کم گسیل می‌توان از لایه‌های میانی برای بهبود ویژگی اپتیکی پوشش استفاده کرد. این لایه‌ها ویژگی اپتیکی خنثی دارند. استفاده از یک لایه ZnO با ضخامت ۵ نانومتر بین لایه دی‌الکتریک و نقره، به عنوان زیرلایه نقره باعث یکنواختی نقره و امکان کاهش ضخامت آن تا ۱۰ نانومتر می‌شود. این خود باعث ایجاد پوششی با کمترین ضریب گسیل و بیشترین ضریب عبور نور مرئی می‌گردد. همچنین لایه‌نشانی حدود ۳ نانومتر  $TiO_x$  روی لایه نقره از اکسیداسیون آن در شرایط لایه‌نشانی لایه‌های بعدی جلوگیری می‌کند. استفاده از یک لایه رویی  $SiN_xO_y$  نیز باعث بهبود دوام مکانیکی پوشش می‌شود [۵].

همچنین استفاده از ترکیبات نامتقارن باعث افزایش ضریب عبور نور مرئی در پوشش می‌شود و حساسیت رنگی را نسبت به تغییر ضخامت هر لایه کاهش می‌دهد. می‌توان با استفاده از یک زیرلایه اکسیدی زیر لایه نقره، دوام پوشش را در عملیات حرارتی افزایش داد.

بنابراین پوشش‌های کم گسیل، فیلم‌های بسیار نازک از فلزات و اکسید فلزی هستند که با لایه‌نشانی مناسب و گزینشی لایه‌ها می‌توان به بهبود ویژگی‌های آن پرداخت.



## فصل ۲

### پیشینه تحقیق

در قسمت اول این فصل مفاهیم اساسی الکتروپدینامیک و تئوری حالت جامد که برای درک ویژگی‌های اپتیکی نانوساختارها مورد نیاز است و همچنین روش‌های لایه‌نشانی و تاثیر فرایندهای فیزیکی بر ویژگی‌های اپتیکی بیان شده است. در قسمت دوم، به شرح مطالعات انجام شده در زمینه کاربردهای لایه‌های نازک و ویژگی‌ها و مشخصه‌یابی پارامترهای اپتیکی می‌پردازیم.

## ۲-۱ بررسی پارامترهای موثر در ویژگی‌های اپتیکی فیلم‌ها

### ۲-۱-۱ برهمکنش نور با ماده

هر پدیده اپتیکی نتیجه برهمکنش تابش الکترومغناطیسی با ماده است. بر اساس معادلات ماکسول، نور ویژگی الکترومغناطیسی دارد. تابش الکترومغناطیسی، محدوده طول موجی وسیعی را در برمی‌گیرد: از محدوده طول موج‌های پرتوهای گاما ( $10^{-8}$  میکرون) تا امواج بلند رادیویی (طول موج‌های  $10^{10}$  میکرون). در بسیاری از کاربردها از طول‌موج‌های خورشیدی و تابش گسیلی در بازه فرابنفش تا فروسرخ ( $0.3$  تا  $50$  میکرون)، استفاده می‌شود. این محدوده شامل طول موج طیف خورشیدی ( $0.3$  تا  $4$  میکرون) و محدوده طیفی تابش حرارتی گسیلی از سطح اجسام در دمای محیطی بیش از  $100$  درجه سلسیوس ( $2$  تا  $50$  میکرون) می‌شود.

در واقع همه مواد از خود تابش الکترومغناطیس حرارتی گسیل می‌کنند که شدت این تابش به دمای مطلق ماده  $T$ ، بستگی دارد. یک ماده جاذب بسیار خوب که تمام تابش را جذب می‌کند، جسم سیاه نامیده می‌شود. از رابطه استفان بولتزمن، توان کل در واحد سطح،  $I_b(T)$ ، که از یک جسم سیاه گسیل می‌شود با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I_b(T) = \sigma T^4 \quad (1-2)$$

که  $\sigma = 5.6696 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$  ثابت استفان بولتزمن است. توزیع توان گسیلی در واحد سطح

به صورت تابعی از طول موج،  $\lambda$ ، از قانون پلانک به دست می‌آید:

$$I_b(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[ \frac{1}{e^{hc/\lambda K_B T} - 1} \right] \quad (2-2)$$

که  $h=6.626 \times 10^{-34}$  J.s ثابت پلانک و  $K_B=1.381 \times 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup> ثابت بولتزمن و  $c$  سرعت نور در خلاء است.

### ۱-۱-۱-۲ معادلات ماکسول در ماده

معادلات ماکسول تغییرات میدانهای مغناطیسی در حضور بار، جریانها و محیطهای قطبیده را

بیان می کند:

$$\nabla \cdot D = \rho_{ext} \quad (3-2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4-2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (5-2)$$

$$\nabla \times H = J_{ext} + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (6-2)$$

این معادلات رابطه چهار پارامتر  $E$  میدان الکتریکی،  $D$  تغییر مکان الکتریکی،  $B$  القای مغناطیسی و  $H$  میدان مغناطیسی با چگالی بار خارجی  $\rho_{ext}$  و چگالی جریان خارجی  $J_{ext}$  را بیان می کند.

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (7-2)$$

$$H = \frac{1}{\mu_0} B - M \quad (8-2)$$

که  $\epsilon_0=8.854 \times 10^{12}$  Fm<sup>-1</sup> نفوذپذیری الکتریکی در خلاء است.

در این رساله فقط مواد غیرمغناطیسی در نظر گرفته می شود ( $M=0$ ).  $P$  ممان دوقطبی الکتریکی

در واحد حجم داخلی است و به چگالی بار داخلی با رابطه زیر مربوط است:

$$\nabla \cdot P = -\rho \quad (9-2)$$

شرط پایداری بار

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (10-2)$$

با اعمال این دو شرط به رابطه زیر می‌رسیم:

$$J = \frac{\partial P}{\partial t} \quad (11-2)$$

این معادلات پاسخ ماده به نور در محیط خطی، ایزوتروپیک و غیرمغناطیسی است.

$$D = \epsilon_0 \epsilon E \quad (12-2)$$

$$B = \mu_0 \mu H \quad (13-2)$$

$$J = \sigma E \quad (14-2)$$

که در آن  $\epsilon$  ثابت دی‌الکتریک یا نفوذپذیری الکتریکی نسبی،  $\mu=1$  نفوذپذیری مغناطیسی محیط غیرمغناطیسی و  $\sigma$  رسانندگی الکتریکی است. رابطه خطی بین  $D$  و  $E$  نیز با پذیرفتاری<sup>1</sup> دی‌الکتریکی  $\chi$  تعریف می‌شود که به رابطه خطی بین  $P$  و  $E$  می‌انجامد:

$$P = \epsilon_0 \chi E \quad (15-2)$$

$$\epsilon = 1 + \chi \quad (16-2)$$

مجموع ممان‌های دوقطبی موجود در محیط، شامل ممان حاصل از الکترون‌های آزاد، الکترون‌های مقید، هسته یونهای مثبت و دوقطبی‌های اصلی است. پذیرفتاری مربوط به مکانیسمهای پلاریزاسیون (با اندیس  $J$ ) در تابع دی‌الکتریک به صورت زیر تعریف می‌شود:

---

<sup>1</sup> Susceptibility

$$\varepsilon = 1 + \sum_j \chi_j \quad (17-2)$$

پلاریزاسیون  $P$  از میدان الکتریکی در یک ماده با پذیرفتاری الکتریکی  $\chi$  به دست می‌آید. پلاریزاسیون حاصل، مجموع همه ممان‌های دوقطبی در واحد حجم است که هر ممان دوقطبی از میدان الکتریکی موضعی در محل دوقطبی ناشی می‌شود.

$$P = NP = N\alpha E_{local} \quad (18-2)$$

که  $\alpha$  قطبش پذیری میکروسکوپی موضعی و  $N$  تعداد دوقطبی در واحد حجم است. میدان الکتریکی موضعی  $E_{local}$  با میدان الکتریکی در مکانی داخل یک بلور مکعبی ساده با عبارت زیر تعریف می‌شود [۶]:

$$E_{local} = E + \frac{1}{3\varepsilon_0} P \quad (19-2)$$

با استفاده از روابط ۱۲-۲ و ۱۸-۲، رابطه زیر ویژگیهای ماکروسکوپی ماده ( $\varepsilon$ ) را از ویژگیهای میکروسکوپی ماده ( $\alpha$ ) محاسبه می‌کند:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon - 2} = \frac{1}{3\varepsilon_0} N\alpha \quad (20-2)$$

که به معادله کلاسیوس-موسوتی<sup>۱</sup> معروف است. این معادله بیانگر این حقیقت است که اندازه‌گیری پارامترهای ماکروسکوپی که ثابتهای اپتیکی ماده را توصیف می‌کند، اطلاعات بیشتری نسبت به پارامترهای میکروسکوپی مثل قطبش پذیری اتمی را ارائه می‌دهد.

اگر بخواهیم به درستی ملاحظات زمانی و مکانی توزیع را انجام دهیم، با فرض محیط همگن از معادلات بالا داریم:

---

<sup>1</sup> Clausius-Mossotti

$$D(r, t) = \varepsilon_0 \int dt' dr' \varepsilon(r - r', t - t') E(r', t') \quad (21-2)$$

$$J(r, t) = \int dt' dr' \sigma(r - r', t - t') E(r', t') \quad (22-2)$$

اگر میدانها را به مؤلفه‌هایی با بردار موج  $k$  و فرکانس زاویه‌ای  $\omega$  تجزیه کنیم:

$$D(r, t) = \int dt dr D(k, \omega) e^{i(k \cdot r - \omega t)} \quad (23-2)$$

$$E(r, t) = \int dt dr E(k, \omega) e^{i(k \cdot r - \omega t)} \quad (24-2)$$

و تبدیل فوریه معادلات فوق:

$$D(k, \omega) = \varepsilon_0 \varepsilon(k, \omega) E(k, \omega) \quad (25-2)$$

$$J(k, \omega) = \sigma(k, \omega) E(k, \omega) \quad (26-2)$$

با استفاده از معادلات ۱۰، ۱۲، ۲۵ و ۲۶ برای تابع دی‌الکتریک و رسانندگی داریم:

$$\varepsilon(k, \omega) = 1 + \frac{i\sigma(k, \omega)}{\varepsilon_0 \omega} \quad (27-2)$$

اگر طول موج میدان الکترومغناطیسی در ماده به طور قابل توجهی بزرگتر از ابعاد میکروسکوپی

همه پارامترها باشد، می‌توان معادله زیر را تخمین زد:

$$\varepsilon(k, \omega) = 1 + \frac{i\sigma(k, \omega)}{\varepsilon_0 \omega} \quad (28-2)$$

$$\varepsilon(k = 0, \omega) = \varepsilon(\omega) \quad (29-2)$$

در فرکانسهای کم،  $\varepsilon$  معمولاً برای توصیف پاسخ بارهای مقید به نیروی اعمالی به کار می‌رود که

به پلاریزاسیون الکتریکی می‌انجامد. درحالیکه  $\sigma$  پاسخ بارهای آزاد به میدان اعمالی است و به شار

جریان می‌انجامد. هرچند در فرکانسهای اپتیکی هیچ تشخیص واضحی بین بارهای آزاد و مقید وجود

ندارد.



## ۲-۱-۲ ویژگی‌های اپتیکی ماده

همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، برای توصیف ویژگی‌های اپتیکی و چگونگی برهمکنش نور با ماده، تابع دی‌الکتریک  $\epsilon$  یا رسانندگی الکتریکی  $\sigma$  به کار می‌رود. این پارامترها معمولاً به صورت اعداد مختلط نشان داده می‌شوند:

$$\tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega) \quad (۳۰-۲)$$

$$\tilde{\sigma}(\omega) = \sigma_1(\omega) + i\sigma_2(\omega) \quad (۳۱-۲)$$

همچنین ویژگی‌های اپتیکی ممکن است با ضریب شکست مختلط  $\tilde{n}^1$  شامل ضریب شکست  $n$  و ضریب خاموشی  $k^2$  توصیف شود:

$$\tilde{n}(\omega) = n(\omega) + ik(\omega) \quad (۳۲-۲)$$

$$\tilde{\epsilon} = \tilde{n}^2 \quad (۳۳-۲)$$

ضریب شکست  $n$  سرعت نور در خلاء،  $c$ ، نسبت به سرعت فاز نوری که از ماده عبور می‌کند،  $v$ ، است:

$$v = \frac{c}{n} \quad (۳۴-۲)$$

که نشان می‌دهد سرعت نور وقتی که وارد محیطی با ضریب شکست بزرگتر می‌شود، کاهش می‌یابد. ضریب خاموشی  $k$ ، اتلاف انرژی موج از طریق جذب<sup>۳</sup> و پراکندگی<sup>۴</sup> در ماده را توصیف می‌کند (خاموشی اپتیکی نتیجه هم جذب و هم پراکندگی در ماده است). ضریب جذب  $\alpha_{ext}$ :

$$\alpha_{ext}(\omega) = 2 \frac{k(\omega)\omega}{c} = \frac{4\pi k(\omega)\omega}{\lambda} \quad (۳۵-۲)$$

شدت نور در یک ماده با خاموشی اپتیکی طبق قانون بیر<sup>۱</sup> مرتبط است:

<sup>1</sup> Complex refractive index

<sup>2</sup> Extinction coefficient

<sup>3</sup> Absorption

<sup>4</sup> Scattering

$$I(z) = I(0)e^{-\alpha_{ext}z} \quad (۳۶-۲)$$

که  $Z$  مسافت انتشار نور در محیط است. بنابراین ضریب خاموشی، چگونگی کاهش شدت نور با انتشار در ماده را نشان می‌دهد.

از طرفی تابع دی‌الکتریک مقدار ماده‌ای که با اعمال میدان الکتریکی قطبیده می‌شود، را نشان می‌دهد. قسمت موهومی تابع دی‌الکتریک ویژگی مهمی است که به طور مستقیم متناسب با توان جذب شده در واحد زمان در واحد حجم در هر نقطه از ماده است. این کمیت ذاتی است و از مدلهای جذب فیزیکی محاسبه می‌شود.

بنابراین ثابتهای اپتیکی  $n$  و  $k$  (قسمت حقیقی و موهومی ضریب شکست مختلط) ویژگی‌های اپتیکی یک ماده را با چگونگی انتشار امواج الکترومغناطیسی در ماده نشان می‌دهد. انتخاب نوع خاصی از ثابت اپتیکی بستگی به کاربرد آن دارد. با توجه به معادلات فوق، تابع دی‌الکتریک و ثابتهای اپتیکی به فرکانس انتشار نور  $\omega$  بستگی دارند.

قسمت‌های حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک با انتگرال‌های تبدیل معادلات کرامرز-کرونیگ<sup>۱</sup>، به هم مربوط می‌شوند:

$$\epsilon_1(\omega) = 1 + \frac{2}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\epsilon_2(\omega')\omega'}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (۳۷-۲)$$

$$\epsilon_2(\omega) = -\frac{2\omega}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\epsilon_1(\omega') - 1}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (۳۸-۲)$$

که  $p$  عدد کوشی<sup>۳</sup> انتگرال را نشان می‌دهد. با استفاده از این معادله اگر قسمت موهومی تابع دی‌الکتریک در کل طیف معلوم باشد، قسمت حقیقی آن از رابطه ۳۶ و برعکس اگر قسمت حقیقی آن معلوم باشد، قسمت موهومی با استفاده از این معادلات به دست می‌آید.

<sup>1</sup> Beer's Law

<sup>2</sup> Kramers-Kronig

<sup>3</sup> Cauchy

## ۱-۲-۱-۲ فرایندهای جذب اپتیکی

ویژگی‌های اپتیکی همه مواد به صورت کامل با انواع فرایندهای جذب اپتیکی که در ماده اتفاق می‌افتد، تعریف می‌شود. سه مکانیسم عمده با انرژی جذب شده از نور تابیده به ماده حالت جامد<sup>۱</sup> اتفاق می‌افتد:

### • جذب بین نواری<sup>۲</sup>

، وقتی اتفاق می‌افتد که الکترون در یک حالت مقید<sup>۳</sup> داخل ماده، یک تک فوتون از پرتو نور را جذب میکند و به نوار انرژی بالاتر داخل ماده می‌رود. در این فرایند ممکن است تکانه بلور<sup>۴</sup> الکترون بدون تغییر بماند یا جذب و/یا گسیل<sup>۵</sup> یک فونون، باعث تغییر تکانه بلوری الکترون گردد. تراز فرمی ماده دی‌الکتریک یا نیمرسانا داخل گاف نواری<sup>۶</sup> قرار دارد. بنابراین جذب بین نواری<sup>۷</sup> برای این مواد فقط در مواردی اتفاق می‌افتد که انرژی فوتون بیشتر از اختلاف انرژی بین بالاترین تراز انرژی اشغال شده در نوار ظرفیت<sup>۸</sup> و کمترین تراز خالی انرژی الکترون در نوار رسانش<sup>۹</sup>، باشد. اگر این دو تراز دارای تکانه یکسان باشند، جذب با گذار مستقیم و بدون تغییر تکانه بلور اتفاق می‌افتد. در غیر این صورت گذار غیرمستقیم با جذب یا گسیل یک فونون برای بقای تکانه و انرژی انجام می‌شود. تقریباً برای تمام مواد نیمرسانا و دی‌الکتریک، جذب ناشی از گذارهای بین نواری در طیف اپتیکی فرابنفش - مرئی - فروسرخ قابل مشاهده است. این موضوع با مدل نوسانگر لورنتز<sup>۱۰</sup> توصیف می‌شود.

---

<sup>1</sup> Solid state matter

<sup>2</sup> Interband absorption

<sup>3</sup> Bound state

<sup>4</sup> Crystal momentum

<sup>5</sup> Emission

<sup>6</sup> bandgap

<sup>7</sup> Interband absorption

<sup>8</sup> valence band

<sup>9</sup> conduction band

<sup>10</sup> Lorentz oscillator

جذب بین نواری (اصلی) نور در نیمرساناها با چهار مکانیسم متفاوت توصیف می‌شود: جذب ناخالصی<sup>۱</sup>، جذب اکسیتونی<sup>۲</sup>، جذب توسط حامل‌های بار آزاد<sup>۳</sup>، جذب توسط شبکه بلوری<sup>۴</sup>. در مکانیسم جذب اصلی با تحریک اپتیکی الکترون‌ها از نوار ظرفیت به نوار رسانش به تولید زوج الکترون-حفره می‌انجامد.

فرایندهای جذب نور باید قوانین بقای انرژی و مومنتوم را برآورده کند، بنابراین حداقل کوانتوم انرژی مورد نیاز برای تحریک الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش برابر با گاف انرژی<sup>۵</sup> نیمرسانا است. بنابراین لبه قرمز<sup>۶</sup> از فرایند جذب اصلی به تعیین مهمترین پارامتر نیمرسانا یعنی مقدار گاف انرژی،  $E_g$ ، آن می‌انجامد. در نیمرساناها معمولاً جذب اصلی در محدوده طول موج مرئی و فرابنفش نزدیک اتفاق می‌افتد. مثلاً اگر گاف انرژی یک نیمرسانا  $E_g=2\text{ eV}$  باشد، لبه جذب مربوط به این گاف در طول موج ۶۲۰ نانومتر اتفاق می‌افتد. بنابراین روش‌های اسپکتروسکوپی اپتیکی مرتبط با جذب اصلی در نیمرساناها با عبارت "اسپکتروسکوپی فرابنفش- مرئی"<sup>۷</sup> معرفی می‌شوند.

واضح است که در نزدیکی لبه جذب اصلی در نیمرسانای مستقیم، فقط جذب فوتون برای گذار الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش کافی است. ولی در نیمرسانای غیر مستقیم مشارکت ذرات اضافی برای بقای مومنتوم در این گذار ضروری است. این ذرات، فونون‌ها (کوانتوم ارتعاشات شبکه بلوری) هستند. با توجه به اینکه احتمال فرایند جذب با افزایش تعداد ذرات مشارکت کننده کاهش می‌یابد، پس جذب نور در نیمرسانای غیرمستقیم در نزدیکی لبه جذب با شدت کمتری نسبت به نیمرساناهای با گاف نواری مستقیم اتفاق می‌افتد.

---

<sup>1</sup> Dopant absorption

<sup>2</sup> excitonic absorption

<sup>3</sup> charge carriers

<sup>4</sup> crystalline lattice

<sup>5</sup> band gap

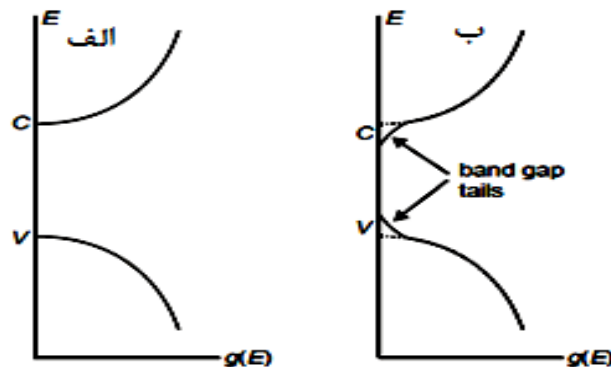
<sup>6</sup> red edge

<sup>7</sup> UV-Vis spectroscopy

در حالت ایده‌آل مقدار گاف انرژی از معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$E_g = \frac{hc}{\lambda_{red}} \quad (39-2)$$

که  $h$  ثابت پلانک و  $c$  سرعت نور و  $\lambda_{red}$  طول موج لبه قرمز جذب جایی که جذب اتفاق می‌افتد، است. البته این رابطه برای ارزیابی تقریبی انرژی گاف نیمرسانای ایده‌آل به کار می‌رود ولی در نیمرساناهای واقعی، توزیع انرژی حالات الکترونیک نسبت به توزیع انرژی حالات یک بلور ایده‌آل متفاوت است. چون در نیمرساناهای واقعی به دلیل وجود ناهمگنی‌ها یا نواقص در ساختار شبکه، میدان اضافی به وجود می‌آید. همان‌طور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است وجود این میدان باعث به وجود آمدن دنباله<sup>۱</sup> در چگالی حالت الکترونیکی نیمرسانای واقعی می‌شود. این دنباله در چگالی حالت ترازاها باعث یک شیفت قرمز<sup>۲</sup> (کاهش انرژی) در لبه جذب نیمرسانای واقعی نسبت به بلور ایده‌آل می‌شود.



شکل ۱-۲ توزیع انرژی حالات الکترونیکی نیمرسانا (الف) در حالت ایده‌آل و (ب) واقعی

<sup>1</sup> tail

<sup>2</sup> red shift

در نیمرساناهای واقعی، وابستگی طیفی ضریب جذب<sup>۱</sup> به گاف انرژی در گذارهای ترازهای مجاز برای نیمرسانای گاف مستقیم با رابطه (۴۰-۲) و غیرمستقیم با رابطه (۴۱-۲) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\alpha = A \frac{(h\nu - E_g)^{1/2}}{h\nu} \quad (40-2)$$

$$\alpha = B \frac{(h\nu - E_g)^2}{h\nu} \quad (41-2)$$

که A و B ثابت‌هایی مستقل از طول موج هستند. مطابق مختصات تاک<sup>۲</sup> وابستگی طیفی ضریب جذب به انرژی فوتون به صورت منحنی  $(\alpha \cdot h \cdot \nu)^2 - h \cdot \nu$  یا  $(\alpha \cdot h \cdot \nu)^{0.5} - h \cdot \nu$  به ترتیب برای نیمرسانای با گذار مستقیم و غیرمستقیم رسم می‌شود و مقدار گاف انرژی از تقاطع خط مماس بر منحنی با محور افقی به دست می‌آید.

#### • جذب درون نواری<sup>۳</sup>

دومین نوع مهم از جذب اپتیکی، جذب درون نواری است که در این حالت یک الکترون، فوتونی از پرتو نور را جذب می‌کند اما به حالت انرژی متفاوتی در همان تراز می‌رود. این فرایند به جذب یا گسیل یک فونون نیاز دارد مگر این که حالت‌های اولیه و نهایی الکترون در مقادیر کاملاً یکسانی از تکانه بلوری قرار بگیرند. حالت خاصی از جذب درون نواری، جذب توسط حامل‌های آزاد است.

#### • جذب حامل‌های آزاد

<sup>1</sup> absorption coefficient

<sup>2</sup> Tauc coordinates

<sup>3</sup> Intra band

فلزات و دیگر مواد رسانا شامل دریایی از الکترون‌ها هستند که به هیچ اتم یا موقعیت<sup>۱</sup> خاصی در ماده مقید نیستند. این حامل‌های آزاد، جذب اپتیکی مجزایی را نشان می‌دهد که ممکن است ناشی از حرکت آنها تحت تاثیر میدان الکترومغناطیس اعمالی، باشد. مدل درود<sup>۲</sup> جذب اپتیکی حامل‌های آزاد در فلزات را به طور موفقی توصیف می‌کند.

## ۳-۱-۲ ضریب جذب، عبور، بازتاب و گسیلندگی

هر ماده‌ای (فیلم تک یا چندلایه) که عمده‌اً برای تغییر در توزیع شدت طیف یا حالت پلاریزاسیون تابش الکترومغناطیس فرودی بر آن به کار رود، یک فیلتر اپتیکی محسوب می‌شود. تغییر در توزیع شدت طیف ممکن است به طول موج بستگی داشته یا نداشته باشد. فیلتر ممکن است برای عبور یا بازتاب یا هر دو عمل کند. فیلترها براساس پدیده‌های مختلف فیزیکی جذب<sup>۳</sup>، شکست<sup>۴</sup>، تداخل<sup>۵</sup>، پراش<sup>۶</sup>، پراکندگی<sup>۷</sup> و پلاریزاسیون<sup>۸</sup> توصیف می‌شوند. این بخش فقط مربوط به فیلترهایی است که بر اساس جذب و تداخل تابش الکترومغناطیس در فیلم‌های نازک عمل می‌کنند.

پوشش‌های لایه نازک اپتیکی کاربردهای بسیار زیادی در شاخه‌های مختلف علوم و فناوری دارد. محدوده طیفی مورد بررسی در این فصل از ۳ تا  $3 \times 10^5$  نانومتر با تاکید بر محدوده طیفی مرئی و اطراف آن است و به فیلترهای لایه نازک عمومی مثل پوشش‌های ضدبازتاب<sup>۹</sup>، فیلترهای حذفی<sup>۱۰</sup>،

---

<sup>1</sup> Location

<sup>2</sup> Drude model

<sup>3</sup> Absorption

<sup>4</sup> Refraction

<sup>5</sup> Interference

<sup>6</sup> diffraction

<sup>7</sup> Scattering

<sup>8</sup> Polarization

<sup>9</sup> Anti reflection

<sup>10</sup> cut-off filters

فیلترهای عبور یا برگردان در محدوده باریک<sup>۱</sup>، بازتابنده‌ها<sup>۲</sup>، شکاف‌های باریکه<sup>۳</sup> و ... محدود می‌شود. بسیاری از این فیلترها تجاری و در دسترس هستند درحالی‌که برخی از آنها فقط به شکل نمونه اولیه در تحقیقات آزمایشگاهی موجودند. فیلترهای لایه نازک که ویژگی‌های آنها با اعمال میدان الکتریکی، مغناطیسی، دما یا تراز روشنایی تغییر می‌کند، موضوع این بحث نیستند.

در مقدمه این بخش، برخی ملاحظات عمومی برای استفاده از فیلترهای اپتیکی، بیان شده است. در بخش‌های بعدی تئوری چند لایه‌های اپتیکی و روش‌های لایه‌نشانی و مشخصه‌یابی آنها به طور خلاصه توصیف شده‌اند که به درک مناسب عملکرد، مزایا و محدودیت‌های پوشش‌های اپتیکی کمک می‌کند.

## ۱-۳-۱-۲ تئوری عمومی فیلترها

روش‌های مختلفی برای توصیف عملکرد پوشش‌های اپتیکی وجود دارد ولی کامل‌ترین اطلاعات در مورد عملکرد پوشش‌ها با طیف جذب، عبور، بازتاب و منحنی‌های چگالی اپتیکی<sup>۴</sup> به دست می‌آید [۷].

با توجه به شکل ۲-۳، در برخورد عمودی، طیف عبوری از فیلتر در طول موج  $\lambda$ ،  $T(\lambda)$ ، واقع در دو محیط نیمه نامحدود برابر با نسبت شدت نور عبوری با طول موج  $\lambda$ ،  $I_T(\lambda)$  به شدت نور فرودی،  $I_0(\lambda)$ ، است:

$$T(\lambda) = \frac{I_T(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (۴۲-۲)$$

در برخورد غیرعمودی، مولفه عمودی شدت نور باید در معادله فوق جایگزین شود [۸]. به طور

مشابه، طیف بازتابی  $R(\lambda)$  از یک فیلتر نیز به شکل زیر نوشته می‌شود:

<sup>1</sup> narrowband transmission or rejection filters

<sup>2</sup> reflectors

<sup>3</sup> beam splitters

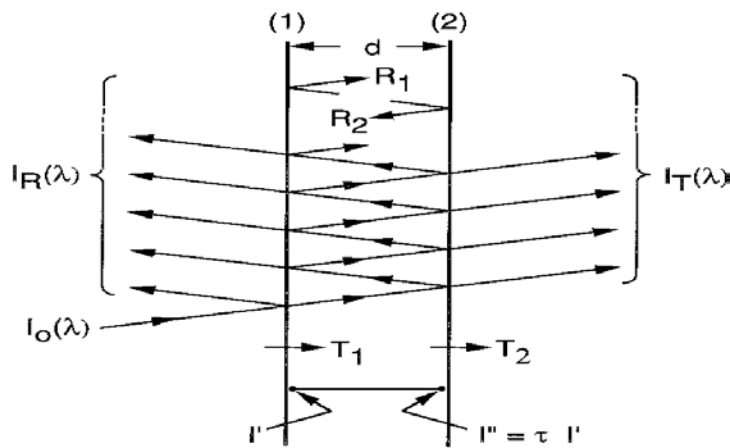
<sup>4</sup> optical density curves



$$R(\lambda) = \frac{I_R(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (43-2)$$

رابطه بین عبور  $T(\lambda)$  و چگالی فیلتر<sup>۱</sup>،  $D(\lambda)$ ، معمولاً جذب<sup>۲</sup> نامیده می‌شود:

$$D(\lambda) = \log \frac{1}{T(\lambda)} \quad (43-2)$$



شکل ۲-۲ عبور و بازتاب نور از صفحه موازی تخت

ضریب جذب  $A(\lambda)$  مقداری از نور فرودی به سطح با طول موج  $\lambda$ ، است که جذب می‌شود و  $E(\lambda)$  ضریب گسیل، نسبت نور گسیل شده از سطح به گسیل از یک جسم سیاه ایده‌آل، در دما و طول موج یکسان است.

طبق قانون بقای انرژی و رابطه کرشهف و با توجه به اینکه  $E(\lambda)=A(\lambda)$ :

$$A(\lambda) + R(\lambda) + T(\lambda) = 1 \quad (44-2)$$

$$E(\lambda) = A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda) \quad (45-2)$$

<sup>1</sup> density of a filter

<sup>2</sup> absorbance

در مواردی که سطح کدر است و  $T(\lambda)$  صفر می‌شود گسیلندگی با رابطه زیر به دست می‌آید :

$$E(\lambda) = A(\lambda) = 1 - R(\lambda) \quad (46-2)$$

همچنین میانگین وزنی جذب خورشیدی عمودی کل  $\alpha_s$ ، با تابش طیفی خورشیدی  $I_s(\lambda)$  با

رابطه زیر داده می‌شود:

$$\alpha_s = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - R(\lambda)) I_s(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_s(\lambda) d\lambda} \quad (47-2)$$

و میانگین وزنی گسیل حرارتی عمودی کل،  $\epsilon_t$  با تابش طیفی جسم سیاه  $I_b(\lambda)$  در دمای  $T$  از

رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\epsilon_t = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - R(\lambda)) I_b(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_b(\lambda, T) d\lambda} \quad (48-2)$$

بر اساس استاندارد [۹] محاسبه عددی گسیل حرارتی برای مواد کدر در محدوده طول موجی ۵

تا ۵۰ میکرون (مثل شیشه)، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\epsilon_t = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} (1 - R_i) \quad (49-2)$$

که بر اساس آن طیف تابشی جسم سیاه به ۳۰ بازه با مقدار مساوی انرژی گسیلی تقسیم می‌شود

و مقادیر بازتاب  $R_i$  مقدار بازتاب در طول موج‌های  $\lambda_i$  در این بازه است.

از طرفی ضریب بازتاب برحسب ضریب شکست مختلط ماده به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R = \frac{1}{30} \left| \frac{1 - N}{1 + N} \right|^2 \quad (50-2)$$

که ضریب شکست،  $N$ ، و تابع دی‌الکتریک مختلط،  $\varepsilon$ ، از روابط زیر به دست می‌آید:

$$N = n + ik \quad (51-2)$$

$$\varepsilon = N^2 \quad (52-2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \quad (53-2)$$

$$\varepsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (54-2)$$

$$\varepsilon_2 = 2nk \quad (55-2)$$

با استفاده از این روابط می‌توان رابطه‌ای بین بازتاب در تابش عمودی و قسمت‌های حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک به دست آورد.

موضوع مهم دیگری که در طراحی فیلترهای خورشیدی<sup>۱</sup> باید در نظر گرفته شود، کاهش اتلاف گرما با به دست آوردن گسیل حرارتی کم است و این به معنای افزایش تا حد ممکن بازتاب فروسرخ از ماده است. معمولاً برای این منظور از فلزات بخاطر ضریب بازتاب زیادشان در محدوده فروسرخ استفاده می‌شود.

بازتاب فروسرخ از فلزات با حامل‌های بار آزاد که رسانای الکتریکی و گرما هستند، تعریف می‌شود. الکترون‌ها جریان متناوب طولی با فرکانس کم را هدایت می‌کنند، بنابراین به راحتی تحت تاثیر میدان الکتریکی عرضی با فرکانس زیاد نور، قطبیده می‌شوند. اثر این پلاریزاسیون، بازتاب زیاد فلزی است. در مدل نوسانگر درود<sup>۲</sup> [۱۰] این پدیده برحسب بازتاب سطحی و تابع دی‌الکتریک مختلط  $\varepsilon$ ، برای فلزات بالک<sup>۳</sup> توصیف می‌شود.

---

<sup>1</sup> Solar filter

<sup>2</sup> Drude oscillation model

<sup>3</sup> Bulk electron metal

$$\varepsilon_1(\omega) = 1 - \frac{(\omega_p \tau)^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (56-2)$$

$$\varepsilon_2(\omega) = \frac{\omega_p^2 \tau}{\omega(1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (57-2)$$

که  $\tau$  زمان میانگین آزاد<sup>۱</sup> الکترون آزاد است که به عنوان زمان بین برخوردهای الکترون تعریف می‌شود.  $\omega_p$  فرکانس پلاسما است که برای مواد مختلف منحصر به فرد است و فرکانسی را که بازتاب به طور ناگهانی افت می‌کند را نشان می‌دهد. ویژگی‌های فرسرخ در بازه زمان آزاد با شرط  $1/\tau \ll \omega \ll \omega_p$  به دست می‌آیند. با استفاده از تقریب دو معادله (56-2) و (57-2) و با استفاده از معادله (50-2)، برای بازتاب داریم:

$$R \approx 1 - \frac{2}{\omega_p \tau} \quad (58-2)$$

بنابراین زمان آزاد میانگین، یکی از مهمترین پارامترها در بازتاب فرسرخ، به شمار می‌رود. همچنین محدود کردن پراکندگی الکترون‌ها با ایجاد یک ساختار بلوری خوب و کم کردن ناخالصی‌ها بسیار مهم می‌باشد. چون هنگام برخورد امواج الکترومغناطیس به ماده، ناخالصی‌های زیاد منجر به زمان آزاد میانگین کوتاه‌تر می‌شود و این در نهایت به بازتاب کمتر می‌انجامد. فاکتور مهم دیگر این است که بلور نباید شامل دانه‌های بسیار کوچک باشد، چون اگر اندازه دانه‌ها از مسیر آزاد میانگین الکترون‌ها کمتر باشد، الکترون‌ها به دیواره دانه‌ها برخورد کرده و حرکتشان محدود می‌شود.

اگر جذب درون نواری ناشی از پراکندگی ناخالصی‌ها در محدوده طول موج فرسرخ کاهش یابد، زمان آزاد میانگین کوتاه‌تر شده و تقریب درود در فرکانس‌های کم  $\tau \omega \ll 1$  و معادله هاگن-روبنز<sup>۲</sup> معتبر خواهد بود [۱۱]. معادله هاگن-روبنز رابطه بین بازتاب طیفی  $R(\omega)$  و رسانندگی الکتریکی dc،  $\sigma_0$ ، در ماده است:

<sup>1</sup> Relaxation time

<sup>2</sup> Hagen-Rubens relation

$$R(\omega) = 1 - 2 \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\omega}{\sigma_0}} \quad (59-2)$$

که  $\varepsilon_0$  نفوذپذیری خلاء است. رسانندگی الکتریکی فلزات بر اساس مدل درود به تراکم الکترون‌های آزاد  $n_e$ ، زمان آزاد میانگین، و جرم موثر الکترون  $m^*$  بستگی دارد [۶]:

$$\sigma_0 = \frac{n_e e^2 \tau}{m^*} \quad (60-2)$$

با جایگذاری ضریب بازتاب با ضریب گسیل، در معادله (۵۹-۲) و با توجه به اینکه رسانندگی الکتریکی معکوس مقاومت الکتریکی  $\rho$  است، ضریب گسیل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$E(\lambda) = 2 \sqrt{\frac{4\pi\varepsilon_0 c \rho_0}{\lambda}} \quad (61-2)$$

که  $\lambda = 2\pi/\omega$  است.

بنابراین برای ساده‌تر شدن بررسی لایه‌هایی با بازتاب زیاد در محدوده فرسرخ، باید به بررسی رابطه بین ویژگی‌های فرسرخ ماده و دیگر کمیت‌های فیزیکی پرداخت. مثلاً مقاومت الکتریکی برای انواع فلزات موجود و یا به راحتی قابل اندازه‌گیری است. بنابراین به جای استفاده از اندازه‌گیری‌های پیچیده برای گسیلندگی می‌توان از معادله (۵۹-۲)، هاگن-روبنز، بین بازتابش فرسرخ و رسانندگی الکتریکی استفاده کرد.

گسیلندگی کم در محدوده فرسرخ در مسائل انتقال حرارت بسیار مهم است. به طوری که برای حداقل کردن اتلاف گرما از طریق تابش، گسیل کم فیلم ضروری است [۱۲].

## ۲-۳-۱-۲ عبور و بازتاب از پوشش چند لایه

بسیاری از پوشش‌های چند لایه روی یک زیر لایه<sup>۱</sup> شفاف یا تقریباً شفاف لایه‌نشانی می‌شوند.

پوشش چندلایه و زیرلایه هر دو در عملکرد کلی فیلتر سهیم هستند.

معمولاً یک فیلتر شامل پوشش‌های چند لایه روی یک سمت یا هر دو سمت زیر لایه است.

ضریب عبور کل  $T_{total}$ ، از فیلتر با مولفه‌های عبور ذاتی یا داخلی  $\tau$  زیرلایه و ضرایب عبور  $T_1$  و  $T_2$  و

بازتاب‌های داخلی  $R_1$  و  $R_2$  از هر سمت زیر لایه بیان می‌شود (شکل ۲-۲).

$$\tau = \frac{I''}{I'} \quad (۶۲-۲)$$

اگر هیچ تداخلی بین پرتوهای بازتابی از دو سطح زیرلایه حتی وقتی تخت و موازی باشند، وجود

نداشته باشد، با جمع روی بازتاب‌های جزئی ضریب عبور کل به صورت زیر به دست می‌آید:

$$T_{total} = \frac{T_1 T_2 \tau}{1 - R_1 R_2 \tau^2} \quad (۶۳-۲)$$

ضرایب بازتاب از مرزهای بدون پوشش به شرط اینکه ضرایب شکست مختلط زیر لایه و محیط

معلوم باشند، محاسبه می‌شود. اگر همه لایه‌ها در فیلتر غیرجذب‌ی<sup>۲</sup> باشند،

$$T_{total} = \frac{T_1 T_2}{1 - R_1 R_2} \quad (۶۴-۲)$$

و اگر  $R_1$  کوچک باشد، با تقریب خوبی

$$T_{total} \approx [1 - R_1(1 - R_2)]T_2 \quad (۶۵-۲)$$

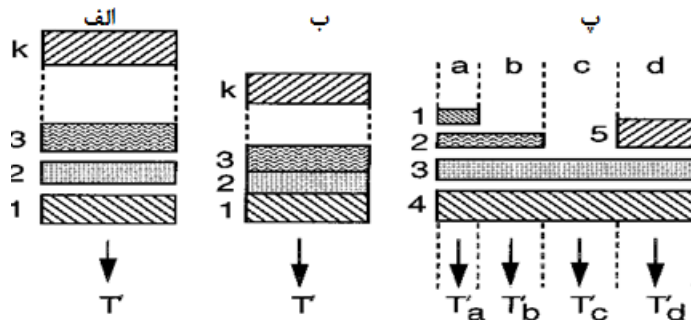
به طور معمول، برای به دست آوردن ضریب عبور مناسب لازم است چند فیلتر باهم ترکیب شوند.

یک راه متداول، قراردادن چند فیلتر به صورت سری است (شکل ۲-۳-الف و ب). به دلیل بازتاب‌های

<sup>۱</sup> substrate

<sup>۲</sup> nonabsorbing

جزئی بسیار متفاوتی که ممکن است بین سطوح مختلف اتفاق بیافتد، فرمول‌های دقیق برای محاسبه ضریب عبور کلی، بسیار پیچیده‌اند و محاسبات دقیق با روش‌های ماتریسی ممکن است [۱۳].



شکل ۲-۳ آرایش فیلترهایی که به صورت سری یا موازی قرار گرفته‌اند

گاهی منحنی‌های طیف عبوری نمی‌تواند فقط با استفاده از فیلترهای مختلف به صورت سری طراحی شود. بنابراین برای کاربردهای خاص می‌توان با قرار دادن فیلترها به صورت موازی (شکل ۲-۳) به طیف مطلوب رسید [۱۴].

### ۲-۳-۱-۳ طراحی پوشش‌های لایه نازک اپتیکی

یک پوشش چند لایه برحسب مقادیر ضریب عبور، ضریب بازتاب یا جذب تعیین شده در طول موج‌ها، زوایا و/یا پلاریزاسیون خاص نور فرودی طراحی می‌شود. پارامترهای مطرح در این طراحی عبارتند از: تعداد لایه‌ها، ضخامت هر لایه، ضریب شکست<sup>۱</sup> و ضریب خاموشی<sup>۲</sup> هر لایه و محیط پیرامونی آن. روشهای بسیار زیادی برای طراحی و لایه‌نشانی پوشش‌های چند لایه وجود دارد [۱۵] که در بخش بعد به آنها اشاره می‌شود.

نور می‌تواند از هر مرز مشترکی که باعث تغییر در ضریب شکست سطح شود، بازتاب شود. وقتی نور به ماده‌ای با چند لایه مختلف برخورد می‌کند، هر لایه می‌تواند نور را بازتاب کند. نوری که از هر

<sup>۱</sup> refractive indices

<sup>۲</sup> extinction coefficients

لایه بازتاب می‌شود، می‌تواند با نور بازتابی از لایه دیگر تداخل کند. ولی همچنان باید در نظر داشت، برای اینکه یک لایه در محدوده مرئی شفاف باشد، گاف انرژی به اندازه کافی بزرگ (تقریباً ۳ eV) داشته باشد [۱۶، ۱۷].

اندازه‌گیری ضریب عبور، بازتاب و جذب فیلم‌های لایه نازک با دستگاه اسپکتروفوتومتر انجام می‌شود. دستگاه‌های تجاری با توزیع طیفی ۱۸۵ تا ۸۰۰۰ نانومتر با منشورها و توری‌های پراش در دسترس هستند و با تبدیل فوریه طیف‌ها، اندازه‌گیری بازتاب در طول موج‌های ۲ تا ۵۰۰ میکرون قابل انجام است.

## ۲-۱-۴ روش‌های لایه‌نشانی فیلم‌های لایه نازک

ویژگی‌های اپتیکی، مکانیکی و محیطی پوشش‌های چندلایه به ماده مورد استفاده، فرایند لایه‌نشانی و کیفیت سطح زیرلایه بستگی دارد. روش‌های بسیار متنوعی برای لایه‌نشانی فیلم‌های نازک وجود دارند [۱۸-۲۲].

فرایند لایه‌نشانی و پارامترهای مرتبط با آن بر ساختار لایه تاثیر می‌گذارد. فیلم‌ها ممکن است ساختاری آمورف، بلوری یا رشد ستونی داشته باشند. ثابت‌های اپتیکی به وضوح به ساختار فیلم‌ها بستگی دارد و با توجه به روش لایه‌نشانی، فیلم‌هایی از مواد یکسان ممکن است ویژگی‌هایی کاملاً متفاوت داشته باشند. فیلم‌های مجزا در چندلایه‌ها ممکن است تحت استرس کششی<sup>۱</sup> یا فشاری<sup>۲</sup> قرار بگیرند، بنابراین ضخامت فیلم باید طوری انتخاب شود که این کشش یا فشار را تحمل کند. حتی در بعضی از موارد ممکن است این تنش باعث خراب شدن یا شکستن فیلم شود.

---

<sup>۱</sup> tensile stress

<sup>۲</sup> compressive stress



روش‌های لایه‌نشانی لایه نازک معمولاً شامل لایه‌نشانی تبخیر فیزیکی<sup>۱</sup> (pvd)، لایه‌نشانی تبخیر شیمیایی<sup>۲</sup> (cvd) یا الکتروپلیتینگ و الکترولیز<sup>۳</sup> می‌باشد. از این میان فرایندهای pvd یکنواخت‌ترین لایه با ضخامت بسیار نازک به دست می‌دهد. مشکل این فرایند این است که نیاز به تجهیزات با خلاء بالا دارند و هزینه نگهداشتن خلاء در این تجهیزات زیاد است.

در روش‌های cvd دسترسی به فشار پایا برای برخی فلزات از جمله نقره محدود است و تجهیزات آنها برای لایه‌نشانی در مساحت‌های بزرگ، گران است.

لایه‌نشانی با روش الکترولیز ارزانتر است اما لایه‌نشانی با ضخامت ۵۰ نانومتر و کمتر در آن ممکن نیست.

با توجه به موارد فوق و با در نظر گرفتن کاربری لایه‌های کم گسیل روی شیشه در مساحت‌های بزرگ، نمونه‌های این رساله با روش اسپاترینگ لایه‌نشانی شدند.

اسپاترینگ مگنترون RF یا DC یکی از متداول‌ترین روش‌های رشد و لایه‌نشانی برای لایه‌نشانی پوشش‌های اپتیکی است. این نوع لایه‌نشانی کندتر از روش تبخیر است و تارگتها معمولاً گرانتر هستند. ولی فرایندی پایا است و کنترل ضخامت لایه‌ها کاملاً ممکن است. در این روش پوشش‌های یکنواخت در سطوح بزرگ قابل لایه‌نشانی است و امکان استفاده از تارگت‌های اکسیدی و فلزی را فراهم می‌کند. وقتی که گاز خنثی به داخل محفظه خلاء وارد می‌شود، اختلاف پتانسیل بین زیر لایه (آند) و تارگت (کاتد) ایجاد می‌شود، الکترون‌های کاتد، گاز خنثی را یونیزه می‌کند. در این هنگام پلاسمای تشکیل شده قابل مشاهده است. معمولاً از گازهای سنگین و خنثی مثل آرگون برای این منظور استفاده می‌شود. گاز مورد استفاده خنثی است تا از ایجاد ترکیبات ناخواسته روی فیلم لایه‌نشانی شده

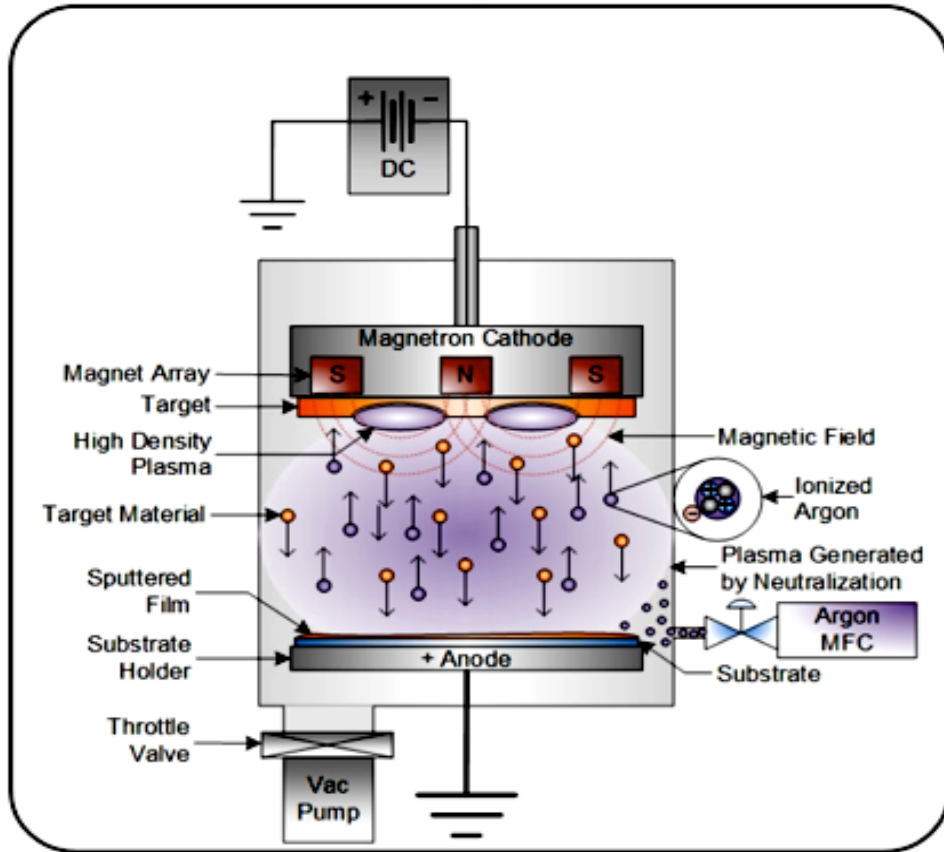
---

<sup>1</sup> physical vapor deposition

<sup>2</sup> chemical vapor deposition

<sup>3</sup> electro/electroless plating

جلوگیری شود و باید سنگین باشد تا یونهایی که به هدف برخورد می‌کنند، بتواند اتم‌های بیشتری را از هدف جدا کرده و بازده اسپاترینگ افزایش یابد (شکل ۲-۴).



شکل ۲-۴ نحوه عملکرد دستگاه مگنترون اسپاترینگ DC

در مگنترون اسپاترینگ، با استفاده از میدان مغناطیسی، الکترون‌ها در نزدیکی تارگت به دام می‌افتند. بدون میدان مغناطیسی بسیاری از الکترون‌ها در برخورد با دیواره‌ها باز ترکیب شده و از بین می‌روند. با اعمال میدان مغناطیسی الکترون‌ها در مسیر مارپیچ نزدیک تارگت حرکت کرده و گازهای بیشتری یونیزه شده و بازده اسپاترینگ افزایش می‌یابد. در نهایت فشار کمتری از گاز برای حفظ پلاسما مورد نیاز است. در این روش پرتوهای پر انرژی از یونهای خنثی به هدف که از جنس ماده مورد نظر برای لایه‌نشانی است، برخورد می‌کند. اتمها یا خوشه‌ای از اتمهای ماده از جای خود در ماده هدف خارج شده و با انرژی زیاد به سمت زیرلایه رفته و روی آن لایه‌نشانی می‌شوند.

## ۱-۴-۱-۲ کنترل ضخامت در لایه‌نشانی

عملکرد بسیاری از پوشش‌های چندلایه اپتیکی به شدت به ضخامت هر کدام از لایه‌ها بستگی دارد. بنابراین کنترل ضخامت هر لایه طی لایه‌نشانی بسیار با اهمیت است. روش‌های مختلفی برای نشان دادن ضخامت لایه موجود است. در بسیاری از روش‌های لایه‌نشانی پایا مثل اسپاترینگ، زمان لایه‌نشانی نتایج بسیار خوبی برای کنترل ضخامت لایه ارائه می‌دهد. هرچند به طور متداول از بلور کوارتز و نشانگرهای اپتیکی نیز استفاده می‌شود. این روش حساستر بوده و برای فیلم‌های شفاف یا کدر نازک به خوبی به کار می‌رود. ولی به کالیبراسیون دقیق نیاز دارد.

۲-۱-۵ تاثیر الکترون‌های آزاد، محدودیت کوانتومی و رزونانس پلاسمون‌های سطحی در

### ویژگی‌های اپتیکی مواد نیم‌رسانای شفاف و فلزات

علوم و فناوری نانو به طور شگرفی در حال توسعه است و تحقیقات زیادی با هدف ساخت، مشخصه‌یابی و درک نانوذرات و ساختارهای نانو برای کاربردهای مختلف در حال انجام است. ویژگی‌های جدید و خاص فیزیکی و شیمیایی نانوذرات ناشی از اثر محدودیت<sup>۱</sup> بوده و به ویژگی‌های مورفولوژیکی مثل شکل، اندازه و شکل‌گیری فضایی آنها بستگی دارد.

نانوذرات به ذراتی با ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر اطلاق می‌شود. اساساً ویژگی‌های این نانوذرات به دو دلیل اصلی نسبت به ذرات با سایز بزرگترشان متفاوت خواهد بود. اول، اثر محدودیت که به دلیل اثرات کوانتومی بر رفتار ماده در سایز نانو مسلط می‌شود و بر ساختار، ویژگی‌های اپتیکی، الکتریکی و مغناطیسی ماده تاثیر می‌گذارد. دوم، نانو ذرات مساحت سطح نسبتاً بزرگتری در مقایسه با جرم یکسانی از همان ماده در ابعاد ماکروسکوپیک دارد. این ویژگی باعث انفعالی<sup>۲</sup> شدن ماده از نظر شیمیایی می‌شود به طوری که در بعضی از موارد، موادی که در ابعاد میکروسکوپی خنثی هستند، در ابعاد نانومتری واکنشی (انفعالی) می‌شوند. بنابراین، این ویژگی، دوام و ویژگی‌های الکتریکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

تحقیقات زیادی در زمینه نانو ساختارها در چندین دهه گذشته ارایه و مطرح شده است اما امروزه پیشرفت در تولید و ابزارهای مشخصه‌یابی، با ایجاد امکان آزمون‌هایی با دقت خیلی بیشتر، توانایی بسط و گسترش و پیشرفتهای بسیاری در این زمینه را ایجاد کرده است. پیشرفتهای صنعتی اخیر به وضوح به معرفی کاربرد علم نانو در زندگی روزمره می‌پردازد. برای مثال گرایش مداوم و در حال پیشرفت

---

<sup>1</sup> Confinement effects

<sup>2</sup> Reactive

کوچک کردن قطعات الکترونیکی به ابعاد نانومتری یا پوشش‌های هوشمند در کاربردهای مختلف، نمایشگرها با وضوح و کنتراست بالا یا بهبود دوام قطعات اپتوالکترونیک انعطاف‌پذیر نمونه‌هایی از کاربرد پوشش‌های نانومتری از اکسیدهای رسانای شفاف<sup>۱</sup> (TCOs) یا لایه‌های فلزی در این پیشرفت می‌باشند. در ادامه به معرفی پدیده‌های فیزیکی حاکم بر ویژگی‌های اپتیکی اکسیدهای رسانای شفاف<sup>۲</sup> (TCOs) و لایه‌های فلزی می‌پردازیم.

### ۲-۱-۵-۱ بررسی ویژگی‌های اپتیکی اکسید رسانای شفاف

یک نیمرسانا با گاف انرژی زیاد و تراکم حامل‌های زیاد، یک اکسید فلزی رسانای شفاف TCO است که امروزه جذابیت زیادی در کاربردهای اپتوالکترونیک دارد. ویژگی‌های اپتیکی، به خصوص جذب این مواد به شدت تحت تاثیر تراکم حامل‌های آزاد است. کاربردی‌ترین اکسیدهای فلزی شفاف، نیمرساناهای نوع n- با گاف انرژی بیش از ۳ eV هستند و به دلیل تراکم حامل‌های زیاد غالباً به عنوان مواد پلاسمونیک، جایگزین و یا همراه با فلزات متداول در کاربردهای محدوده فرسرخ نزدیک به کار می‌روند. از دیگر پارامترهای موثر در ویژگی‌های اپتیکی این مواد محدودیت الکترونی است که در ادامه به تاثیر این پارامترها در ویژگی‌های اپتیکی می‌پردازیم.

ویژگی‌های اپتیکی مواد نیمرسانا با سایز چند نانومتر به دلیل اثر محدودیت کوانتومی با ویژگی‌های اپتیکی بالک کاملاً متفاوت است. به طوری که ثابت‌های اپتیکی یا تابع دی‌الکتریک نانوبلورها به دلیل اثرات محدودیت کوانتومی با کاهش سایز آن کاهش می‌یابد [۲۳, ۲۴].

---

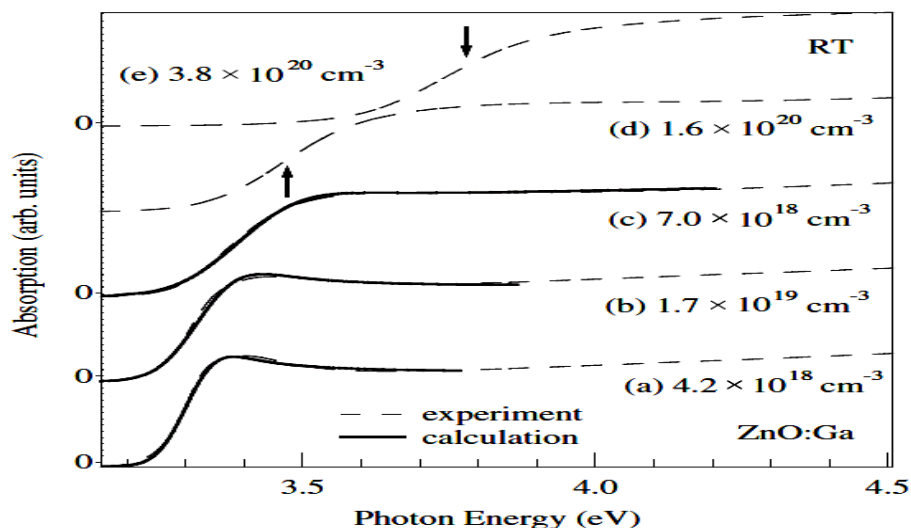
<sup>۱</sup> Transparent conductive oxides

<sup>۲</sup> Transparent conductive oxides

همچنین شیفت آبی<sup>۱</sup> در لبه جذب  $\epsilon_2$  با کاهش سایز نانوبلور، به دلیل اثر محدودیت کوانتومی است. بنابراین ویژگی‌های اپتیکی و الکتریکی نانوساختارها با تغییر سایز نانوساختارها نیز تغییر می‌کند.

برهمکنش کولنی در فیلم‌های اکسید رسانا به دلیل اثر اکسیتون‌ها می‌تواند گذارهای الکترونیکی نزدیک لبه باند را تغییر دهد [۲۵]. از طرفی فاکتورهای بیرونی مثل آلاینش یا نواقص سطحی نیز می‌تواند تراکم حامل‌ها را در این فیلم‌ها تغییر داده و به دلیل تاثیر الکترون‌های آزاد در ویژگی‌های اپتیکی فیلم‌ها موثر هستند.

ZnO یک نیمرسانای نوع n- با تراکم حامل‌های  $10^{16}$ – $10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$  است. وقتی تراکم حامل‌ها با ایجاد ناخالصی یا افزودن لایه دیگری به مقدار  $10^{19}$ – $10^{21}$   $\text{cm}^{-3}$  برسد، جذب توسط حامل‌های آزاد بر جذب توسط اکسیتون‌ها غالب می‌شود [۲۶،۲۷]. در این حالت پشدن نوار رسانش با الکترون‌های آزاد، لبه جذب را به سمت انرژی‌های بیشتر شیفت داده و اثر Bursterin-Moss (BM) اتفاق می‌افتد [۳۰–۳۲].



شکل ۲-۵ ضریب جذب<sup>۲</sup> فیلم‌های نازک Ga-doped ZnO (ZnO:Ga) با تغییر تراکم حاملها [۱۶]

<sup>۱</sup> blue shift

<sup>۲</sup> Absorption coefficient

همان طور که در شکل ۲-۶ مشاهده می‌شود، یک شیفت آبی از لبه جذب با افزایش تراکم حامل‌ها و گسترش گاف انرژی به دلیل اثر BM اتفاق افتاده که بر جذب اکسیتونی غالب شده است. بنابراین پاسخ اپتیکی الکترون‌های آزاد در فیلم‌های اکسید فلزی با مدل کلاسیکی درود مطابقت دارد. به طور نرمال فیلم اکسید فلزی به دلیل جذب نوار به نوار<sup>۱</sup>، جذب اپتیکی شدیدی در انرژی‌های بیشتر از گاف انرژی نشان می‌دهد.

#### ۲-۱-۵-۲ بررسی ویژگی‌های اپتیکی فلزات

نانوساختارهای فلزی به دلیل حامل‌های آزاد زیاد، پیک جذبی قابل توجهی نشان می‌دهد که در حالت بالک آنها وجود ندارد. این ویژگی پیک جذب به دلیل نوسان‌های پیوسته الکترون‌های رسانش داخل نانوساختارهاست که رزونانس پلاسمون سطحی جایگزیده<sup>۲</sup> نامیده می‌شود (LSPR).

اثرات پلاسمونیک<sup>۳</sup> مربوط به فرایندهای برهمکنش بین تابش الکترومغناطیس و الکترون‌های رسانش در مرزهای فلزی یا نانوساختارهای فلزی کوچک است که به افزایش جنبه‌های اپتیکی در ابعاد کمتر از طول موج می‌انجامد. بنابراین پلاسمونیک‌ها نشان می‌دهند چطور میدان‌های الکترومغناطیسی می‌تواند در ابعاد از مرتبه طول موج یا کمتر، محدود شود.

همچنین ویژگی‌های اپتیکی فلزات با در نظر گرفتن جذب الکترون آزاد و جذب بین نواری<sup>۴</sup> تعریف می‌شود. بنابراین توزیع ثابت‌های اپتیکی برای فلزات پیچیده‌تر است. جذب اپتیکی فلزات در هیچ محدوده طیفی فرابنفش - مرئی - فروسرخ به سمت صفر میل نمی‌کند.

---

<sup>1</sup> band-to band absorption

<sup>2</sup> localized surface plasmon resonance

<sup>3</sup> Plasmonic effects

<sup>4</sup> interband

مدل درود<sup>۱</sup> برای فلزات، مدل جنبشی کلاسیکی از رسانندگی (عکس مقاومت الکتریکی) مطابق با نظریه درود و زومرفلد<sup>۲</sup> است [۳۱،۳۲]. این نظریه برهمکنش میدان الکتریکی متغیر با زمان را با حامل‌های بار که آزادانه در رسانا حرکت می‌کنند، توصیف می‌کند. در این نظریه، فلزات به صورت گازی از الکترون‌های آزاد و مستقل تصور می‌شوند. الکترون‌ها آزادانه با یونهای شبکه، الکترون‌های دیگر، فونون‌ها و .. با فرکانس متوسط<sup>۳</sup>  $\gamma = \tau^{-1}$  برخورد می‌کنند، که  $\tau$  زمان آزاد میانگین<sup>۴</sup> الکترون است. اطلاعات مناسب دیگری پس از برخورد وجود ندارد. در نتیجه حرکت الکترون پس از برخورد دارای جهت‌های تصادفی خواهد بود. در حضور میدان خارجی، الکترون‌ها بین برخوردها شتاب می‌گیرند و این به جریان الکتریکی-حرکتی<sup>۵</sup> سوقی منجر می‌شود. در نتیجه رسانندگی جریان متناوب  $\sigma(\omega)$  برای فلزات در مدل درود با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma(\omega) = \frac{\sigma_{static}}{1 - i\omega\tau} \quad (۷۸-۲)$$

که  $\sigma_{static}$  رسانندگی استاتیکی ماده است.

تابع دی‌الکتریک درود با استفاده از این معادله و معادله (۲-۵۶)، به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\varepsilon_{Drude}(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma} \quad (۷۹-۲)$$

قسمت حقیقی و موهومی این تابع:

$$\varepsilon_1(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2} \quad (۸۰-۲)$$

---

<sup>۱</sup> Drude model

<sup>۲</sup> Sommerfeld

<sup>۳</sup> Average rate

<sup>۴</sup> Relaxation time

<sup>۵</sup> Motion-electrical



$$\varepsilon_2(\omega) = \frac{\omega_p^2 \gamma}{\omega(\omega^2 + \gamma^2)} \quad \therefore \omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m_e}} \quad (۸۱-۲)$$

که برای توصیف برهمکنش نور با الکترون‌های آزاد در فلزات به کار می‌رود. تابع دی‌الکتریک درود، نوسانگر لورنتز را با انرژی صفر در مرکز، نشان می‌دهد که در آن :

$\omega_p$  فرکانس پلاسما،  $N$  چگالی حجمی الکترون‌ها،  $e$  بار الکترون،  $m_e$  جرم الکترون و  $\gamma$  فرکانس آزاد الکترون است.

سهم الکترون‌های مقید در قطبش‌پذیری با جایگزینی ۱ به جای  $\varepsilon_\infty$  در معادله ۲-۵۴ بیان می‌شود (که فقط سهم الکترون‌های نوار رسانش که در پلاریزاسیون شرکت می‌کنند، را نشان می‌دهد).

در اغلب فلزات در دمای اتاق، فرکانس الکترون،  $\gamma$ ، خیلی کمتر از فرکانس پلاسماست. فرکانس پلاسما فلزات در محدوده طیفی مرئی و فروسرخ قرار دارند. بنابراین با تقریب خوب برای قسمت‌های حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک درود در این محدوده طیفی داریم:

$$\varepsilon_1(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad \varepsilon_2(\omega) = \frac{\omega_p^2 \gamma}{\omega^3} \quad (\omega \gg \gamma) \quad (۸۰-۲)$$

در این رساله روی فلز نقره علاوه بر نیمرسانای اکسید روی، مطالعاتی انجام شده است. نقره از نظر فیزیکی در دسته فلزات نجیب قرار می‌گیرد که دو شرط را برآورده می‌کنند: تراز  $d$ - از ساختار الکترونیکی آن پر شده و پایین‌تر از تراز فرمی قرار دارد [۳۳، ۳۴]. و برانگیختگی الکترون‌های مقید از

ترازهای d- پر شده که دقیقاً زیر تراز فرمی قرار دارند به تراز رسانش (برانگیختگی بین نوار<sup>۱</sup>) در فلزات نجیب، سهم الکترون‌های مقید در تابع دی‌الکترونیک را نشان می‌دهد.

در حالت کلی فیلم‌های نازک فلزی به دلیل تعداد زیاد الکترون‌های آزاد بازتاب زیادی نشان می‌دهند. به عبارت دیگر برهمکنش بین نور و الکترون‌های رسانش منجر به پدیده پلاسمون می‌شود. حالت پلاسمونی به شدت بستگی به هندسه فلزات (به طور مثال پلاسمون حجمی یا سطحی در حالت بالک در مرز بین دی‌الکترونیک و فلز) دارد.

نانوذرات فلزی از جمله نقره به دلیل نوسان‌های الکترون‌های رسانش داخل نانوذراتش، رزونانس پلاسمون‌های سطحی جایگزیده قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهند.

## ۲-۱-۶ عملکرد پوشش‌های کم‌گسیل روی شیشه در ساختمان

امروزه فناوری پنجره‌های نوین با پیشرفت فرایندهای تولید صنعتی شیشه و امکان لایه‌نشانی لایه‌های بسیار نازک روی سطح نورگذر به حد مطلوب رسیده است. یکی از این پیشرفت‌ها تولید صنعتی شیشه با پوشش کم‌گسیل می‌باشد. همان‌طور که در فصل اول نیز اشاره شد، پوشش‌های کم‌گسیل لایه‌های بسیار نازکی از ترکیب فلزات واکسیدهای فلزی هستند که برای گزینش طیف عبوری روی شیشه یا زیر لایه‌های خاص لایه‌نشانی می‌شوند. این پوشش‌ها همزمان طیف مرئی را عبور ولی طول موج‌های بلند طیف فروسرخ را بازتاب می‌کنند. کاربرد این شیشه‌ها در پنجره‌های ساختمانی امکان محدود کردن انتقال گرمای تابشی خورشید بدون کاهش قابل ملاحظه نور مرئی را فراهم می‌کند.

سطوح نورگذر با ویژگی‌های کم‌گسیل با قوانین فیزیکی زیر توجیه می‌شوند:

---

<sup>1</sup> Interband excitation

۱) قانون استفان-بولتزمن و قانون جابجایی وین، که طبق آن تبدیل گرما به تابش بین سطوح، با گسیل حرارتی سطح تعیین می‌شود و حداکثر تابش گسیلی از یک جسم در طول موج خاصی که به دمای جسم بستگی دارد، اتفاق می‌افتد. برای اجسام در دمای اتاق این طول موج در حدود ۱۰ میکرون و خارج از بخش مرئی طیف است.

۲) تئوری درود و قانون هاگن-روبنز، که طبق آن پلاسمای حامل‌های آزاد در مواد رسانای الکتریکی فرکانس قطع جریان پایین دارند که در فرکانس‌های کمتر از آن، همه تابش الکترومغناطیسی دریافتی را برمی‌گردانند و بازتابش فرسوخ مستقیماً مربوط به رسانندگی الکتریکی ماده می‌باشد.

بنابراین جداکردن طیف مرئی از تابش حرارتی و وجود سطوحی با ویژگی‌های کاملاً متفاوت از نظر تابش مرئی و حرارتی ممکن می‌باشد. پس ماده‌ای با ویژگی‌های کم گسیل، رسانای الکترونیکی است.

پوشش‌های کم گسیل اولین بار برای کاربرد در شیشه‌های نورگذر عایق<sup>۱</sup> پیش بینی شده بودند و امروزه در بسیاری از کشورها برای افزایش بازدهی انرژی و کاهش گسیل دی‌اکسید کربن، استفاده از این شیشه‌ها در ساختمان اجباری است. اصلی‌ترین تولیدکنندگان شیشه‌های کم گسیل در جهان عبارتند از: Pilkington، PPG، Saint gobain، AGC، NSG و Guardian که بیشتر پتنت‌های موجود به سفارش و حمایت این شرکت‌ها انجام شده است.

جدای از کاربرد این پوشش‌ها در ساختمان، کاربردهای متنوع دیگری نیز به دلیل رسانندگی الکتریکی این فیلم‌ها وجود دارد. مثلاً کاربرد آنها به عنوان رساناهای شفاف در بسیاری از دستگاهها مانند سلولهای خورشیدی ارگانیک یا حساس به رنگ [۳۵]، ال.ای.دی‌ها [۳۶] و نمایشگرها، آنها را در اولویت بررسی‌های ابرفناوری قرار داده است.

---

<sup>1</sup> Insulating glass units (IGUs)

در بخش بعدی این فصل به مرور بررسی ویژگی‌های اپتیکی و الکتریکی کارهای انجام شده تا کنون در عملکرد لایه‌های نازک می‌پردازیم.

## ۲-۲ پیشینه پژوهش در تعیین خصوصیات فیزیکی و اپتیکی لایه‌های نازک مختلف با کاربردهای خاص

### ۱-۲-۲ بررسی ویژگی‌های اپتیکی و الکتریکی پوشش کم‌گسیل در چند پتنت

در نخستین پژوهش‌ها برای لایه‌نشانی پوشش‌های کم‌گسیل<sup>۱</sup> روی زیرلایه‌های شفاف بررسی‌های اولیه روی یک لایه فوق نازک نقره و یک لایه نازک اکسید فلزی ضدانعکاس روی زیر لایه شیشه انجام شد [۳۷]. در این پتنت یک لایه نقره با ضخامت کمتر از ۳۰ نانومتر با روش اسپاترینگ لایه‌نشانی شد. سپس قبل از لایه‌نشانی اکسید فلزی، لایه‌ی نازک فلزی با ضخامت کمتر از ۱۰ نانومتر روی نقره لایه‌نشانی شد. وجود این لایه اضافی روی نقره باعث شد گسیلندگی کم نقره و عبور زیاد طیف مرئی از نمونه در حد مطلوب باقی بماند.

در تحقیق دیگری لایه‌نشانی با روش اسپاترینگ روی یک سامانه شیشه‌ای چندجداره<sup>۲</sup> انجام شد [۳۸]. هر تینگ<sup>۳</sup> لایه‌نشانی بهینه برای مقدار گسیلندگی ۰٫۰۶ یا کمتر، دوام مناسب روی شیشه را بررسی کرد. لایه‌نشانی شامل زیرلایه دی‌الکتریک شفاف با ضریب شکست ۲٫۶ - ۲٫۵ (در طول موج ۵۵۰ نانومتر) بود. ساختار این نمونه از دو لایه  $Si_3N_4$  با ضخامت ۴۰ نانومتر و یک لایه نقره با ضخامت ۹٫۵ نانومتر که بین دو لایه نیکروم که با ضخامت ۷ آنگستروم لایه‌نشانی شده، تشکیل شده بود.

---

<sup>۱</sup> Low emissivity coating

<sup>۲</sup> Insulating glass units (IGUs)

<sup>۳</sup> W.Harting

در پتنت دیگر، یک نمونه با یک پوشش کم گسیل شامل حداقل یک لایه بازتابنده IR همراه با لایه محافظ بررسی شد [۳۹]. ویراسامی<sup>۱</sup>، یک لایه کربن الماسی-شکل<sup>۲</sup> با ضخامت ۱۰ تا ۲۵۰ آنگستروم به عنوان پوشش محافظ روی نمونه با لایه بازتابنده فروسرخ ایجاد شد تا مقاومت خراش و مقاومت مکانیکی پوشش کم گسیل را افزایش دهد.

یک لایه کم گسیل با کاربرد در پنجره با در نظر گرفتن ضریب خورشیدی<sup>۳</sup> نیز بررسی شد [۴۰]. در این پتنت یک لایه با ضریب خورشیدی کم یا بسیار کم مدنظر قرار گرفت. لایه‌نشانی با هدف تعیین نسبت ضریب عبور مرئی به ضریب خورشیدی ( $T_{vis}/SF$ ) بالای شیشه ایجاد شد. برای این منظور یک لایه اکسیدی با ضخامت ۳۲ نانومتر به عنوان لایه تماسی زیر لایه بازتابنده فروسرخ قرار گرفت. با این ترتیب لایه‌نشانی، مقدار ضریب خورشیدی پایین، نسبت ضریب عبور مرئی به ضریب خورشیدی بالا به دست آمد. در این روش یک لایه نقره با ضخامت ۲۵ نانومتر بین دو لایه اکسید فلزی با ضخامت ۳۰ نانومتر و کروم یا نیکل با ضخامت ۱۰ نانومتر لایه‌نشانی شد. ویژگی‌های اپتیکی به دست آمده برای عبور نور مرئی ۳۰٪ تا ۵۰٪، نسبت ضریب نور مرئی به ضریب خورشیدی ۱/۷ و ضریب خورشیدی کمتر از ۲۵ به دست آمد.

لمر<sup>۴</sup> برای بهبود خواص مکانیکی لایه‌ها در لایه‌های میانی و بین لایه انعکاس دهنده فروسرخ و اکسید روی با ضخامت ۱۵ نانومتر و  $Si_3N_4$  با ضخامت ۴۵ نانومتر، لایه‌نشانی یک لایه نازک اکسید قلع با ضخامت ۲۵ نانومتر بررسی کرد [۴۱]. همچنین برای بهبود پایداری حرارتی نمونه، یک لایه نازک اکسید روی بعد از لایه بازتابنده فروسرخ و بالاترین لایه هم اکسید زیرکونیوم لایه‌نشانی شد.

---

<sup>1</sup> S.Veerassamy

<sup>2</sup> diamond-Like carbon (DLC)

<sup>3</sup> Solar factor (SF)

<sup>4</sup> Lemmer

در موارد خاص مابین لایه‌های فلزی بازتابنده و جاذب سطح شیشه، از لایه‌های دیگری برای محافظت و کاهش اکسیداسیون لایه جاذب طی عملیات حرارتی انتخابی (مثل تمپرینگ، خمش حرارتی و...) استفاده می‌شود. چون در مواردی که این پوشش‌ها با کاربرد<sup>۱</sup> IGU مورد استفاده قرار می‌گیرند باید بتواند تنش‌های حرارتی حدود ۵۸۰ تا ۶۲۰ درجه را تحمل کند و مانع آسیب دیدن شیشه پوشش‌دار در عملیات حرارتی گردد [۴۲]. در این پتنت لایه جاذب میانی، بین اولین و دومین لایه  $Si_3N_4$  به کار رفته و لایه جاذب بالاتر بین  $Si_3N_4$  و لایه فلزی بازتابنده IR به کار می‌رود تا از اکسیداسیون لایه‌های جاذب در فرایندهای حرارتی جلوگیری کند. همچنین این ترکیب باعث دسترسی به تغییر رنگ دلخواه یا گزینش لایه با ویژگی‌های اپتیکی مورد نظر می‌گردد.

هرتینگ و همکاران [۴۳]، تغییر ضخامت لایه  $Si_3N_4$  در محدوده بحرانی با در نظر گرفتن لایه نقره و آلیاژ نیکل بررسی کردند. وجود لایه نیکروم برای افزایش چسبندگی لایه نقره ضروری است و در مواردی که ضخامت این لایه بسیار کوچک باشد، هیچ تأثیری در ویژگی‌های اپتیکی لایه نقره گزارش نشده است. همچنین در این پتنت افزایش لایه نقره برای بهبود گسیلندگی مورد بحث قرار گرفت. به طوری که با افزایش ضخامت لایه نقره به اندازه ۰٫۵ nm مقاومت الکتریکی فیلم به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت و این به کاهش گسیلندگی سطح منجر شد. اما این افزایش ضخامت به کاهش عبور نور مرئی می‌انجامد که برای جبران اثر این پدیده، ضخامت لایه‌های نیکروم را کاهش می‌دهند. در واقع لایه‌های دی‌الکتریک در زیرلایه<sup>۲</sup> تأثیر مثبت روی ضریب عبور نور مرئی دارند اما لایه‌های دی‌الکتریک روی لایه بالای<sup>۳</sup> برای افزایش دوام اضافه می‌شوند و انتظار می‌رود با کاهش ضخامت این لایه‌ها به وضعیت نامطلوبی نرسد.

---

<sup>۱</sup> Insulating glass unit

<sup>۲</sup> precoat

<sup>۳</sup> overcoat

برای بررسی تاثیر لایه‌های نقره در پوشش‌های دو لایه کم گسیل در پتنتی [۴۴]، گسیلندگی را با تغییر ضخامت لایه نقره بالایی کنترل کردند. گرچه لایه نقره پایینی هم نقش کمی در گسیلندگی داشت، هر دو لایه در کسب مقادیر مطلوب ضریب عبور مرئی، بازتاب و پارامترهای رنگ مهم هستند. مقدار بهینه مجموع ضخامت هر دو لایه نقره حدود ۲۷٫۵-۲۲٫۵ nm ارزیابی شد. همچنین با کاهش لایه‌های NiCr به کمتر از  $7 \text{ \AA}$  مقدار عبور مرئی حدود ۴ درصد افزایش و مقدار مقاومت الکتریکی سطح به ۲ تا ۵ اهم کاهش یافت.

در بررسی‌های دیگر [۴۵]، یک لایه نقره با ضخامت ۸ تا ۲۲ نانومتر بین دو لایه NiCr با ضخامت حدود ۳ نانومتر و دو لایه  $\text{Si}_3\text{N}_4$  با ضخامت حدود ۴۵ نانومتر لایه‌نشانی شد. در این مورد زیر اولین لایه  $\text{Si}_3\text{N}_4$  یک لایه دی‌الکتریک (مانند  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ،  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{PbO}$ ) با ضریب شکست ۲٫۵ تا ۲٫۶ و به ضخامت حدود ۳۰ نانومتر روی شیشه لایه‌نشانی شد. علاوه بر ضرایب گسیلندگی نرمال و ضریب عبور مرئی و مقاومت الکتریکی، منحنی ضریب شکست پوشش بر حسب طول موج نیز در نظر گرفته شد. فریرا<sup>۱</sup> و همکاران یک لایه zinc stannate بین لایه اکسید قلع و  $\text{Si}_3\text{N}_4$  برای کاهش لکه‌های نامطلوب ناشی از عملیات حرارتی را لایه‌نشانی کردند که تاثیر آن در افزایش خم‌پذیری شیشه‌های خودرو نیز مطلوب ارزیابی گردید [۴۶].

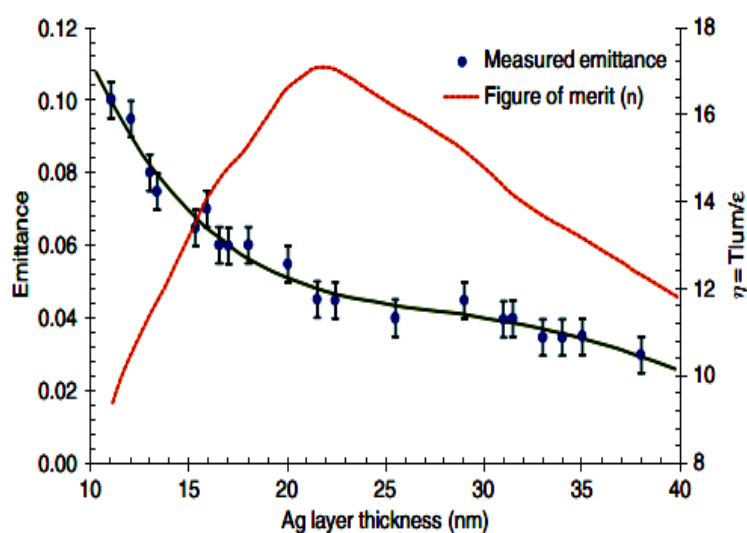
برای کاربرد پوشش کم گسیل روی شیشه در پنجره‌های موجود در ساختمان یک فیلم نازک شامل یک لایه پلیمری انعطاف پذیر شفاف با چند لایه شفاف بسیار نازک از پوشش‌های کم گسیل شامل یک فلز منعکس کننده قوی مانند طلا، نقره، مس یا آلومینیوم استفاده شد [۴۷]. در بررسی‌ها این فیلم حدود عبور نور مرئی ۵۰ درصد و گسیلندگی حدود ۰٫۳ دارد.

---

<sup>1</sup> Ferreira

## ۲-۲-۲ بررسی ویژگی‌های اپتیکی و الکتریکی پوشش‌های لایه نازک در مقالات دیگر

در پژوهشی گسیلندگی پوشش ZnS/Ag/ZnS بر حسب ضخامت نقره برای کاربرد این پوشش روی شیشه بررسی شد. کاهش ناگهانی گسیلندگی با افزایش ضخامت لایه نقره در ضخامت حدود ۱۰-۱۵ نانومتر به دلیل تبدیل لایه جزیره‌ای نقره به ساختار پیوسته مشاهده می‌شود و بعد از آن کاهش گسیلندگی با سرعت کمتری ادامه می‌یابد. با تعریف معیار  $\eta = T_{vis}/\epsilon$ <sup>۱</sup> در شکل، مقدار بهینه ضخامت لایه نقره حدود ۲۲ نانومتر به دست آمد [۴۸].

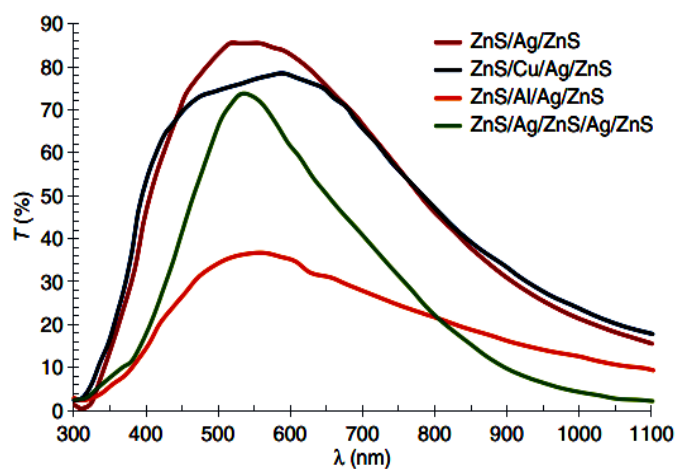


شکل ۶-۲ گسیلندگی و figure of merit برای لایه‌های ZnS/Ag/ZnS بر حسب ضخامت نقره

<sup>۱</sup> Figure of merit



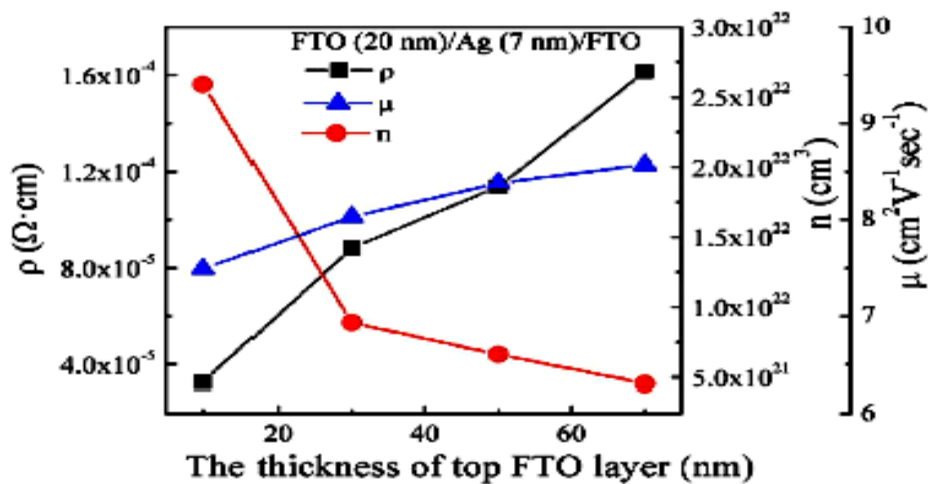
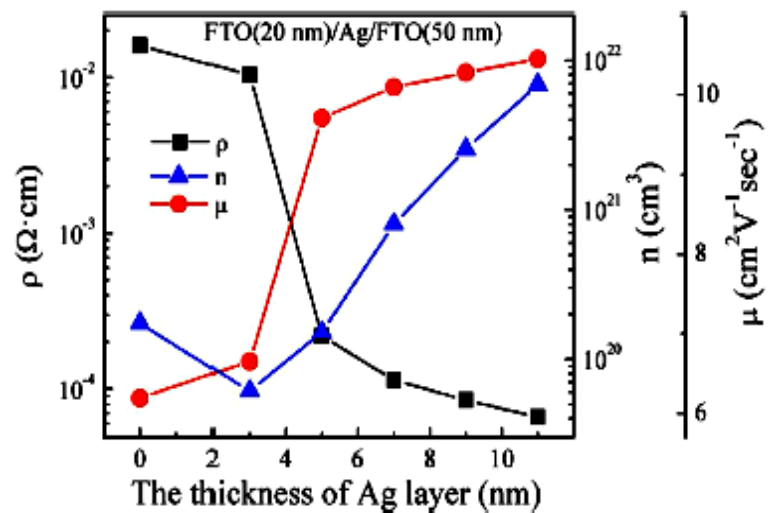
برای بهبود گسیلندگی و پایداری حرارتی پوشش ZnS/Ag/ZnS، لایه بسیار نازکی با ضخامت کمتر از ۵ نانومتر از مس یا آلومینیوم به نقره اضافه شد. همانطور که در شکل ۲-۷ مشاهده می‌شود، اضافه کردن مس تغییر چندانی در گسیلندگی و طیف عبوری در بخش فرورسرخ نداشته ولی اضافه کردن لایه آلومینیوم عبور بخش مرئی را به شدت کاهش داده است [۴۹].



شکل ۲-۷ طیف عبور برای چند نوع پوشش مختلف کم گسیل

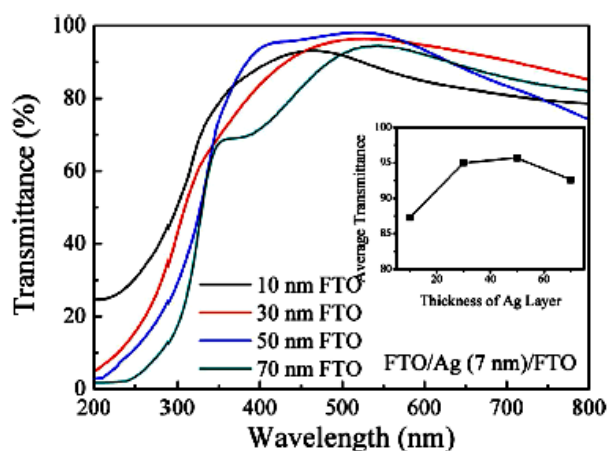
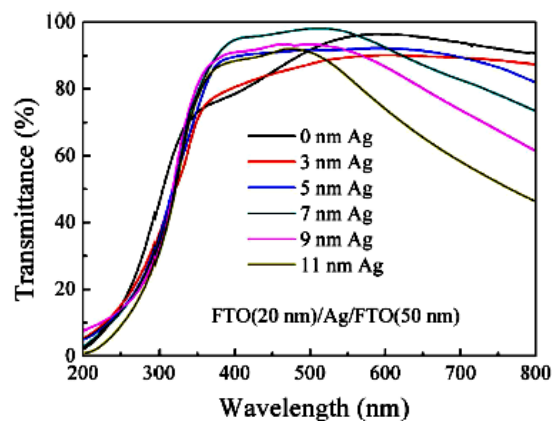
در مطالعه دیگری تاثیر ضخامت لایه نقره و لایه FTO که با روش اسپاترینگ در دمای ۱۰۰ درجه لایه نشانی شده بود، روی ویژگی‌های الکتریکی و اپتیکی چندلایه FTO/Ag/FTO بررسی شد

[۵۰].



شکل ۸-۲ نمودار تغییر پارامترهای الکتریکی پوشش چندلایه FTO/Ag/FTO برحسب ضخامت FTO و Ag

نتایج این تحقیق نشان داد ساختار آگلومره‌ای نقره در ضخامت کم با افزایش ضخامت لایه نقره به ساختار پیوسته تبدیل شده و مقاومت الکتریکی پوشش کاهش می‌یابد. اما با افزایش ضخامت لایه رویی FTO به دلیل کاهش تعداد حاملهای آزاد، مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد. همچنین نمودار طیف اپتیکی این پوشش نشان داد با افزایش ضخامت FTO و Ag عبور طیف مرئی به کندی کاهش می‌یابد. این نتیجه نیز به افزایش جذب ناشی از افزایش ضخامت FTO و افزایش بازتاب ناشی از افزایش ضخامت Ag نسبت داده شد.



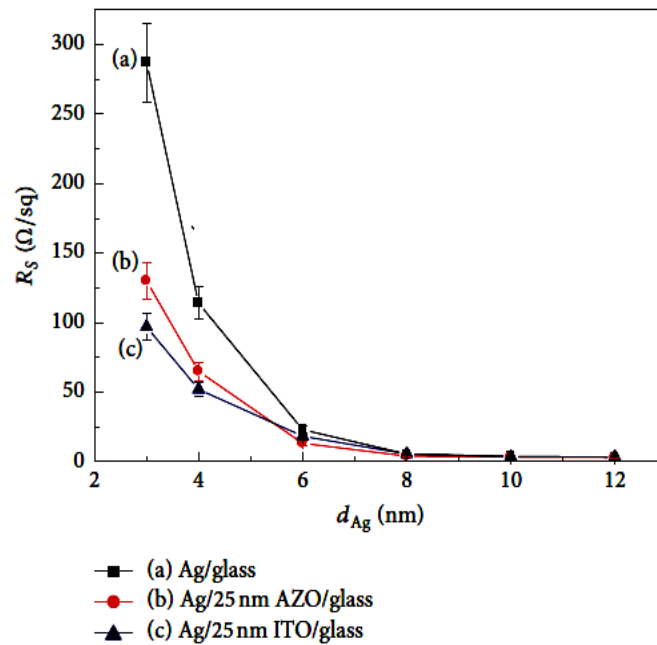
شکل ۹-۲ نمودار تغییر عبور طیف مرئی پوشش چندلایه FTO/Ag/FTO بر حسب ضخامت FTO و Ag

پخش‌شدگی<sup>۱</sup> لایه نقره روی زیرلایه‌های شیشه، AZO و ITO در تحقیق دیگری بررسی شد [۵۱]. در این مقاله تک لایه‌های Ag، AZO و ITO، دو لایه AZO/Ag و ITO/Ag و سه لایه‌های AZO/Ag/AZO و ITO/Ag/ITO با روش اسپاترینگ لایه نشانی شدند. نتایج نشان داد پخش‌شدگی نقره روی زیرلایه AZO به مراتب بهتر از ITO و شیشه می‌باشد. همچنین ویژگی‌های الکتریکی پوشش به شدت به پخش‌شدگی نقره بستگی دارد. به طوری که بیشترین مقدار معیار بهینه هاک<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> Spreadability

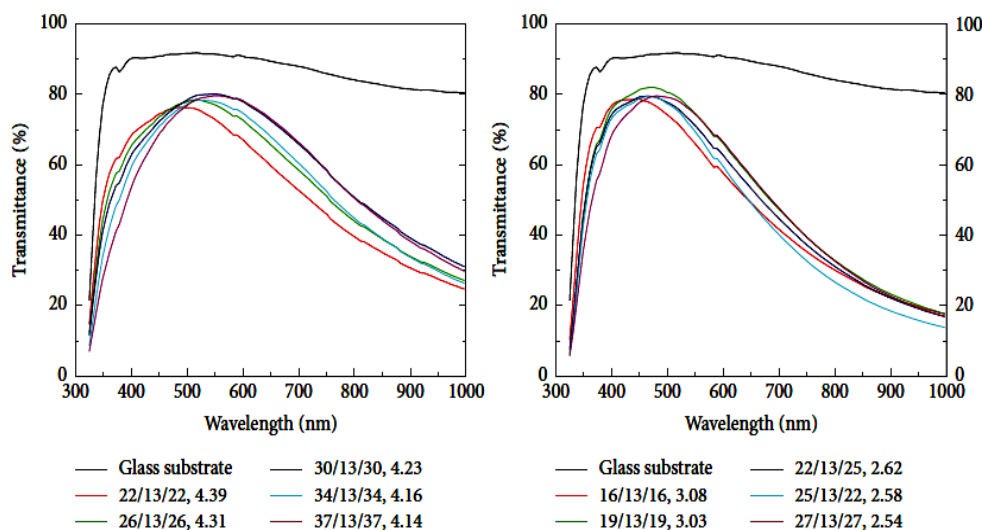
<sup>۲</sup> Haacke figure of merit

برای سه لایه AZO/Ag/AZO به دست آمد. کاهش بیشتر مقاومت سطحی در این چندلایه‌ها نیز به پخش‌شدگی بهتر لایه نقره روی زیر لایه AZO نسبت داده شد.



شکل ۲-۱۰ نمودار مقاومت سطحی لایه نقره روی شیشه و زیرلایه‌های AZO و ITO

منحنی عبور نمونه‌ها نشان داد که ضریب عبور در طول موج حدود ۱۰۰۰ نانومتر، برای پوشش AZO/Ag/AZO کمتر از پوشش ITO/Ag/ITO بود. این نتیجه با افزایش بازتاب فیلم‌های رسانا در طول موج‌های بلند بر اساس نظریه درود توجیه شد که با مقاومت سطحی کمتر فیلم AZO/Ag/AZO نسبت به فیلم ITO/Ag/ITO نیز منطبق است. همچنین همان‌طور که در شکل ۲-۱۱ نیز مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت AZO یا ITO پیک عبور مرئی به طول‌موج‌های بزرگتر شیفت پیدا کرده و مقدار پیک مرئی ابتدا زیاد و سپس کاهش یافته است.



شکل ۱۱-۲ طیف عبور AZO/Ag/AZO (سمت راست) و ITO/Ag/ITO (سمت چپ)

در ضخامت‌های مختلف AZO و ITO

با توجه به کاربرد این پوشش‌ها در سیستم‌های سلول خورشیدی مطالعاتی برای بررسی پایداری حرارتی فیلم AZO/Ag/AZO انجام شده است [۵۲]. در این بررسی لایه‌نشانی با pulsed-DC اسپاترینگ در دمای زیرلایه <sup>۱</sup> ۲۰۰ درجه برای لایه AZO انجام شد. در این بررسی نیز به دلیل جذب زیاد در ضخامت‌های کمتر از ضخامت بحرانی لایه نقره و آگلومره بودن لایه، ضریب عبور فیلم کاهش و مقاومت الکتریکی آن افزایش یافت. نظر به اینکه تحرک پذیری الکترون‌ها تحت تاثیر انواع پراکندگی ناشی از فونون‌ها<sup>۲</sup>، مرز بین سطوح<sup>۳</sup>، مرز بین دانه‌ها<sup>۴</sup> و ناخالصی یون‌ها<sup>۵</sup> می‌باشد، در فیلم‌های TCO، پراکندگی ناخالصی‌های یونی دلیل اصلی کاهش تحرک پذیری است که با افزایش تراکم حامل‌ها کاهش می‌یابد [۵۳]. بنابراین استفاده از ساختارهای ساندویچی با تراکم حامل‌های

<sup>1</sup> Substrate

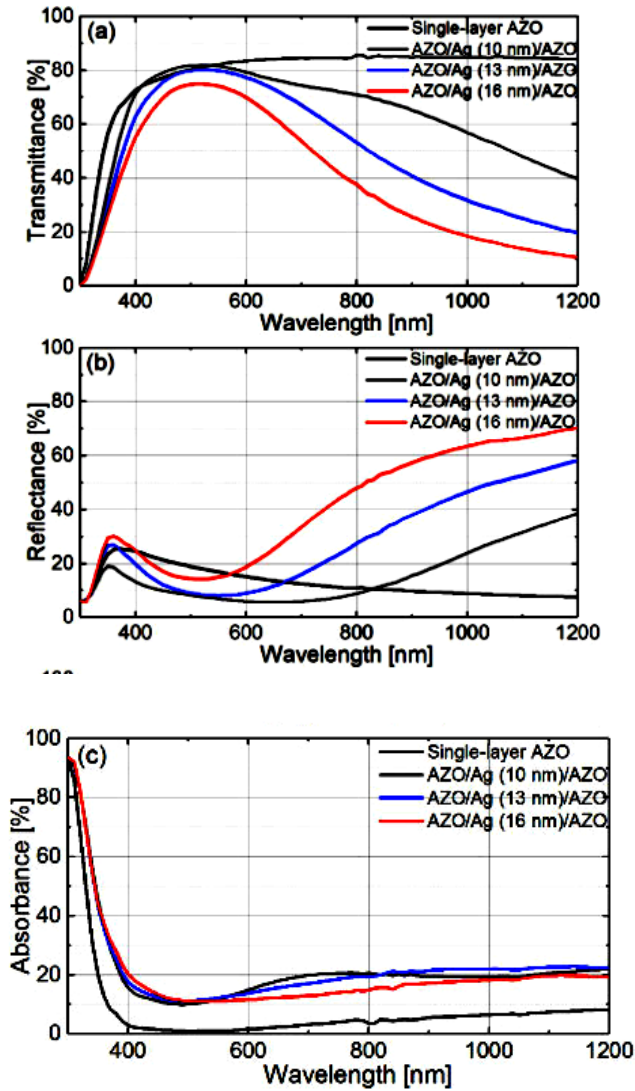
<sup>2</sup> phonon scattering

<sup>3</sup> Surface/interface

<sup>4</sup> grain boundary

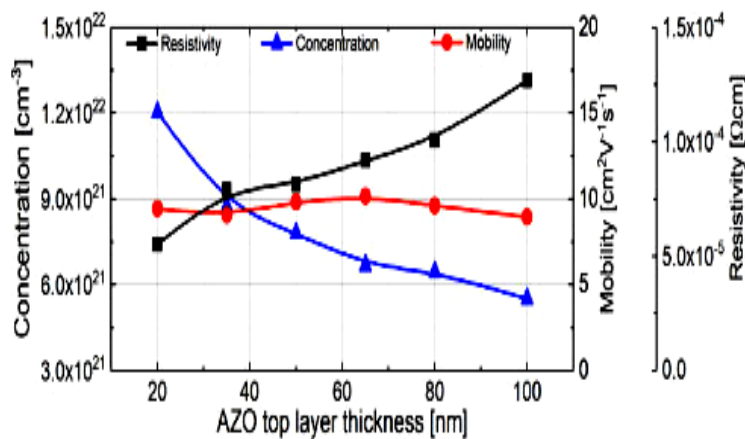
<sup>5</sup> ionised impurity

بیشتر، به بهبود تحرک پذیری می انجامد. اما محدوده فرسرخ نزدیک مستقیماً به جذب حامل‌های آزاد مربوط است، و کاهش شدیدی در میزان عبور در این محدوده مشاهده شد.



شکل ۲-۱۲ طیف عبور، بازتاب و جذب AZO/Ag/AZO با ضخامت‌های متفاوتی از لایه نقره

همچنین در این تحقیق ویژگی‌های الکتریکی نمونه‌ها با افزایش ضخامت لایه AZO بررسی شد (شکل ۲-۱۳). با افزایش ضخامت به دلیل کمتر شدن سهم لایه نقره در انتقال الکترون‌ها به لایه AZO، تراکم حامل‌ها کاهش و مقاومت الکتریکی به شدت افزایش یافت.



شکل ۲-۱۳ نمودار تراکم حامل‌ها و مقاومت الکتریکی برای ضخامت‌های

متفاوتی از لایه AZO

همچنین نتایج آزمون تعیین مقاومت الکتریکی کاهش حدود ۵-۱۰ درصدی مقاومت الکتریکی بعد از بازپخت را نشان داد. تحرک پذیری پوشش نیز با بازپخت نمونه تا دمای ۲۰۰ درجه افزایش و سپس با افزایش بیشتر دمای بازپخت کاهش یافت. اما به طور کلی نمونه‌ها، پایداری حرارتی مناسبی در بازپخت تا دمای ۳۵۰ درجه به مدت ۱۰ دقیقه نشان دادند.

در جدیدترین پژوهش‌های انجام شده به بررسی مواد الکتروکرومیک نانوساختار پلیمری با گزینش نور مرئی و حذف طیف فرورسرخ نزدیک پرداخته شده است [۵۴]. در این تحقیق کلاسی از مواد الکتروکرومیک هیبریدی با استفاده از نانوذرات polythiophenes و ITO که هریک مستقلاً طیف مرئی و فرورسرخ نزدیک را تنظیم می‌کنند، بررسی شده‌است. با تغییر ولتاژ اعمالی به الکترودهایی که عملکردشان با این کامپوزیت اصلاح شد، سه حالت " روشن و گرم "، " روشن و سرد " و " تاریک و سرد " با تغییر عبور طیف خورشیدی ایجاد و پنجره‌های هوشمند با کنترل گرما و نور مرئی پیشنهاد شد.

همچنین درصد کنتراست این سیستم‌های کامپوزیت در طیف مرئی (۷۰۰ نانومتر) حدود ۴۷٪ و در طیف فروسرخ (۱۲۵۰ نانومتر) حدود ۳۹٪ به دست آمد. اما بعد از ۲۰۰ سیکل این کنتراست ۱۵ تا ۲۰٪ کاهش یافت.

امروزه، فیلم‌های نازک اکسید روی ZnO به دلیل ویژگی‌های متنوع و منحصر به فرد خود مورد توجه زیادی در کاربردهای مختلف ابزارهای اپتوالکترونیک به عنوان اکسید رسانای شفاف قرار گرفته است. این ماده در ال.ای.دی‌ها [۵۵]، سنسورهای اپتیکی، سلول‌های خورشیدی [۵۶] و نمایشگرهای تخت و انعطاف‌پذیر [۵۷] مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در پژوهشی، تغییر در ویژگی‌های فیزیکی لایه ZnO با تغییر دمای بازپخت برای زیرلایه شیشه و زیرلایه ITO با روش اسپاترینگ بررسی شد [۵۸]. نمودار عبور و جذب نمونه در دمای اتاق و بازپخت در دماهای مختلف نشان داد، فیلم‌های نازک ZnO جذب بسیار کم در محدوده مرئی و جذب زیاد در محدوده فرابنفش دارد. طیف جذب با بازپخت به کندی کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد گذار از تراز یون‌های بخشنده<sup>۱</sup> به تراز رسانش در طول موج‌های بلندتر اتفاق افتاده است، در حالی که گذار از تراز ظرفیت به تراز رسانش در طول موج‌های کوتاه‌تر مشاهده می‌شود. همچنین ضریب خاموشی بعد از بازپخت در دماهای پایین (۱۵۰ تا ۴۵۰ درجه) با کاهش جذب، کاهش یافت. درحالی که ضریب شکست با افزایش همراه بود. از طرف دیگر بهبود بلورینگی و نظم بیشتر ساختار نمونه بازپخت شده منجر به کاهش گاف انرژی شده است.

با توجه به اینکه ZnO در کاربردهای اپتوالکترونیک باید همراه با دیگر اکسیدهای فلزی و فلزات مناسب به کار رود. به طور خاص استفاده از نقره به دلیل رسانندگی زیاد و شفاف بودن لایه‌های نانومتری این پوشش همراه با ZnO و دیگر دی‌الکتریک‌ها در بسیاری از تحقیقات مورد توجه بوده است [۶۱-۶۶].

---

<sup>1</sup> ionized donor



مطالعات نشان داد، وقتی یک لایه فلزی بین دو لایه دی‌الکتریک قرار می‌گیرد، مقدار زیادی از بازتاب فلزی در محدوده مرئی کاسته شده و امکان ایجاد پوشش‌هایی با طیف عبور و بازتاب گزینشی را فراهم می‌کند [۶۷-۷۲].

البته این لایه فلزی در ساختارهای چند لایه باید بسیار نازک، یکنواخت و پیوسته باشد تا الزامات ضریب عبور زیاد و مقاومت الکتریکی کم را برآورده کند [۷۳-۷۶].

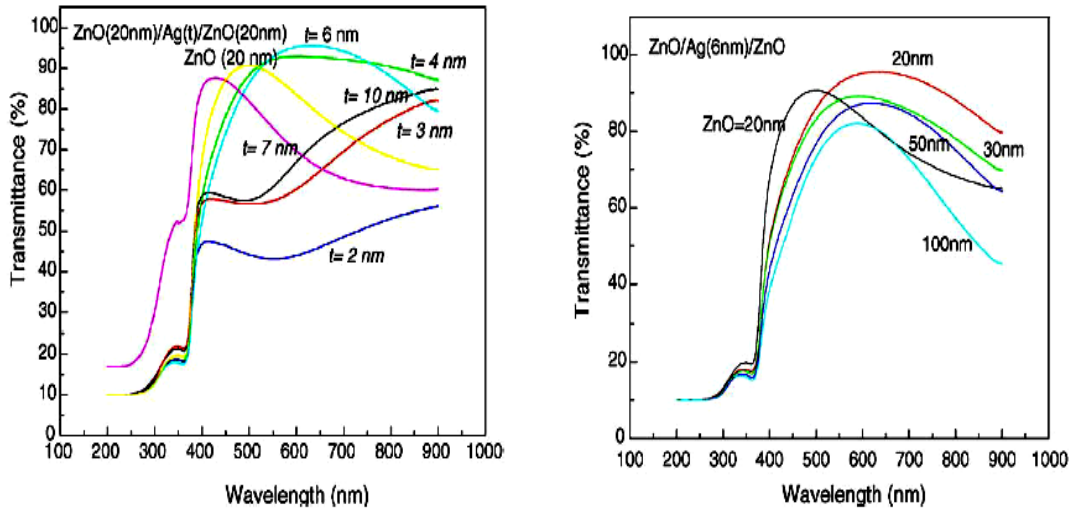
یکی از کاربردهای پوشش‌های دی‌الکتریک/فلز/دی‌الکتریک، در شیشه‌های کم‌گسیل می‌باشد [۷۵].

در مقاله دیگری ساختار فیلم نازک نقره به صورت تابعی از فشار اکسیژن در پوشش کم‌گسیل glass/ZnO/Ag بررسی شد [۷۶]. نتایج این تحقیق نشان داد، فیلم نقره با سطحی نرم، بلورینگی مناسب و مقاومت الکتریکی کم، روی لایه ZnO با فشار اکسیژن کمتر گزارش شده است.

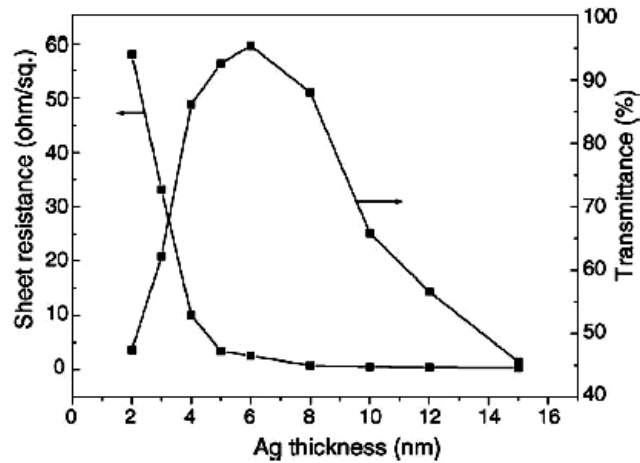
جذب نور مرئی در پوشش کم‌گسیل با کاهش مقاومت الکتریکی و زبری سطح کاهش می‌یابد. این کاهش به تحریک کمتر پلاسمون‌های سطحی در سطوح نرمتر نسبت داده شد.

همچنین ویژگی‌های الکتریکی و اپتیکی فیلم‌های ZnO/Ag/ZnO روی زیر لایه شیشه و PET با روش اسپاترینگ و درصد جزئی گاز اکسیژن مطالعه شد [۷۷]. در این تحقیق طیف عبور مرئی فیلم‌ها به شدت تحت تاثیر مورفولوژی لایه نقره ناشی از درصد گاز اکسیژن به دست آمد. وقتی مقدار ۳٪ گاز اکسیژن هنگام لایه‌نشانی لایه نقره وارد اتاقک شد، پیک عبور مرئی نمونه حدود ۱۰٪ نسبت به نمونه لایه‌نشانی شده با گاز آرگون افزایش یافت. در حالیکه افزایش کمی در مقاومت الکتریکی این نمونه مشاهده شد.

پارامترهای الکتریکی و اپتیکی فیلم‌های ZnO/Ag/ZnO با ضخامت‌های مختلف نقره و ZnO با لایه‌نشانی به روش اسپاترینگ برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی (DSSC<sup>1</sup>) مقایسه شدند [۷۸]. با افزایش ضخامت ZnO افزایش پراکندگی و کاهش عبور به دلیل افزایش زبری سطح مشاهده شد.



شکل ۲-۱۴ نمودار طیف عبور از فیلم‌های ZnO/Ag/ZnO برای ضخامت‌های مختلف ZnO و Ag

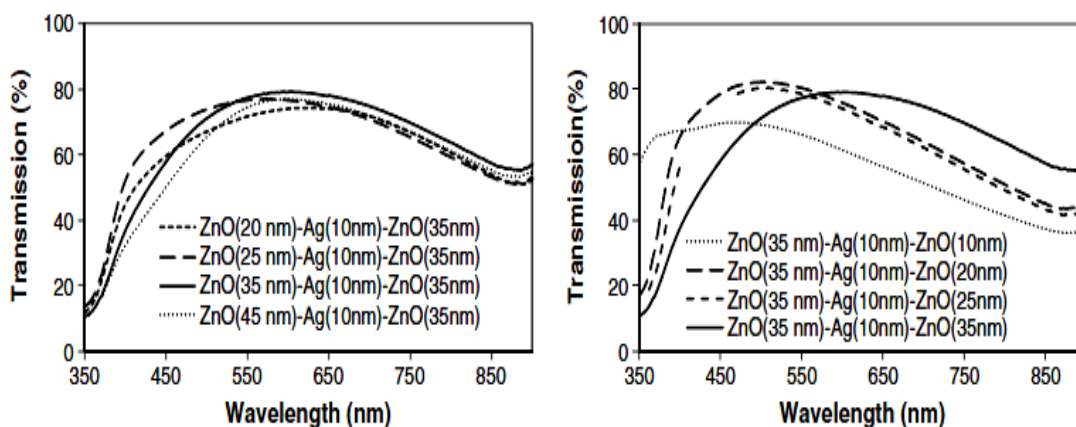


شکل ۲-۱۵ پارامترهای اپتیکی و الکتریکی ZnO(20 nm)/Ag/ZnO(20 nm) با تغییر ضخامت نقره

<sup>1</sup> dye sensitized solar cells

همان‌طور که در شکل ۲-۱۵ مشاهده می‌شود، با کاهش بیشتر ضخامت نقره، به دلیل جذب ناشی از لایه آگلومره نقره، عبور مرئی کاهش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رود در ضخامت بسیار کم لایه نقره، مقاومت سطحی به شدت افزایش می‌یابد.

در مقاله دیگر، بهینه ضخامت فیلم‌های ZnO/Ag/ZnO با روش اسپاترینگ برای کاربرد ابزارهای اپتوالکترونیکی به دست آمد [۷۹]. در این مطالعه، نقش ضروری لایه زیری ZnO برای کاهش بازتاب نور مرئی از لایه نقره مطرح شد. به طوری که بدون این لایه، ضریب عبور مرئی ۳۰٪ کاهش می‌یابد. این کاهش به رزونانس‌های پلاسمون در دانه‌های نقره نسبت داده شد [۸۰]. همچنین با افزایش ضخامت لایه بالایی ZnO پیک عبور مرئی، شیفت قرمز نشان داد (شکل ۲-۱۶). این پهن‌شدگی گستره عبور مرئی با اثرات پلاسمون‌های سطحی جایگزیده در نانوذرات فلزی متراکم توصیف شد. در واقع به دلیل ابعاد فوق نازک لایه فلزی، برهمکنش نور-ماده می‌تواند به پدیده رزونانس پلاسمون بیانجامد.

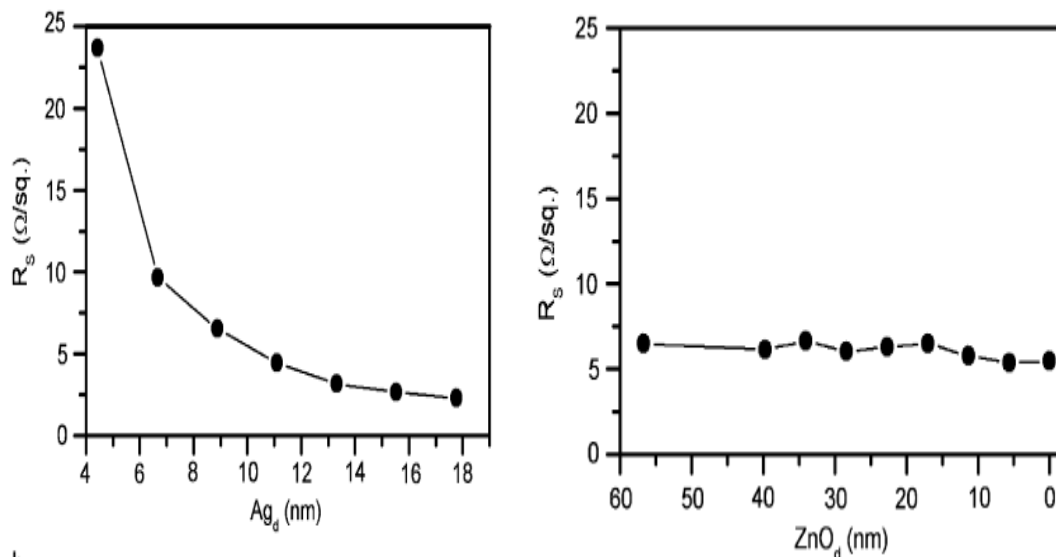


شکل ۲-۱۶ طیف عبور ZnO/Ag/ZnO با تغییر ضخامت لایه زیری و بالایی ZnO

همچنین تاثیر تغییر ضخامت لایه ZnO و نقره در ویژگی‌های اپتیکی و الکتریکی ZnO/Ag/ZnO با تارگت Zn و لایه نشانی به روش اسپاترینگ DC در تحقیق دیگری بررسی شد

[ ۸۱ ]. بررسی مقاومت الکتریکی این لایه‌ها نشان داد با افزایش ضخامت لایه نقره، مقاومت سطحی

کاهش یافته، اما مقاومت سطحی نمونه‌ها با تغییر ضخامت لایه ZnO تغییر محسوسی نشان نداد.

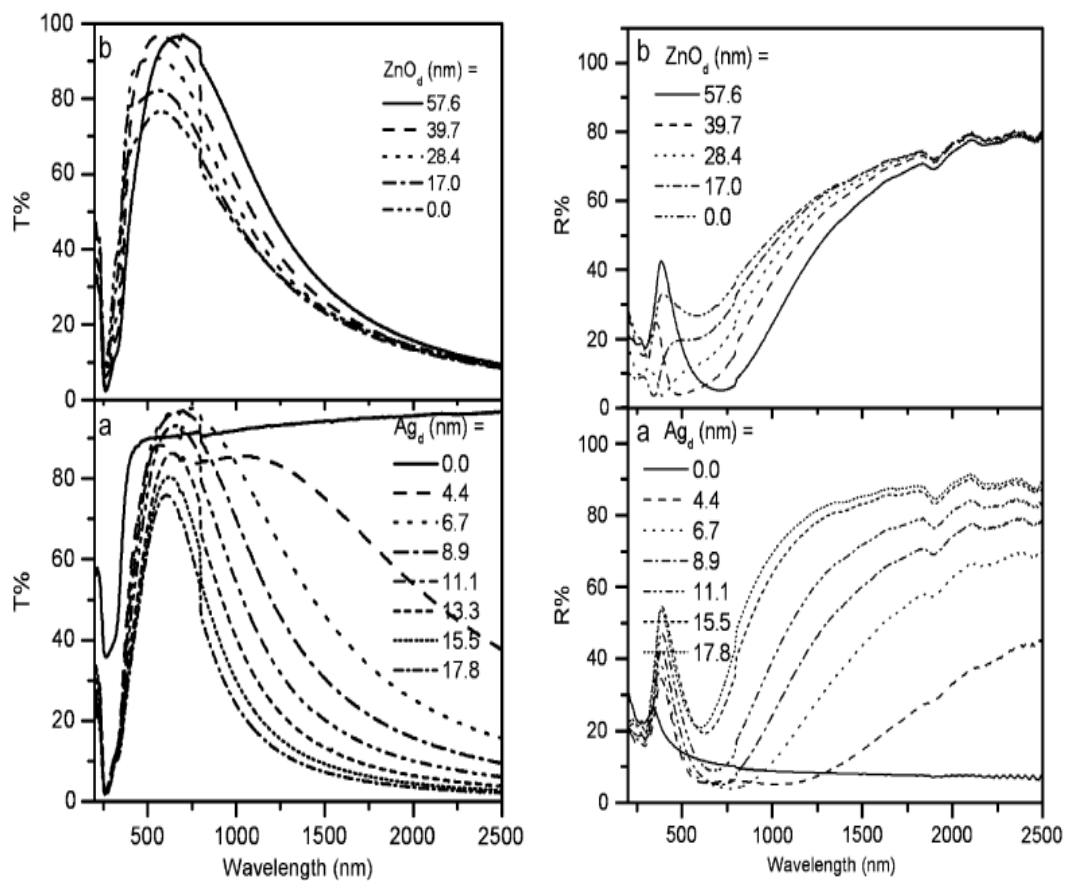


شکل ۲-۱۷ مقاومت سطحی ZnO/Ag/ZnO با تغییر ضخامت لایه نقره و ZnO

با مطالعه طیف عبور و بازتاب فیلم‌ها مشخص شد، با افزایش ضخامت نقره، عبور از فیلم در هر دو محدوده مرئی و فروسرخ کاهش می‌یابد. کاهش در طیف فروسرخ به افزایش بازتاب ناشی از الکترون‌های آزاد لایه نقره نسبت داده شد. همچنین با افزایش ضخامت نقره، لبه جذب به طول موج‌های بلندتر شیفت پیدا کرد. در ضخامت‌های کم لایه نقره کاهش عبور در طیف مرئی به دلیل پراکندگی ناشی از لایه جزیره‌ای نقره بود.

اما طیف عبور از فیلم‌ها با کاهش ضخامت لایه ZnO کاهش یافت و لبه جذب فیلم‌ها به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر شیفت پیدا کرد (شکل ۲-۱۸).

در این مطالعه با افزایش ضخامت نقره، از گاف انرژی کاسته شد. این کاهش با ایجاد نواقص در فیلم که منجر به تولید حالت‌های جایگزیده در گاف نواری می‌گردد، توصیف شد. اما وجود تنش در فیلم برای ضخامت‌های کمتر لایه ZnO، موجب افزایش گاف انرژی می‌گردد.



شکل ۱۸-۲ منحنی عبور و بازتاب از فیلم‌های ZnO/Ag/ZnO با تغییر ضخامت لایه نقره و ZnO



## فصل ۳

معرفی نرم افزار شبیه سازی **LBNL Window 7.1**  
برای تعیین ضریب انتقال حرارت شیشه پوشش دار

در این رساله برای انجام محاسبات مورد نیاز برای تعیین مقدار ضریب انتقال حرارت<sup>۱</sup> شیشه‌های پوشش‌دار کم‌گسیل با پوشش ZnO/Ag/ZnO از نرم‌افزار شبیه‌سازی LBNL Window 7.1 استفاده شد. ضریب بهره حرارت خورشید<sup>۲</sup> نیز با استفاده از همین نرم‌افزار به‌دست آمد. لازم است قبل از معرفی نرم‌افزار به تعریف پارامترهای مورد استفاده در آن بپردازیم.

### ۱-۳ تعاریف

#### ضریب انتقال حرارت<sup>۳</sup>

این ضریب میزان انتقال حرارت، از واحد سطح یک عنصر ساختمانی (یک متر مربع)، ناشی از اختلاف دمای هوای دو طرف جدار (شیشه) را نشان می‌دهد. واحد بین‌المللی آن وات بر مترمربع کلوین ( $W/m^2.K$ ) است. هر چه میزان این ضریب کمتر باشد، عملکرد حرارتی شیشه، در شرایطی که اختلاف دمای هوای داخل و خارج ساختمان قابل توجه است، بهتر خواهد بود. مقاومت حرارتی<sup>۴</sup>، عکس ضریب انتقال حرارت می‌باشد.

#### ضریب هدایت حرارت<sup>۵</sup>

این ضریب مقدار حرارتی است که در واحد زمان (یک ثانیه) از واحد سطح (یک متر مربع) عنصری همگن به ضخامت واحد (یک متر)، در حالت پایدار، می‌گذرد، در زمانی که اختلاف دمای دو

---

<sup>1</sup> Thermal transmittance

<sup>2</sup> SHGC

<sup>3</sup> U-Value

<sup>4</sup> R-Value

<sup>5</sup> Thermal conductivity



سطح طرفین عنصر برابر واحد دما (یک درجه کلونین) است. واحد ضریب هدایت حرارت [W/m.K] است.

### ضریب بهره حرارتی خورشیدی<sup>۱</sup>

ضریب بهره حرارتی خورشیدی، بخشی (درصدی) از انرژی حرارتی خورشید است که از شیشه عبور می‌کند. مقدار این ضریب بین صفر و یک است. هر چه میزان این ضریب کمتر باشد، حرارت کمتری در اثر تابش خورشید به داخل ساختمان راه می‌یابد. در واقعیت، این ضریب هیچ زمانی به یک نمی‌رسد، و هر چه ضخامت شیشه بیشتر و شفافیت آن کمتر شود، از میزان حداکثر بیشتر فاصله می‌گیرد. به این منظور، در بعضی مواقع این ضریب را با ضریب یک شیشه ۳ میلی‌متر مقایسه و از ضریب سایه‌اندازی استفاده می‌کنند. نسبت ضریب بهره حرارتی خورشیدی هر نوع شیشه بر ضریب بهره حرارتی خورشیدی شیشه ۳ میلی‌متر ساده (۰/۸۷) را ضریب سایه‌اندازی<sup>۲</sup> می‌نامند. در اینجا باید به این نکته اشاره کرد که ضریب بهره حرارتی یا ضریب سایه‌اندازی به پارامترهای متعددی بستگی دارد که اهم آنها عبارتند از:

- ضخامت قاب پنجره‌ای که شیشه تک جداره یا چندجداره در آن قرار می‌گیرد،

- زاویه برخورد تابش مستقیم خورشید با سطح شیشه،

- وجود یا عدم وجود سایه‌بان خارجی (افقی یا قائم) یا کرکره

### ضریب عبور نور مرئی<sup>۳</sup>

---

<sup>1</sup> Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)-Solar Factor (SF)

<sup>2</sup> Shading Coefficient (SC)

<sup>3</sup> Visible Transmittance

این ضریب نیز سهمی از نور مرئی است که از پنجره گذر می‌کند. مقدار این ضریب هم بین صفر و یک است. هر چه میزان این ضریب بیشتر باشد، روشنایی طبیعی بیشتری در اثر تابش خورشید به داخل ساختمان راه می‌یابد.

### ضریب انعکاس (بازتاب)<sup>۱</sup>

این ضریب، درصدی از نور یا انرژی خورشیدی است که از سطح شیشه منعکس می‌شود.

### ضریب جذب<sup>۲</sup>

این ضریب، درصدی از انرژی خورشیدی است که نه به فضای داخل منتقل می‌شود و نه بازتابیده می‌شود، بلکه توسط سطح شیشه جذب و به حرارت تبدیل می‌گردد. بخشی از حرارت جذب شده به فضای داخل تابیده می‌شود.

### گزینندگی شیشه<sup>۳</sup>

این ضریب نسبت ضریب عبور نور مرئی به ضریب بهره حرارتی خورشیدی است. بازه تغییرات این ضریب، بسته به نوع شیشه و پوشش آن، بین ۱ و ۳ است. هر چه این ضریب بیشتر باشد، به این معناست که میزان نور مرئی بیشتری، در مقایسه با حرارت عبور کرده از شیشه، قابل دستیابی است. این نوع شیشه‌ها برای مناطق گرمسیر مناسب است، زیرا اجازه می‌دهد روشنایی طبیعی به داخل ساختمان وارد شود، بدون این‌که باعث گرم شدن بیش از حد فضای داخل شود.

### شیشه چندجداره

مجموعه شیشه چندجداره استاندارد با اتصال دو یا تعداد بیشتری شیشه تک‌جداره که به‌طور موازی نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند ساخته می‌شود. اصل و اساس مجموعه شیشه چند جداره بر

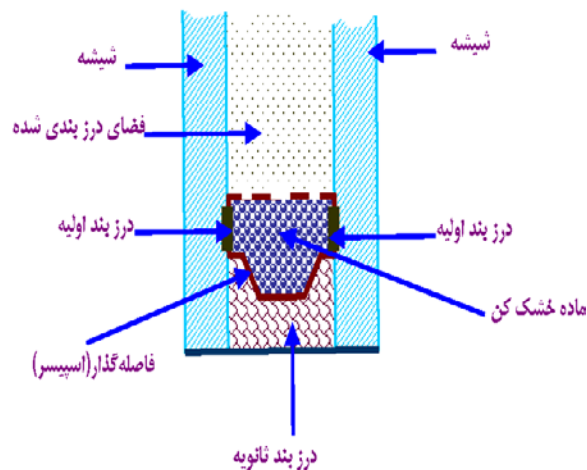
---

<sup>1</sup> Reflectance

<sup>2</sup> Absorptance

<sup>3</sup> Selectivity

مبنای ایجاد فضایی پر شده از هوای خشک یا یک گاز مخصوص بین دو یا تعداد بیشتری صفحات شیشه‌ای بنا شده است. در شکل ۱-۳ اجزای تشکیل دهنده یک مجموعه شیشه دو جداره نشان داده شده است.



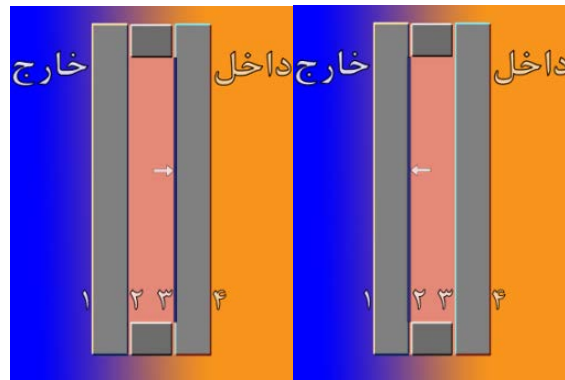
شکل ۱-۳ اجزای تشکیل دهنده نمونه‌ای از مجموعه شیشه‌های دو جداره

شیشه چندجداره از چندلایه شیشه، جدا کننده آلومینیومی، گاز پرکننده، چسب‌های اولیه و ثانویه و رطوبت گیر تشکیل می‌شود. با انتخاب صحیح نوع شیشه برای هر لایه می‌توان از ویژگی‌های انواع شیشه به‌طور همزمان استفاده کرد.

### نحوه شماره گذاری جدارها

شماره گذاری سطح شیشه، با توجه به کاربرد شیشه دوجداره پوشش دار اهمیت زیادی دارد. در حالت کلی شماره گذاری از سطح بیرونی شیشه مجاور هوای بیرون شروع می‌شود. محل قرارگیری سطح پوشش دار شیشه‌ها در جدار نور گذر برای هر اقلیم، متفاوت می‌باشد. در اقلیم سرد، به منظور افزایش انتقال انرژی خورشید به داخل ساختمان و کاهش اتلاف گرمای داخل ساختمان به بیرون، شیشه‌های پوشش دار به گونه‌ای قرار می‌گیرند که سطح پوشش دار شیشه، سومین سطح جدار نور گذر را تشکیل دهد. اما، در اقلیم گرم به منظور کنترل نور خورشید، جهت محدود کردن انتقال انرژی

خورشید به داخل ساختمان، دومین سطح جدار نورگذر به عنوان سطح پوشش دار شیشه در نظر گرفته می شود (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳ محل قرارگیری پوشش کنترل کننده نور خورشید در یک مجموعه شیشه دو جداره در منطقه سردسیر (سمت چپ) و گرمسیر (سمت راست)

### ۲-۳ پارامترهای موثر در محاسبه ضریب انتقال حرارت شیشه

ضریب انتقال حرارت، نرخ انرژی عبوری از شیشه از طریق رسانش، تابش و همرفت را نشان می دهد. هرچه مقدار این ضریب کمتر باشد، مقاومت حرارتی شیشه بیشتر و عملکرد حرارتی آن بهتر است. یک شیشه تک جداره بدون پوشش، ضریب انتقال حرارتی معادل  $6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  دارد که این عدد ۴ برابر بیشتر از یک دیوار جایگزین می باشد. راحت ترین راه برای جلوگیری از انتقال حرارت از شیشه، ایجاد یک لایه هوا و استفاده از سیستم شیشه دو جداره به جای شیشه تک جداره می باشد. این روش تا حد امکان انتقال حرارت از طریق هدایت کاهش می یابد. به طوری که برای شیشه دو جداره با فاصله هوایی ۱۰ تا ۱۴ میلی متر، بین دو جدار شیشه مقدار  $U$  به حدود  $2/7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  می رسد. اما دیگر مکانیسم های انتقال حرارت از شیشه دو جداره، انتقال حرارت از طریق همرفت هوا در فاصله بین دو جدار شیشه و تابش گرمای فرسرخ از سطح شیشه می باشد. در این موارد اتلاف حرارتی از طریق همرفت با جایگزین کردن گازهای سنگین به جای هوای پر شده بین دو جدار کاهش می یابد. معمولاً استفاده از گازهای آرگون، کریپتون و زنون که از هوا سنگین تر است به عنوان گاز

پرکننده بین دوجدار شیشه پیشنهاد می‌شود، اما در ایران استفاده از گاز آرگون به دلیل قیمت و امکان دسترسی بیشتر متداول شده است. با این وجود، با استفاده از گازهای سنگین در سیستم شیشه دوجداره مقدار ضریب انتقال حرارت فقط  $0.1$  تا  $0.2$   $W/(m^2.K)$  کاهش می‌یابد.

اما برای کاهش انتقال حرارت از شیشه از طریق تابش، استفاده از شیشه پوشش‌دار کم‌گسیل یا کنترل‌کننده انرژی به عنوان راه حلی مطلوب در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که قبلاً هم بیان شد، استفاده از این پوشش‌ها با بازتاب طیف فروسرخ خورشید که مسئول گرم شدن محیط در معرض تابش می‌باشد، عبور، جذب و در نهایت گسیل از سطح را کاهش داده و کمک زیادی در صرفه‌جویی مصرف انرژی در ساختمان‌ها می‌کند.

برای ارزیابی تاثیر ضخامت نقره و اکسید روی بر عملکرد حرارتی شیشه پوشش‌دار کم‌گسیل که در این رساله به صورت پوشش‌های چندلایه، لایه‌نشانی شده است، پس از اندازه‌گیری پارامترهای اپتیکی و الکتریکی، داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی تأثیر استفاده از این شیشه‌ها در ساختمان در نرم افزار LBNL Window 7.1، اضافه و پارامترهای ضریب انتقال حرارت و ضریب بهره حرارتی خورشیدی برای تعیین عملکرد حرارتی این شیشه‌ها در اقلیم‌های مختلف تعیین گردید.

### ۳-۳ ورود داده‌های مورد نیاز نرم افزار

برای انجام شبیه‌سازی در محیط این نرم افزار از داده‌های ضریب عبور، ضریب بازتاب (از هر دو طرف شیشه، سطح پوشش‌دار  $reflectance\ front$  و سطح بدون پوشش  $reflectance\ back$ ) در طیف مرئی و خورشیدی و مقدار گسیلندگی نمونه‌های لایه‌نشانی شده در این رساله استفاده شده است. باید توجه داشت که برخلاف ضریب بازتاب، ضریب عبور از هر دو طرف پوشش‌دار بدون پوشش یکسان است.

برای شروع شبیه‌سازی با پوشش‌های لایه‌نشانی شده در این رساله با نرم افزار، ابتدا باید پارامترهای مربوط به شیشه، فاصله گذار، گاز پرکننده و پوشش مورد نظر را وارد لیست کتابخانه<sup>۱</sup> کرده و سپس با انتخاب شیشه مورد نظر در هر جدار، ضریب انتقال حرارت و ضریب بهره حرارتی خورشیدی شیشه دوجداره را محاسبه کنیم. در این رساله از شبیه‌سازی شیشه دوجداره متشکل از شیشه ساده به ضخامت ۶ میلی متر و شیشه پوشش‌دار به ضخامت ۴ میلی متر با پوشش‌های لایه‌نشانی شده در آزمایشگاه با فاصله گذار ۱۲ میلی متر که فاصله بین دو شیشه با گاز آرگون پر شده بود، استفاده کردیم. در شکل زیر برکه مربوط به مشخصات هر دو شیشه نشان داده شده است. همچنین همان‌طور که در شکل ۳-۳ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب عبور و بازتاب در هر سه بخش طیف مرئی<sup>۲</sup>، خورشیدی<sup>۳</sup> و فروسرخ دور<sup>۴</sup> به صورت جداگانه محاسبه و جایگزین شده است. نحوه محاسبه ضریب عبور و بازتاب در هر بخش از طیف فوق و همچنین روش محاسبه گسیلندگی حرارتی در فصل بعد شرح داده شده است. لازم به ذکر است، مقدار ضریب هدایت حرارت برای شیشه مطابق مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان  $1,0 \text{ W/m.K}$  محاسبه شده است. با توجه به اینکه شیشه تابش فروسرخ دور را از خود عبور نمی‌دهد، مقدار این ضریب در جدول زیر صفر است. گسیلندگی سطح شیشه بدون پوشش نیز در نرم افزار برابر  $0,84$  در نظر گرفته شده است.

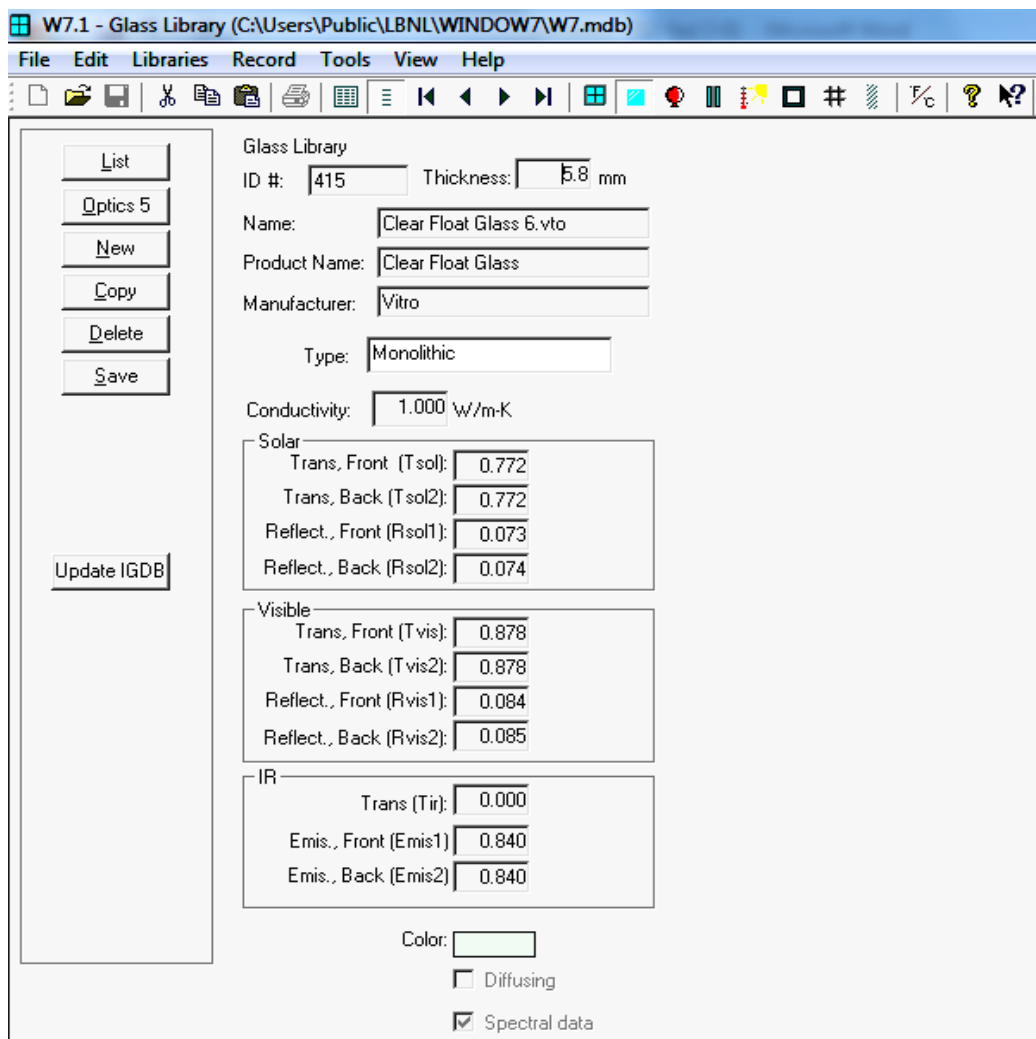
---

<sup>1</sup> Libraries

<sup>2</sup> visible

<sup>3</sup> solar

<sup>4</sup> IR



شکل ۳-۳ برگه مشخصات شیشه در Glass Library

نظر به اینکه این نرم افزار برای بسیاری از مصرف کنندگان شیشه پوشش دار و ممیزان انرژی مورد استفاده قرار می گیرد، مشخصات پوشش های مطرح برای محصولات تولیدی بسیاری از تولیدکنندگان بزرگ شیشه های پوشش دار در Glass Library نرم افزار موجود است.

W7.1 - Glass Library (C:\Users\Public\LBNL\WINDOW7\W7.mdb)

File Edit Libraries Record Tools View Help

Detailed View

Calc

New

Copy

Delete

Find

ID

Advanced...

4267 records found.

Import

Export

Report

Print

Update IGDB

NFRC only

ID	Name	ProductName	Manufacture	Source	Mode	Color	Thickness	Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2	Tir	emis1	emis2	Cond	
							mm										W/m-K	
25410	SBz50_090PVB_CL	5mmSBz50_090PVB_5m	PPG	Indus	IGDB	v27	#	11.660	0.264	0.247	0.224	0.542	0.071	0.083	0.000	0.840	0.840	0.585
25411	SBz50_075VAN_CL	6mmSBz50_075SolutiaVc	PPG	Indus	IGDB	v27	#	13.211	0.245	0.223	0.224	0.502	0.067	0.080	0.000	0.840	0.840	0.639
25412	SBz50_075VAN_0B	6mmSBz50_075SolutiaVc	PPG	Indus	IGDB	v27	#	13.289	0.192	0.221	0.179	0.363	0.061	0.061	0.000	0.840	0.840	0.639
25413	SBz50_075VAN_AZ	6mmSBz50_075SolutiaVc	PPG	Indus	IGDB	v27	#	13.289	0.147	0.221	0.054	0.388	0.062	0.065	0.000	0.840	0.840	0.639
25414	SBz50_090PVB_AZ	5mmSBz50_090PVB_5m	PPG	Indus	IGDB	v27	#	11.660	0.171	0.245	0.059	0.437	0.065	0.068	0.000	0.840	0.840	0.585
25415	SBz50_090PVB_AZ	6mmSBz50_090PVB_6m	PPG	Indus	IGDB	v27	#	13.609	0.152	0.221	0.055	0.400	0.063	0.066	0.000	0.840	0.840	0.609
25416	SBz50_060PVB_AZ	6mmSBz50_060PVB_6m	PPG	Indus	IGDB	v27	#	12.847	0.154	0.221	0.056	0.402	0.063	0.066	0.000	0.840	0.840	0.689
25420	SBR100STR_090S	6mmSBR100Starphire_0C	PPG	Indus	IGDB	v27	#	13.619	0.194	0.578	0.408	0.438	0.286	0.109	0.000	0.840	0.840	0.609
25421	SBR100STR_060S	6mmSBR100Starphire_0C	PPG	Indus	IGDB	v27	#	12.703	0.196	0.579	0.433	0.442	0.286	0.110	0.000	0.840	0.840	0.689
25422	SBR100STR_090P	6mmSBR100Starphire_0C	PPG	Indus	IGDB	v27	#	13.609	0.194	0.578	0.405	0.443	0.286	0.110	0.000	0.840	0.840	0.609
25423	SBR100STR_060P	6mmSBR100Starphire_0C	PPG	Indus	IGDB	v27	#	12.847	0.196	0.579	0.431	0.445	0.286	0.111	0.000	0.840	0.840	0.689
25424	SBR100CLR_090S	6mmSBR100Clear_090D	PPG	Indus	IGDB	v27	#	13.619	0.172	0.415	0.282	0.417	0.278	0.109	0.000	0.840	0.840	0.609
25425	SBR100CLR_060S	6mmSBR100Clear_060D	PPG	Indus	IGDB	v27	#	12.703	0.174	0.415	0.289	0.421	0.278	0.110	0.000	0.840	0.840	0.689
25426	SBR100CLR_090P	6mmSBR100Clear_090P	PPG	Indus	IGDB	v27	#	13.609	0.172	0.415	0.280	0.422	0.278	0.110	0.000	0.840	0.840	0.609
25427	SBR100CLR_060P	6mmSBR100Clear_060P	PPG	Indus	IGDB	v27	#	12.847	0.174	0.415	0.286	0.424	0.278	0.111	0.000	0.840	0.840	0.689
30000	WhiteFritDiffuseFron	White Frit Diffuse (front)	LBNL	CGDB	v.2			6.000	0.250	0.364	0.209	0.251	0.481	0.308	0.000	0.840	0.840	1.000
30002	WhiteFritSpecularFro	White Frit Specular (front)	LBNL	CGDB	v.2			6.000	0.044	0.030	0.050	0.067	0.026	0.049	0.000	0.840	0.840	1.000
30003	ClearFritDiffuseFront	Clear Frit Diffuse (front)	LBNL	CGDB	v.2			6.000	0.347	0.044	0.040	0.452	0.052	0.053	0.000	0.840	0.840	1.000
30004	ClearFritSpecularFro	Clear Frit Specular (front)	LBNL	CGDB	v.2			6.000	0.307	0.052	0.054	0.288	0.053	0.056	0.000	0.840	0.840	1.000
30010	Thermochromic1_24	Thermochromic1_24	LBNL	IGDB	Use			7.000	0.684	0.081	0.078	0.734	0.085	0.083	0.000	0.840	0.840	1.000
30020	Thermochromic2_24	Thermochromic2_24	LBNL	IGDB	Use			12.000	0.229	0.045	0.054	0.545	0.055	0.065	0.000	0.840	0.840	1.000
30030	Thermochromic3_22	Thermochromic3_22	LBNL	IGDB	Use			12.000	0.311	0.058	0.053	0.355	0.061	0.055	0.000	0.840	0.840	1.000
60000	1086Specular.lbl	Translucent Frit, Simulate	Unknown	CGDB	v.2			4.763	0.336	0.049	0.038	0.243	0.049	0.032	0.000	0.840	0.840	1.000
60001	1086Diffuse.lbl	Translucent Frit, Simulate	Unknown	CGDB	v.2			4.763	0.312	0.081	0.082	0.432	0.126	0.114	0.000	0.840	0.840	1.000
60002	948Specular.lbl	Viraspar(TM) Ceramic Frit	Unknown	CGDB	v.2			4.763	0.025	0.044	0.043	0.004	0.045	0.039	0.000	0.840	0.840	1.000
60003	948Diffuse.lbl	Viraspar(TM) Ceramic Frit	Unknown	CGDB	v.2			4.763	0.275	0.129	0.167	0.211	0.152	0.183	0.000	0.840	0.840	1.000

شکل ۳-۴ مشخصات شیشه‌های متداول و خاص تولیدکنندگان بزرگ شیشه موجود در Glass Library

همچنین با توجه به محدود بودن گزینه‌های انتخابی برای گاز پر شده بین دوجدار در شیشه

دوجداره برای کاربردهای ساختمانی، مشخصات مهم‌ترین و پرکاربردترین گازها در Gas Library

لیست شده است.



W7.1 - Gap Library (C:\Users\Public\LBNL\WINDOW7\W7.mdb)

File Edit Libraries Record Tools View Help

Gap Library (C:\Users\Public\LBNL\WINDOW7\W7.mdb)

ID	Name	Type	Conductivity W/m-K	Viscosity kg/m-s	Cp J/kg-K	Density kg/m <sup>3</sup>	Prandtl	Conductance W/m <sup>2</sup> K
1	Air	Pure	0.024070	0.000017	1006.103271	1.292490	0.7197	
2	Argon	Pure	0.016348	0.000021	521.929016	1.782271	0.6705	
3	Krypton	Pure	0.008663	0.000023	248.091003	3.738719	0.6718	
4	Xenon	Pure	0.005160	0.000021	158.339996	5.857921	0.6543	
6	Air (5%) / Argon (95%) Mix	Mix	0.016703	0.000021	539.729614	1.757782	0.6732	
7	Air (12%) / Argon (22%) / Krypton (66%)	Mix	0.011490	0.000023	322.703613	3.014753	0.6403	
8	Air (5%) / Krypton (95%) Mix	Mix	0.009190	0.000023	261.636536	3.616407	0.6641	
9	Air (10%) / Argon (90%) Mix	Mix	0.017062	0.000021	558.033142	1.733293	0.6758	
10	Vacuum-air P=0.001 (pr-1.5 ps-30)	Pure						0.054520
100	Air - EN673	Pure	0.024169	0.000017	1008.000000	1.292490	0.7138	
101	Argon - EN673	Pure	0.016345	0.000021	519.000000	1.782271	0.6674	
102	Krypton - EN673	Pure	0.008707	0.000023	245.000000	3.738719	0.6557	
103	Xenon - EN673	Pure	0.005119	0.000022	161.000000	5.857921	0.6771	
104	Air (5%) / Argon (95%) Mix - EN673	Mix	0.016705	0.000021	536.977966	1.757782	0.6700	
105	Air (12%) / Argon (22%) / Krypton (66%) - EN673	Mix	0.011531	0.000023	319.890289	3.014753	0.6291	
106	Air (5%) / Krypton (95%) Mix - EN673	Mix	0.009195	0.000023	261.670441	3.616407	0.6637	
107	Air (10%) / Argon (90%) Mix - EN673	Mix	0.017068	0.000021	555.463989	1.733293	0.6726	
200	CO2	Pure	0.014567	0.000014	827.734131	1.963496	0.7808	
201	N2	Pure	0.023969	0.000017	1040.794678	1.250106	0.7207	
202	SF6	Pure	0.013000	0.000014	418.600006	6.518219	0.4567	
203	Helium	Pure	0.146163	0.000019	5196.500000	0.178459	0.6645	
204	Neon	Pure	0.045399	0.000029	1030.400024	0.900326	0.6666	
205	Octofluoropropane	Pure	0.010686	0.000011	762.015320	8.388426	0.8140	

شکل ۳-۵ مشخصات گازهای متداول پرکننده بین دو جدار Gas Library

برای شروع محاسبه ضریب انتقال حرارت با نرم افزار سیستم شیشه دوجداره انتخاب می‌شود. سپس به انتخاب شیشه‌ها و فاصله‌گذار، با توجه به نوع پوشش و گاز پرکننده بین دو جدار می‌پردازیم. در این مرحله لازم است سطحی که پوشش بر روی آن قرار گرفته است، انتخاب گردد. با توجه به اینکه پوشش کم گسیل باید در سطوح داخلی سیستم شیشه دوجداره قرار بگیرد تا در معرض شرایط جوی یا شستشو و آلودگی نباشد، پوشش مورد نظر روی سطح ۲ یا ۳ انتخاب می‌شود. البته این

انتخاب فقط در محاسبه ضریب بهره حرارتی خورشیدی موثر است و در تعیین ضریب انتقال حرارت تاثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد.

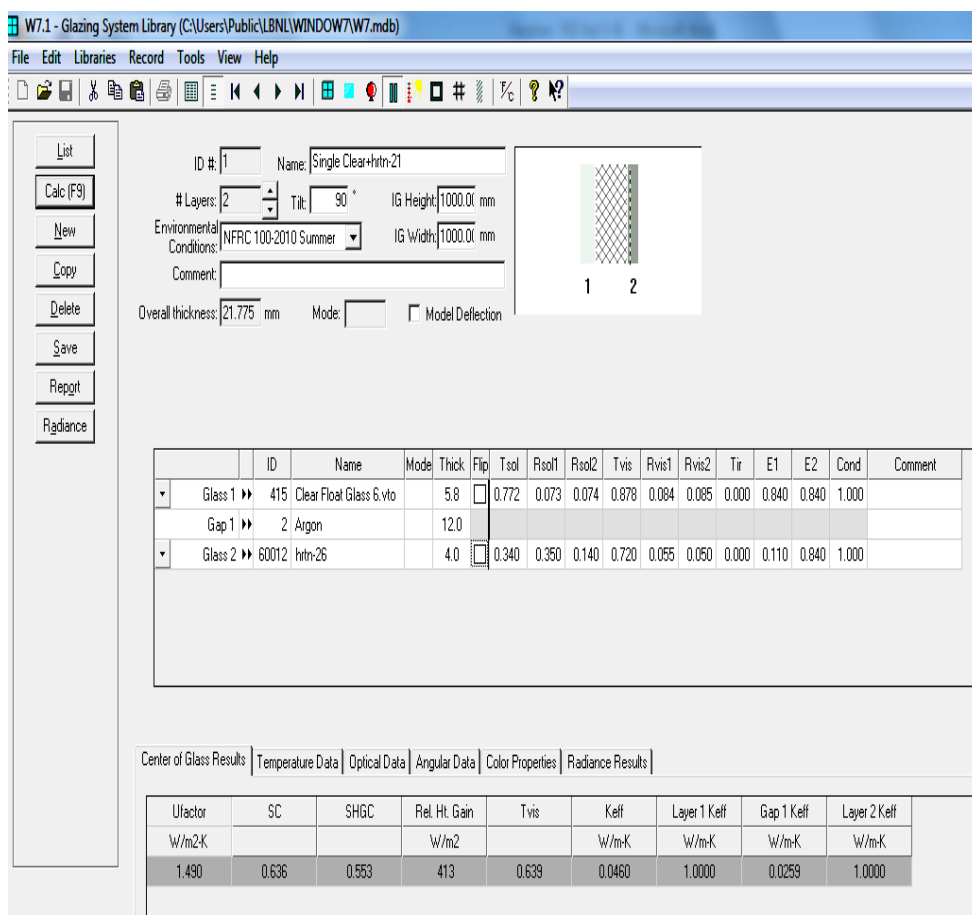
	ID	Name	Mode	Thick	Flip	Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2	Tr	E1	E2	Cond	Comment
▼	Glass 1	60012 htrn-26		4.0	<input checked="" type="checkbox"/>	0.340	0.140	0.350	0.720	0.050	0.055	0.000	0.840	0.110	1.000	
	Gap 1	2 Argon		12.0												
▼	Glass 2	415 Clear Float Glass 6.vlo		5.8	<input type="checkbox"/>	0.772	0.073	0.074	0.678	0.084	0.085	0.000	0.840	0.840	1.000	

Center of Glass Results								
Ufactor	SC	SHGC	Rel. Ht. Gain	Tvis	Keff	Layer 1 Keff	Gap 1 Keff	Layer 2 Keff
W/m <sup>2</sup> K			W/m <sup>2</sup>		W/m <sup>2</sup> K	W/m <sup>2</sup> K	W/m <sup>2</sup> K	W/m <sup>2</sup> K
1.490	0.495	0.430	324	0.639	0.0460	1.0000	0.0259	1.0000

شکل ۳-۶ محاسبه ضرایب انتقال حرارت و بهره حرارت خورشیدی برای پوشش انتخابی در سطح ۲

پس از انتخاب شیشه مناسب برای هر جدار، نوع گاز و فاصله بین دو جدار، ضریب انتقال حرارت، ضریب بهره حرارتی خورشیدی و ضریب سایه اندازی محاسبه می‌گردد. شکل ۳-۶ و شکل ۳-۷ محاسبه این ضرایب را برای یکی از نمونه‌های مورد بررسی در این رساله برای هر دو حالت پوشش روی سطح ۲ و سطح ۳ نشان می‌دهد.



شکل ۳-۷ محاسبه ضرایب انتقال حرارت و بهره حرارت خورشیدی برای پوشش انتخابی در سطح ۳

### ۳-۴ انواع شیشه Low-E و کاربرد آن‌ها

برای انتخاب شیشه‌های Low-E مناسب برای هر منطقه آب و هوایی باید به دو شاخص تعیین کننده ضریب انتقال حرارت (U) و ضریب بهره حرارتی خورشیدی (SHGC) توجه گردد.

ضریب انتقال حرارت کم شیشه‌های Low-E باعث می‌شود که این شیشه‌ها مقاومت حرارتی خوبی داشته باشند و تبادل حرارتی از طریق رسانش، همرفت و تابش فروسرخ کاهش یابد. اما شیشه‌های Low-E به خاطر تفاوت در بهره حرارت خورشیدی به چند دسته تقسیم می‌شوند که عبارتند از:

### ۳-۴-۱ شیشه Low-E با کسب حرارت خورشیدی بالا High-SHGC Low-E

این نوع شیشه Low-E، اتلاف حرارت را کاهش می‌دهند اما به حرارت خورشید اجازه عبور می‌دهند. در مناطقی که فصول سرد بیشتر از فصل‌های گرم هستند، پنجره‌هایی با این نوع شیشه‌ها مناسب‌ترند. عملکرد این شیشه‌ها در فصل زمستان بهتر از فصول دیگر است.

### ۳-۴-۲ شیشه Low-E با کسب حرارت خورشیدی متوسط Moderate-SHGC Low-E

این نوع شیشه‌ها اتلاف حرارت را کاهش می‌دهند و امکان کسب نور خورشید را در حد قابل قبولی فراهم می‌کنند، لذا برای هر دو منطقه سرد و گرم مناسب‌اند.

### ۳-۴-۳ شیشه Low-E با کسب حرارت خورشیدی پائین Low-SHGC Low-E

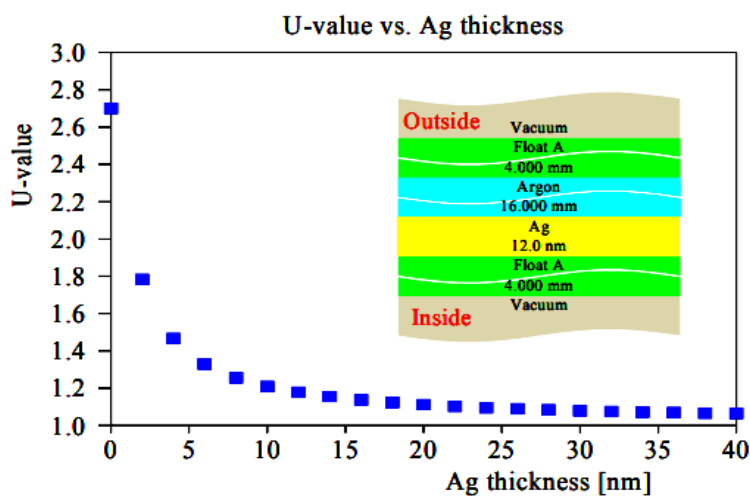
استفاده از این شیشه‌ها در مناطق گرمسیر ایده‌آل می‌باشند، چون عبور تابش حرارتی خورشید از شیشه را به شدت کاهش می‌دهد. شیشه‌های Low-E از این دسته‌اند که می‌توانند مانند شیشه رفلکس در رنگ‌های مختلف وجود داشته باشند و حتی می‌توانند مانند شیشه معمولی بدون رنگ باشند.

دو پارامتر مهم شیشه‌های کنترل‌کننده انرژی یعنی U-value و SHGC باعث می‌شود که این شیشه هم در تابستان و هم در زمستان عملکرد خوبی داشته باشد، در زمستان، پایین بودن ضریب انتقال حرارت باعث می‌شود انتقال گرمای ساختمان، خصوصاً در سردترین ساعات روز، کاهش یابد. در عین حال، پایین بودن مقدار ضریب کسب حرارت خورشیدی باعث می‌شود در تابستان عبور گرمای خورشید به ساختمان محدود شود. البته باید به این نکته اشاره کرد که کم بودن این ضریب امکان بهره‌گیری از گرمای خورشید در اوقات سرد سال را نیز کاهش می‌دهد که یک عملکرد منفی تلقی می‌گردد.

### ۵-۳ برخی پژوهش‌های انجام شده مربوط به تعیین عملکرد حرارتی پنجره‌ها

تا دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی، محاسبات عددی ساده برای تعیین میزان مصرف انرژی در ساختمان مورد استفاده قرار می‌گرفت [۸۲]. در این روش‌ها، ساده‌سازی سازوکار واقعی رفتار حرارتی ساختمان، امکان حل آنها را فراهم می‌کرد. به عنوان مثال، میزان کسب حرارت خورشیدی یا میزان انتقال حرارت تابشی میان سطوح از طریق امواج با طول موج بلند، در نمونه مدلسازی شده به صورت میزانی از افزایش دمای داخلی در نظر گرفته می‌شد و از این طریق به سادگی مورد تحلیل قرار می‌گرفت [۸۳]. پیشرفت‌های اخیر در زمینه روش‌های شبیه‌سازی و ابزارهای محاسباتی امکان انجام شبیه‌سازی‌های پیشرفته‌ای را ایجاد نموده است که در گذشته‌ی نه چندان دور امکان انجام آنها وجود نداشت.

در پژوهشی در آلمان به تاثیر شیشه‌های پوشش‌دار در ضریب انتقال حرارت پرداخته شد [۸۴]. در این تحقیق با شبیه‌سازی یک لایه نازک فلزی نقره روی جدار داخلی شیشه دوجداره بازتاب تابش فرورسرخ افزایش و جذب و در نتیجه گسیل از سطح کاهش یافت. منحنی مقدار ضریب انتقال حرارت شیشه با ضخامت نقره در شکل ۸-۳ نشان داده شده است.



شکل ۸-۳ ضریب انتقال حرارت شیشه دوجداره برحسب ضخامت نقره [۷۵]

همچنین در این تحقیق ضریب انتقال حرارت شیشه بدون پوشش حدود  $6.0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  با نرم افزار شبیه‌سازی به دست آمد. برای شیشه دوجداره با لایه هوایی به ضخامت ۱۰ تا ۲۰ میلی متر، این ضریب به  $2.7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  کاهش یافت.

عملکرد حرارتی شیشه‌های تک جداره و دوجداره و شیشه کم گسیل در پژوهشهای دیگری مورد مطالعه و تدوین قرار گرفت [۸۷-۸۹].

نتایج این پژوهشها شامل معادلاتی بود که می‌توانست برای تعیین ضریب کسب حرارت خورشیدی به کمک اندازه‌گیری غیرکالریمتری شده برای خصوصیات نوری اجزای پیچیده پنجره به کار رود.

در پژوهشی به مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت توسط دستگاه سیار و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و محاسبات عددی در نرم افزار پرداخته شد [۸۸]. این مطالعات بر روی چهار پنجره متفاوت صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهند هر چه تفاوت بین مقدار ضریب هدایت قاب پنجره و شیشه آن کمتر باشد، نتایج حاصل از اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی و دستگاه سیار و محاسبات عددی به هم نزدیکتر است. اما در صورتیکه ضریب هدایت قاب پنجره خیلی بیشتر از ضریب هدایت شیشه باشد، نتایج حاصل از محاسبات عددی و اندازه‌گیری توسط دستگاه سیار با هم مطابقت دارند اما با نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی متفاوت می‌باشند.

در نمونه‌ای از پژوهش‌ها که در آن از نرم‌افزار رایانه‌ای بهره گرفته شد، تأثیر سه نوع پنجره با شیشه دوجداره و پوشش کم گسیل بر میزان مصرف انرژی سالانه ساختمان مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت [۸۹].

نتایج نشان داد که کاربرد پنجره‌های با شیشه دوجداره و پوشش کم گسیل در ساختمان نمونه، به ترتیب به میزان ۶٪ کل مصرف انرژی ساختمان، و ۱۴٪ مصرف انرژی سرمایشی را کاهش می‌دهد.

در همین پژوهش، با مطالعه تأثیر این پنجره‌ها بر نور روز، مشاهده گردید که کاربرد آنها تأثیر منفی بر میزان ورود نور طبیعی به فضای داخل ندارد.

در مقاله‌ای ضریب عبور نور و انرژی خورشیدی و ضریب انتقال حرارت شیشه‌های پوشش‌دار موجود بررسی شد و تأثیر شیشه‌های الکتروکرومیک در هزینه‌های سرمایش و گرمایش اقلیم‌های مختلف در نظر گرفته شد [۹۰].

با توجه به اینکه متغیرهای زیادی مثل  $U$ -value، SHGC و  $T_{vis}$  در ویژگی‌های حرارتی و اپتیکی هر پنجره وجود دارد، انتخاب درست و مناسب یک پنجره برای جبهه‌های مختلف ساختمان در اقلیم‌های متفاوت نیاز به دقت، دانش و تخصص کافی در این زمینه دارد.





## فصل ۴

### بررسی فیزیکی نتایج با

مشخصه‌یابی لایه‌های فوق نازک نانوساختار لایه نشانی شده

نظر به اینکه ZnO یک نیمرسانای با گاف انرژی  $3.3 \text{ eV}$  است، فوتونهای با طول موج بیش از  $354$  نانومتر را عبور داده و در ناحیه مرئی و فروسرخ شفاف است. در این رساله لایه ZnO به عنوان اولین لایه، روی شیشه لایه‌نشانی شد تا از تاثیر نواقص روی شیشه در عملکرد لایه بسیار نازک نقره، صرف نظر شود. همچنین استفاده از ZnO به عنوان دی‌الکترونیک موجب شد، تعیین تاثیر ضخامت نقره در ویژگی‌های اپتیکی چند لایه‌ها در دو طیف مرئی و فروسرخ امکان پذیر گردد.

امروزه، فیلم‌های نازک اکسید روی، ZnO، به دلیل ویژگی‌های متنوع و منحصر به فرد خود در کاربردهای مختلف ابزارهای اپتوالکترونیک به عنوان اکسید رسانای شفاف، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. کاربرد این ماده در LEDها [۹۱]، سنسورهای اپتیکی [۹۲]، سلول‌های خورشیدی و نمایشگرهای تخت و انعطاف پذیر [۹۳] مورد مطالعه قرار گرفته است.

روش‌های مختلفی برای لایه‌نشانی و سنتز ZnO وجود دارد: CVD، لایه‌نشانی با لیزر پالسی، اسپری پایرولیز، سل-ژل، الکتروشیمیایی و مگنترون اسپاترینگ RF و DC، که از میان این روش‌ها اسپاترینگ به دلیل کنترل راحت و مناسب پارامترهای لایه‌نشانی، امکان کنترل ضخامت و کیفیت بالای لایه ایجاد شده، یکنواختی فیلم و چسبندگی خوب به عنوان بهترین روش لایه‌نشانی حتی در کاربردهای صنعتی در نظر گرفته می‌شود.

از طرفی ZnO در کاربردهای اپتوالکترونیک باید همراه با دیگر اکسیدهای فلزی و فلزات مناسب به کار رود. به طور خاص استفاده از نقره به دلیل رسانندگی زیاد و شفاف بودن لایه‌های نانومتری این پوشش همراه با ZnO و دیگر دی‌الکترونیک‌ها در بسیاری از تحقیقات مورد توجه بوده است [۹۶-۱۰۱] و لایه‌های بسیار نازک (با ضخامت حداکثر چند ده نانومتر) نقره یکی از مناسبترین رساناهای الکترونیک برای کاربردهای اپتوالکترونیک و صفحات نمایشی است.

اما از آنجا که لایه‌های بسیار نازک فلزی در شرایط محیطی پایدار نیستند، معمولاً یک لایه نازک از دی‌الکتریک‌ها روی لایه فلزی لایه‌نشانی می‌گردد تا هم از اکسیداسیون لایه فلزی جلوگیری شود و هم ویژگی‌های اپتیکی لایه فلزی بهبود یابد.

بنابراین، در کاربردهای خاص، از چندلایه‌ها برای به دست آوردن خواص بهینه پوشش استفاده می‌شود. معمولاً چندین لایه دی‌الکتریک مناسب با کاربرد مورد نظر به عنوان لایه زیری و رویی نقره لایه‌نشانی می‌شوند. در بسیاری از گزارش‌های تحقیقاتی ویژگی‌های اپتیکی و الکتریکی چند لایه‌های بسیار نازک با شرایط لایه‌نشانی متفاوت بررسی شده‌اند. در کلیه گزارش‌ها تغییر نانوساختارها به میکروساختار هنگام سنتز لایه‌ها، دلیل اصلی تغییر ثابت‌های اپتیکی وابسته به ضخامت عنوان شده است. نظر به اینکه ساختار فیلم به شرایط سنتز هم بستگی دارد، مقالات بسیار زیادی برای شرایط لایه‌نشانی مختلف با آرایش‌های متنوعی از لایه‌های متفاوت در دماهای کم یا زیاد هنگام سنتز یا تغییر دمای بازپخت لایه‌ها برای بسیاری از ترکیبات دی‌الکتریک/فلز/دی‌الکتریک وجود دارد [۱۰۶-۱۰۲].

همچنین مورفولوژی لایه‌ها با زیرلایه‌های مختلف روی ویژگی‌های فیلم‌های نازک تاثیر می‌گذارد. علاوه بر این مطالعاتی نیز روی تاثیر گاز اکسیژن در لایه‌نشانی نقره و ارتباط بین ضریب عبور اپتیکی، زبری سطوح و رسانندگی آن انجام شده است [۱۱۱-۱۰۷].

در بسیاری از مقالات تاثیر لایه‌های متفاوتی از دی‌الکتریک شفاف زیر و روی لایه نقره روی معیار هاک<sup>۱</sup> بررسی شد [۱۱۷-۱۱۲].

تغییر تراکم حامل‌های موثر، تحرک پذیری و مقاومت الکتریکی ساختارهای چند لایه به صورت تابعی از شرایط لایه‌نشانی برای بهبود معیار هاک نیز ارزیابی شدند [۱۱۷, ۱۱۶].

---

<sup>1</sup> Haacke figure of merit

مطالعات نشان داد، وقتی یک لایه فلزی بین دو لایه دی‌الکتریک قرار می‌گیرد، مقدار زیادی از بازتاب فلزی در محدوده مرئی کاسته شده و امکان ایجاد پوشش‌هایی با طیف عبور و بازتاب گزینشی را فراهم می‌کند [۱۲۵-۱۲۰].

البته این لایه فلزی در ساختارهای چندلایه باید بسیار نازک، یکنواخت و پیوسته باشد تا الزامات ضریب عبور زیاد و مقاومت الکتریکی کم را برآورده سازد [۱۲۹-۱۲۶].

با این حال هیچ پژوهشی در مورد تاثیر ضخامت و تعداد لایه‌های نقره و تاثیر ضخامت اکسید روی در عملکرد الکتریکی، اپتیکی و حرارتی شیشه پوشش‌دار با کاربرد پوشش کم گسیل برای استفاده در صنعت ساختمان در اقلیم‌های مختلف در ایران انجام نشده است. هدف از انجام این رساله تعیین ارتباط بین زمان لایه‌نشانی نقره و اکسید روی در پوشش‌هایی با کمترین تعداد لایه‌های نازک با ویژگی‌های مدنظر برای پوشش‌های کم گسیل با مقدار ضریب انتقال حرارت کم برای هر یک از اقلیم‌های ایران می‌باشد. همچنین شرایط بهینه برای گسیلندگی کم لایه همراه با نسبت ضریب عبور مرئی به ضریب عبور خورشیدی زیاد و ضریب بازتاب زیاد طیف فرورسرخ تعیین می‌گردد.

#### ۴-۱ آماده‌سازی نمونه و روش لایه‌نشانی

در این رساله فیلم‌های اکسید روی و نقره به ترتیب با روش RF و DC دستگاه مگنترون اسپاترینگ با دو تارگت همزمان، روی شیشه لایه‌نشانی شدند. در این روش از تارگت‌های اکسید روی و نقره با خلوص بسیار زیاد و قطر ۲ اینچ استفاده شد. قبل از لایه‌نشانی، زیر لایه‌های شیشه با محلول استون و اتانول در حمام اولتراسونیک به مدت ۱۵ دقیقه شستشو و با آب مقطر دوبار تقطیر آبکشی و با جریان هوا خشک شدند. سپس زیر لایه‌ها داخل دستگاه با فاصله ۷۵ میلی‌متر از تارگت چیده و دستگاه برای لایه‌نشانی آماده شد. اتاقک دستگاه تا فشار  $10^{-5}$  Torr با یک موتور پمپ توربو تخلیه و با فشار کاری در  $10^{-2}$  Torr تنظیم شد. قبل از شروع لایه‌نشانی سه بار در فشار تخلیه اتاقک، گاز آرگون به مقدار زیاد وارد و ناگهان تخلیه (فلش) شد تا هیچ اکسیژنی داخل اتاقک

لایه‌نشانی وجود نداشته باشد. برای تارگت اکسید روی، از حالت RF دستگاه با توان حدود ۱۰۰ تا ۱۰۳ وات و برای تارگت نقره از حالت DC با توان ۳۴ وات (۳۰۹ V و ۰/۱۱ A) استفاده شد. همچنین نرخ شار آرگون ورودی به اتاقک دستگاه هنگام لایه‌نشانی SCCM ۲۰ تنظیم شد. قبل از لایه‌نشانی، پیش اسپاترینگ<sup>۱</sup> برای هر دو تارگت به مدت ۵ دقیقه انجام شد تا سطح تارگتها از هر ناخالصی تمیز شود. همچنین در کلیه نمونه‌های این رساله، لایه‌نشانی هر سه لایه بدون شکستن خلاء اتاقک و به صورت متوالی صورت گرفت و همه لایه‌نشانی‌ها و اندازه‌گیری‌ها در دمای اتاق انجام شد. شکل ۲-۴ دستگاه لایه‌نشانی با دو تارگت همزمان را همراه با نمونه‌های لایه‌نشانی شده نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱ آماده‌سازی و چینش زیرلایه‌ها برای لایه‌نشانی با دستگاه اسپاترینگ دانشگاه صنعتی شاهرود با دو تارگت اکسید روی و نقره به همراه نمونه‌های لایه‌نشانی شده

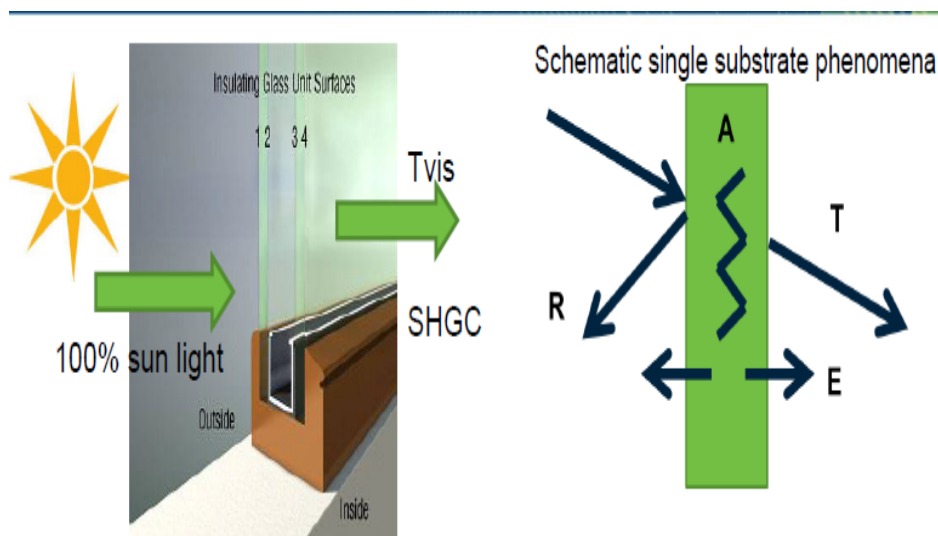
<sup>۱</sup> Pre-sputtering

## ۲-۴ روش‌های مشخصه‌یابی

همان‌طور که در فصل ۱ هم بیان شد، یکی از روش‌های بررسی اپتیکی شیشه‌های دوجداره مورد استفاده در ساختمان، مطالعه طیف عبور، بازتاب، جذب و مقدار گسیلندگی شیشه‌ها می‌باشد. شکل ۲-۴ مقطع یک پنجره با شیشه دوجداره همراه با شماره هر سطح از هر جدار شیشه از بیرون به داخل (که با شماره ۱ تا ۴ نشانه‌گذاری شده است) و شماتیک پارامترهای مورد نظر را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، درصدی از تابش فرودی از شیشه عبور (T)، درصدی از آن بازتاب (R) و مقداری نیز توسط شیشه جذب (A) می‌گردد. تابش جذب شده به صورت تابش گرمایی از سطح شیشه گسیل (E) می‌شود.

دو پارامتر مهم ضریب عبور مرئی ( $T_{vis}$ ) و ضریب بهره حرارتی خورشیدی (SHGC) از انتظارات مطرح برای شیشه در ساختمان در نظر گرفته می‌شوند.



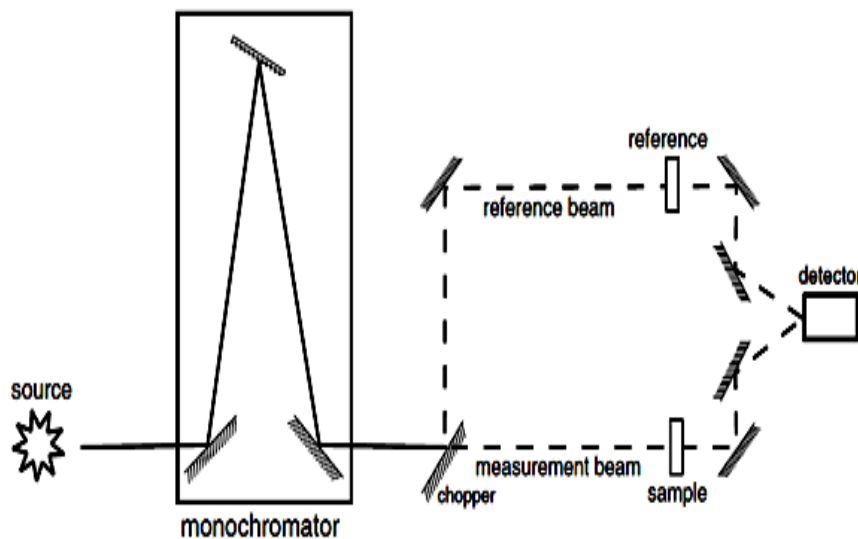
شکل ۲-۴ شماتیک پارامترهای تابش فرودی به شیشه دوجداره برای بررسی ویژگی‌های اپتیکی و حرارتی آن

در این رساله، پارامترهای ضریب عبور، بازتاب و جذب نمونه‌ها با روش اسپکتروسکوپی، گسیلندگی آن با اندازه‌گیری پارامترهای الکتریکی و ضریب انتقال حرارت و بهره حرارتی خورشیدی با شبیه‌سازی محاسبه می‌گردد.

## ۱-۲-۴ اسپکتروسکوپی UV-Vis-NIR

یکی از اساسی‌ترین روش‌های ارزیابی ویژگی‌های برهمکنش نور با ماده، اندازه‌گیری مقدار نور بازتابی، عبوری و جذب شده از ماده است. برای ارزیابی اپتیکی چند لایه‌ها، ضرایب عبور، جذب و بازتاب لایه‌ها با دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج‌های ۲۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر برای طیف فرابنفش-مرئی-فروسرخ اندازه‌گیری شد.

تکنیک اسپکتروسکوپی یکی از محبوب‌ترین مدل‌های موجود برای اندازه‌گیری شدت نور عبوری یا بازتابی می‌باشد. شکل ۳-۴ اجزای تشکیل دهنده اسپکتروفوتومتر را نشان می‌دهد.

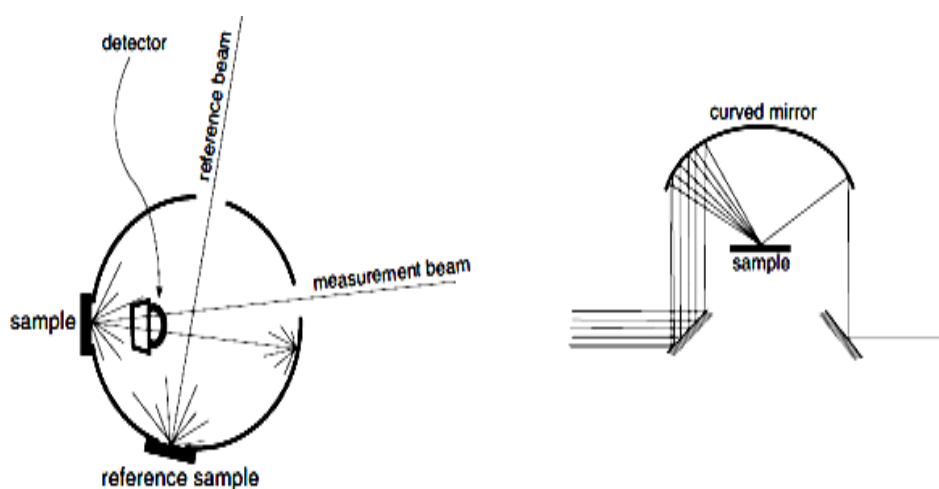


شکل ۳-۴ شماتیک کلی اجزای تشکیل دهنده اسپکتروفوتومتر

اسپکتروفوتومتر، از دو منبع نوری، پراش‌سنج تکفام‌ساز، یک نگهدارنده نمونه و یک یا چند دکتور تشکیل می‌شود. پاسخ آشکارساز تابعی از طول موج است. آینه‌ها، پنجره‌ها، توری پراش و دیگر مولفه‌های اپتیکی در مسیر اپتیکی داخل اسپکتروفوتومتر عملکردی متناسب با انرژی فوتون دارند.

بنابراین قبل از هر اندازه‌گیری باید کالیبره به صفر<sup>۱</sup> دستگاه انجام شود تا خطای این مولفه‌های اپتیکی در اندازه‌گیری به صفر برسد.

در فرایند بازتاب، دو روش متفاوت برای اندازه‌گیری وجود دارد: بازتاب پراکنده<sup>۲</sup>، که در آن نوری که در تمام جهات از نمونه بازتاب می‌شود، توسط کره جمع‌کننده<sup>۳</sup> جمع‌آوری و وارد آشکارساز می‌شود و بازتاب آینه‌ای<sup>۴</sup> که فقط نوری که در زاویه مساوی با زاویه نور فرودی، از نمونه بازتاب می‌شود، به آشکارساز می‌رسد.



شکل ۴-۴ شماتیک کره جمع‌کننده برای اندازه‌گیری بازتاب پراکنده

نظر به اینکه در اندازه‌گیری پارامترهای اپتیکی لایه‌های بسیار نازک، بازتاب در همه جهات اتفاق می‌افتد، در مطالعات صورت گرفته در این رساله، اندازه‌گیری‌های اپتیکی با دستگاه اسپکتروفوتومتر Perkin Elmer مدل Lambda 1050 انجام شد که آشکارساز آن داخل یک کره جمع‌کننده قرار گرفته و بازتاب پراکنده را اندازه‌گیری می‌کند (شکل ۴-۵ و ۴-۶).

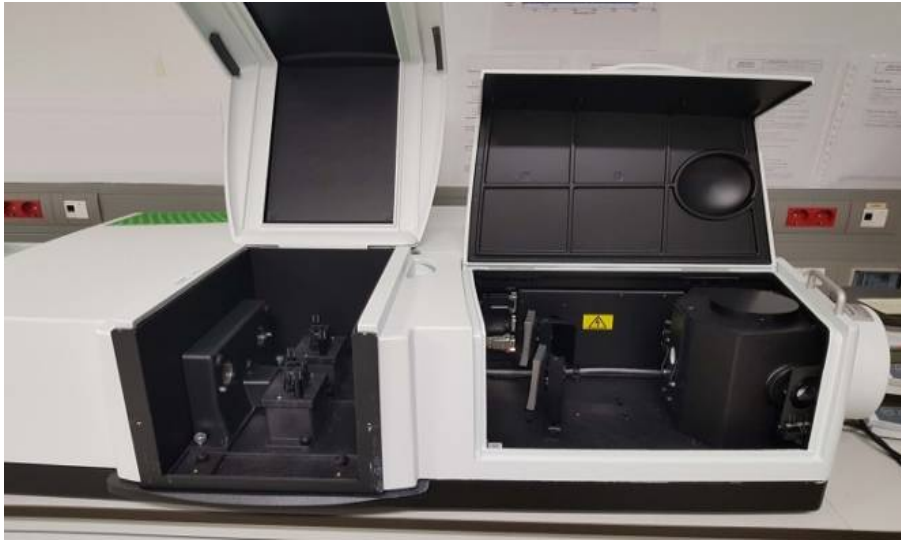
<sup>1</sup> Auto zero

<sup>2</sup> diffuse reflectance

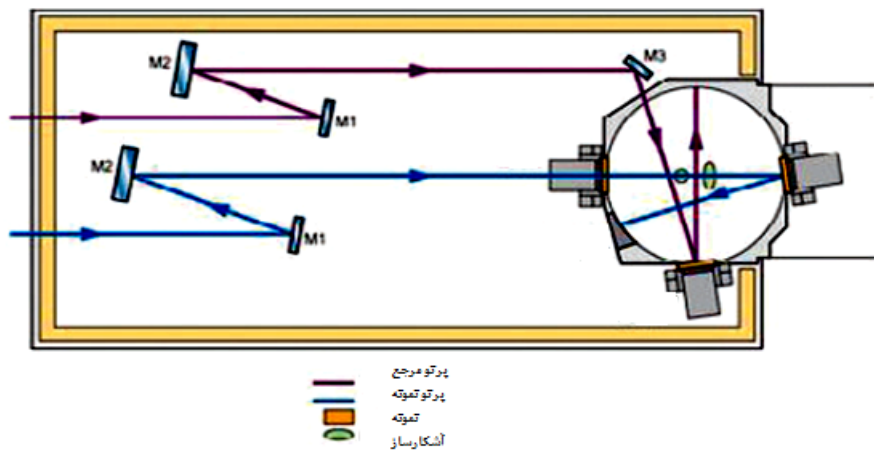
<sup>3</sup> Integrating sphere

<sup>4</sup> specular reflectance





شکل ۴-۵ دستگاه اسپکتروفوتومتر با کره جمع کننده مورد استفاده برای اندازه‌گیری ضریب عبور، جذب و بازتاب



شکل ۴-۶ شماتیک پرتوهای فرودی، عبوری و بازتابی

اندازه‌گیری با اسپکتروفوتومتر طیف عبور یا بازتاب را به دست می‌دهد. اما برای تحلیل ویژگی اپتیکی لایه‌ها در بسیاری از موارد به ضریب عبور یا بازتاب نیاز داریم که با رابطه زیر به دست می‌آید

[ ۱۲۸ ]:

$$T \text{ or } R = \frac{\int \text{TorR}(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int V(\lambda)d\lambda} \quad (1-4)$$

که در آن  $V(\lambda)$  ضریب طیفی روشنایی<sup>۱</sup> است.

در این رساله ضریب عبور (بازتاب) مرئی  $T_{\text{vis}}$ ، در طول موج  $380 < \lambda < 780 \text{ nm}$ ، ضریب عبور فروسرخ  $T_{\text{IR}}$ ، در بازه  $780 < \lambda < 2500 \text{ nm}$  و ضریب عبور خورشیدی  $T_{\text{solar}}$ ، در محدوده  $250 < \lambda < 2500 \text{ nm}$  محاسبه شده است.

#### ۲-۲-۴ عملکرد الکتریکی

اندازه‌گیری و بررسی‌های الکتریکی برای تعیین مقاومت سطحی  $R_{\text{sh}}$  با روش چهار-پراب با دستگاه Jandel انجام و سپس گسیلندگی لایه‌ها محاسبه گردید. اندازه‌گیری پارامترهای شامل تحرک پذیری  $\mu$ ، مقاومت الکتریکی<sup>۲</sup> و تراکم حاملها  $n$ ، نیز با دستگاه اثرهال (Ecopia) انجام شد.

#### ۳-۲-۴ عملکرد حرارتی

بررسی عملکرد حرارتی لایه‌ها همان‌طور که در فصل ۳ توصیف شد، با نرم افزار شبیه‌سازی Window 7.1 انجام شده است. برای بررسی عملکرد حرارتی لایه‌ها، ابتدا ویژگی‌های اپتیکی پوشش برای هر نمونه وارد کتابخانه نرم افزار شد. سپس شبیه‌سازی شیشه دوجداره‌ای متشکل از شیشه پوشش‌دار، با آرایش ۴ میلی متر شیشه پوشش‌دار-۱۲ میلی متر فاصله‌گذار<sup>۳</sup>-۶ میلی متر شیشه شفاف انجام شد. ضریب انتقال حرارت و ضریب بهره حرارتی خورشیدی برای این سیستم دوجداره با پوشش‌های مختلف، یک بار با پوشش روی سطح ۲ و یک بار با پوشش روی سطح ۳ شیشه دوجداره محاسبه و مقایسه شدند.

<sup>1</sup>luminous spectral efficiency

<sup>2</sup> resistivity

<sup>3</sup> spacer

در ادامه بررسی این پارامترها و تاثیر فیلم‌های لایه‌نشانی شده در ویژگی‌های الکتریکی، اپتیکی و حرارتی شیشه دوجداره مطابق با اهداف این رساله ارائه شده است.

## ۳-۴ لایه‌نشانی ZnO/Ag/ZnO با تغییر زمان لایه‌نشانی ZnO

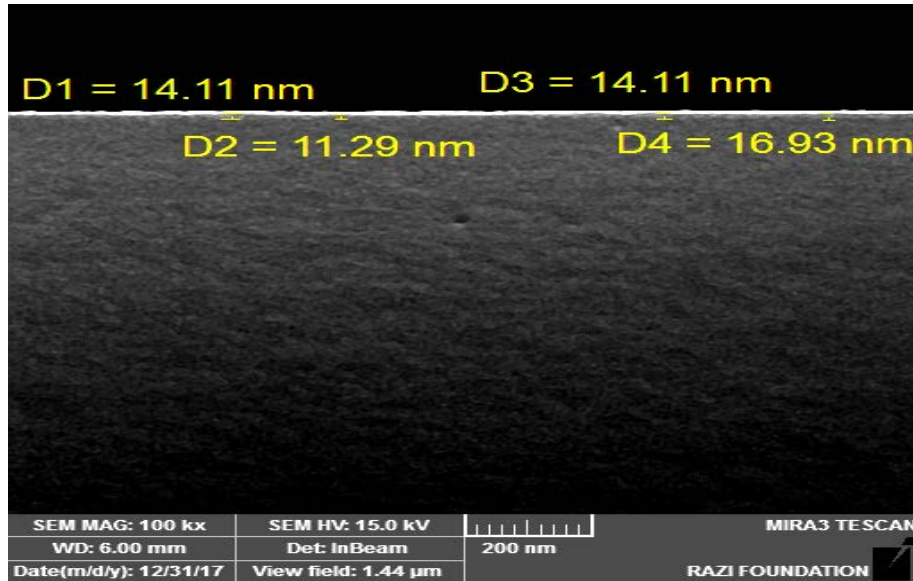
### ۱-۳-۴ پارامترهای لایه‌نشانی

در این بخش به تعیین عملکرد شیشه‌های با پوشش کم گسیل برای کاربرد در شیشه ساختمان برای اقلیم‌های سرد و گرم با توجه به ویژگی‌های اپتیکی و حرارتی سه لایه‌های ZnO/Ag/ZnO با ضخامت‌های مختلف ZnO می‌پردازیم. در این راستا، اثر لایه‌نشانی‌های مختلف بر روی نسبت ضریب عبور مرئی به ضریب عبور خورشیدی، ضریب انتقال حرارت و ضریب بهره حرارتی خورشیدی سیستم شیشه دوجداره مورد محاسبه و ارزیابی قرار می‌گیرد.

برای این بررسی، لایه‌های ZnO/Ag/ZnO با زمان لایه‌نشانی مختلف از ۱۰۰ تا ۳۰۰ ثانیه برای هر یک از لایه‌های ZnO تهیه شدند. برای همه این نمونه‌ها زمان لایه‌نشانی نقره ۲۵ ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین لایه‌نشانی هر سه لایه پشت سر هم و بدون شکستن خلاء انجام گردید. استفاده از لایه زیری و بالایی ZnO با هدف بهبود عملکرد اپتیکی لایه نقره میانی و جلوگیری از اکسید شدن آن لایه‌نشانی شد.

### ۲-۳-۴ تصاویر FESEM

تصویر FESEM از سطح مقطع نمونه با ساختار ZnO (150 s)/Ag (25 s)/ ZnO (150 s) در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. ضخامت کل برای این پوشش سه لایه حدود ۱۴ نانومتر به دست آمد. به دلیل ضخامت‌های بسیار کم هر لایه، امکان تعیین ضخامت هر یک از لایه‌ها میسر نشد.



شکل ۴-۷ تصویر برش مقطع لایه ZnO/Ag/ZnO با ۱۵۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی ZnO

#### ۳-۳-۴ بررسی ویژگی‌های الکتریکی

وقتی که دو لایه بسیار نازک در تماس با هم قرار می‌گیرند، تراز فرمی فیلم در حالت تعادل الکترون‌های آزاد بین چند لایه قرار می‌گیرد. در جدول ۴-۱، مقدار گسیلندگی،  $\varepsilon$ ، تحرک پذیری<sup>۱</sup>،  $\mu$ ، و مقاومت سطحی،  $R_{sh}$ ، پوشش‌های ZnO/Ag/ZnO برحسب زمان لایه‌نشانی لایه ZnO آورده شده است. گسیلندگی با استفاده از مقاومت سطحی پوشش با فرمول زیر محاسبه می‌شود [۱۲۹]:

$$\varepsilon = 0.0129R_{sh} - 6.7 \times 10^{-5}R_{sh}^2 \quad (۲-۴)$$

که در آن  $\varepsilon$  گسیلندگی سطح و  $R_{sh}$  مقاومت سطحی می‌باشد.

در شیشه‌های پوشش‌دار برای کاربرد در ساختمان، هر سطح با گسیلندگی کمتر از ۰٫۲ سطح کم

گسیل نامیده می‌شود [۱۳۰].

<sup>1</sup> Mobility

جدول ۱-۴ ضریب عبور مرئی، مقاومت سطحی، گسیلندگی و تحرک پذیری برای لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های مختلف لایه‌نشانی ZnO

ZnO deposition time (s)	T <sub>vis</sub> %	R <sub>sh</sub> (Ω/sq)	Resistivity (Ω.cm)	Emissivity (ε)	μ (cm <sup>2</sup> .v <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	n (cm <sup>-3</sup> )	η=T <sub>vis</sub> /ε
۱۰۰	۶۰	۵,۷۳	۸,۷×۱۰ <sup>-۵</sup>	۰,۰۷۲	۱۵	۴,۹×۱۰ <sup>۲۱</sup>	۸,۴۷
۱۵۰	۶۶	۷,۳۱	۱,۱×۱۰ <sup>-۴</sup>	۰,۰۹۱	۱۱	۴,۸×۱۰ <sup>۲۱</sup>	۷,۲۵
۲۰۰	۶۲	۲۱,۰۳	۲,۷×۱۰ <sup>-۴</sup>	۰,۲۴۲	۶,۵	۳,۷×۱۰ <sup>۲۱</sup>	۲,۵۶
۳۰۰	۶۱	۳۱,۵۸	۳,۱×۱۰ <sup>-۴</sup>	۰,۳۴۱	۲,۴	۳,۶×۱۰ <sup>۲۱</sup>	۱,۸۴

همان‌طور که در جدول ۱-۴ مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت لایه ZnO، تراکم حامل‌ها

کاهش می‌یابد، به طوری که:

$$n = \frac{N}{s \cdot d} \quad (۳-۴)$$

که در آن s مساحت سطح، N غلظت حامل‌های بار و d ضخامت چندلایه است که:

$$N = N_{Ag} + N_{ZnO,top} + N_{ZnO,bottom} \quad (۴-۴)$$

$$d = d_{Ag} + d_{ZnO,top} + d_{ZnO,bottom} \quad (۵-۴)$$

از طرفی:

$$N_{Ag} \gg N_{ZnO,top}, N_{ZnO,bottom} \quad (۶-۴)$$

پس اگر s=1 در نظر بگیریم:

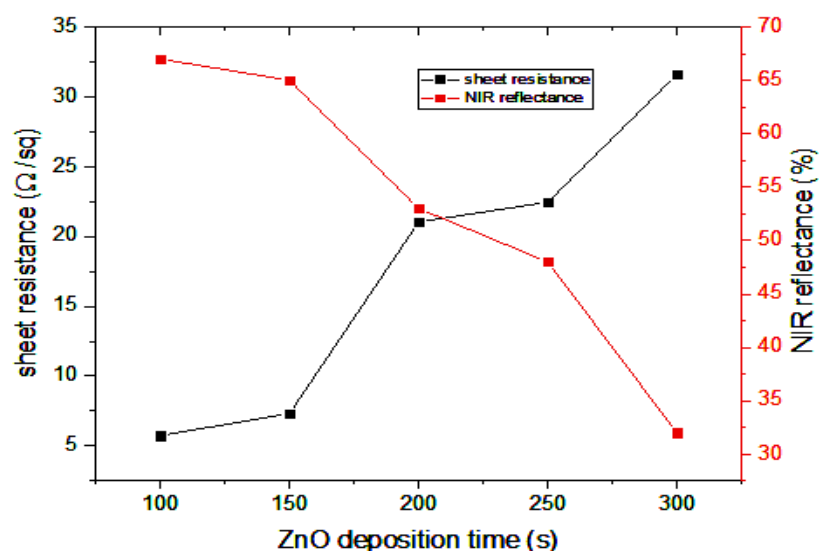
$$n = \frac{N_{Ag}}{d_{Ag} + d_{ZnO,top} + d_{ZnO,bottom}} \quad (۷-۴)$$

بنابراین با افزایش ضخامت لایه زیری و رویی ZnO، از ۱۰۰ تا ۳۰۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی، تراکم حامل‌ها n، کل سیستم چند لایه، از  $4.9 \times 10^{21} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$  به  $3.58 \times 10^{21} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$  کاهش می‌یابد.

از طرفی با افزایش ضخامت لایه زیری و رویی ZnO از ۱۰۰ تا ۱۵۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی، ابتدا ضریب عبور مرئی از ۶۰٪ به ۶۶٪ افزایش می‌یابد، که این افزایش احتمالاً به دلیل بهبود بلورینگی این لایه با افزایش ضخامت و کاهش پراکندگی ناشی از نواقص لایه می‌باشد. ولی با افزایش ضخامت در زمان‌های بیش از ۲۰۰ ثانیه لایه‌نشانی، به دلیل افزایش جذب، عبور مرئی به کندی کاهش و به ۶۱٪ می‌رسد.

با توجه به جدول، کاهش شدید مقاومت سطحی با کاهش ضخامت لایه ZnO مشاهده می‌شود. همان‌طور که با کاهش ضخامت، تراکم حامل‌های آزاد افزایش می‌یابد، تحرک پذیری نیز از  $2.4 \text{ (cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}\text{)}$  به  $15 \text{ (cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}\text{)}$  افزایش یافته و لایه نقره‌میان به اندازه کافی الکترون آزاد برای تزریق به لایه ZnO دارد. بنابراین کاهش زمان لایه‌نشانی ZnO به تحرک پذیری بیشتر و کاهش مقاومت سطحی و در نهایت به کاهش گسیلندگی می‌انجامد. همچنین با افزایش تراکم حامل‌ها و افزایش تحرک‌پذیری، رسانندگی،  $\sigma$ ، نیز افزایش می‌یابد ( $\sigma = ne\mu$ ) و مطابق با رابطه هاگن-روبنز، بازتاب در محدوده فرسرخ با افزایش رسانندگی زیاد می‌شود.

شکل ۴-۸ مقایسه ضریب بازتاب فرسرخ و مقاومت سطحی لایه‌ها را با زمان لایه‌نشانی ZnO نشان می‌دهد. که در آن افزایش ضخامت ZnO به افزایش مقاومت سطحی و در نتیجه کاهش رسانندگی و کاهش بازتاب فرسرخ از فیلم منجر می‌شود.



شکل ۴-۸ نمودار مقاومت الکتریکی سطحی و بازتاب در محدوده فرسرخ برای لایه‌های ZnO/Ag/ZnO

برحسب زمان لایه‌نشانی ZnO از ۱۰۰ تا ۳۰۰ ثانیه

از طرفی مقدار معیار<sup>۱</sup>  $\eta = T_{vis}/\epsilon$  پارامتر مهمی برای بررسی عملکرد اپتیکی - حرارتی شیشه می‌باشد. به طوری که برای شیشه کم گسیل ایده آل با ضریب عبور مرئی زیاد این معیار عدد بزرگتری دارد. همان‌طور که در جدول ۴-۱ مشاهده می‌شود، معیار  $\eta$  برای ۱۵۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی با بیشترین ضریب عبور مرئی، مقدار ۷/۲۵ به دست آمد.

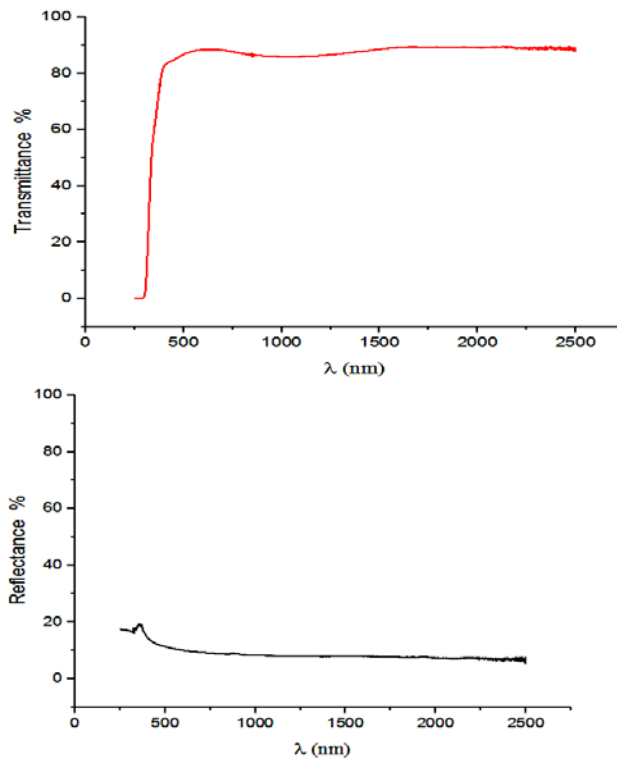
#### ۴-۳-۴ بررسی ویژگی‌های اپتیکی در طیف مرئی و فرسرخ در دماهای مختلف نمونه هنگام آزمون اسپکتروسکوپی

۱-۴-۳-۴ بررسی ویژگی‌های اپتیکی در طیف مرئی و فرسرخ در دمای اتاق  
- طیف عبور و بازتاب

<sup>1</sup> figure of merit



برای بررسی طیف اپتیکی لایه‌ها، در ابتدا به بررسی طیف تک لایه ZnO پرداختیم. همان‌طور که در شکل ۹-۴ مشاهده می‌شود، طیف عبوری این تک لایه در بازه مرئی و فروسرخ بسیار زیاد بوده و در این منطقه کاملاً شفاف است.

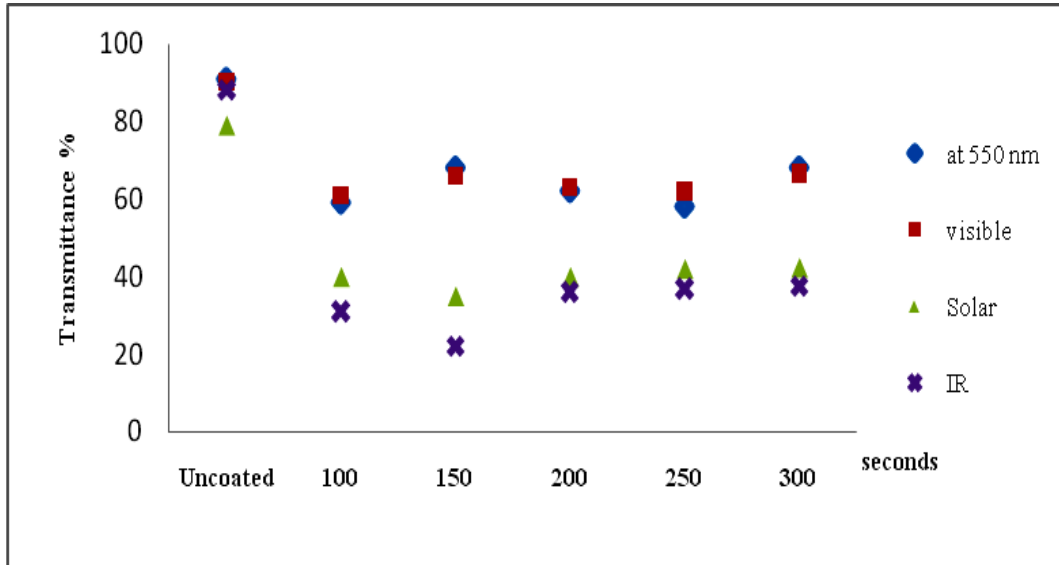


شکل ۹-۴ طیف عبور و بازتاب از لایه ZnO با ۳۰۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی

سپس برای بررسی چندلایه‌ها با هدف کاهش بازتاب فروسرخ، لایه نقره با زمان لایه‌نشانی ۲۵ ثانیه بین دو لایه ZnO، لایه‌نشانی شد و برای تعیین تاثیر ضخامت لایه ZnO، بررسی‌های مختلف برای آرایش مدنظر در بند ۴-۳-۱ انجام شد.

برای مقایسه راحت‌تر در شکل ۱۰-۴، مقدار ضریب عبور در محدوده طیف مرئی، فروسرخ و خورشیدی و مقدار ضریب عبور در طول موج ۵۵۰ نانومتر که طول موج حساس چشم انسان است، برای ضخامت‌های مختلف لایه ZnO مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۱۰-۴، بهترین عملکرد پوشش سه لایه ZnO/Ag/ZnO، در طیف مرئی با زمان لایه‌نشانی ۱۵۰ ثانیه برای لایه ZnO با ضریب عبور

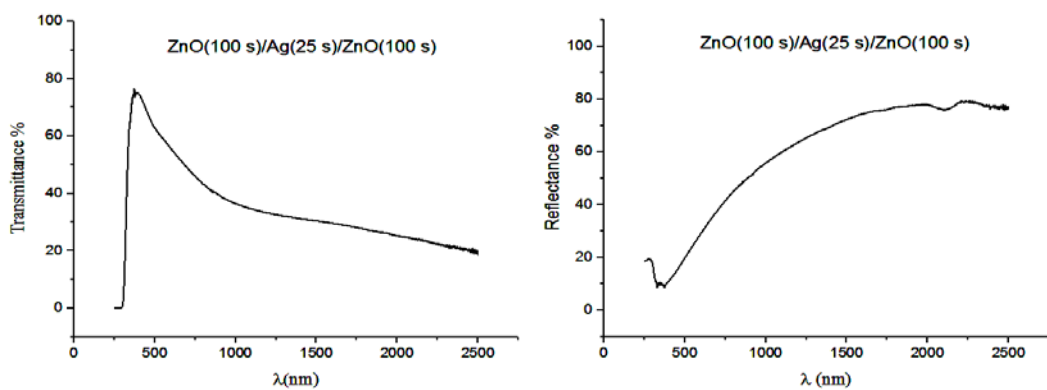
مرئی حدود ۶۶٪ به دست آمد. همان‌طور که قبلاً هم ذکر شد، بهترین عملکرد شیشه در ساختمان، با حداکثر عبور در طیف مرئی و حداکثر بازتاب در طیف فرورسرخ به دست می‌آید.

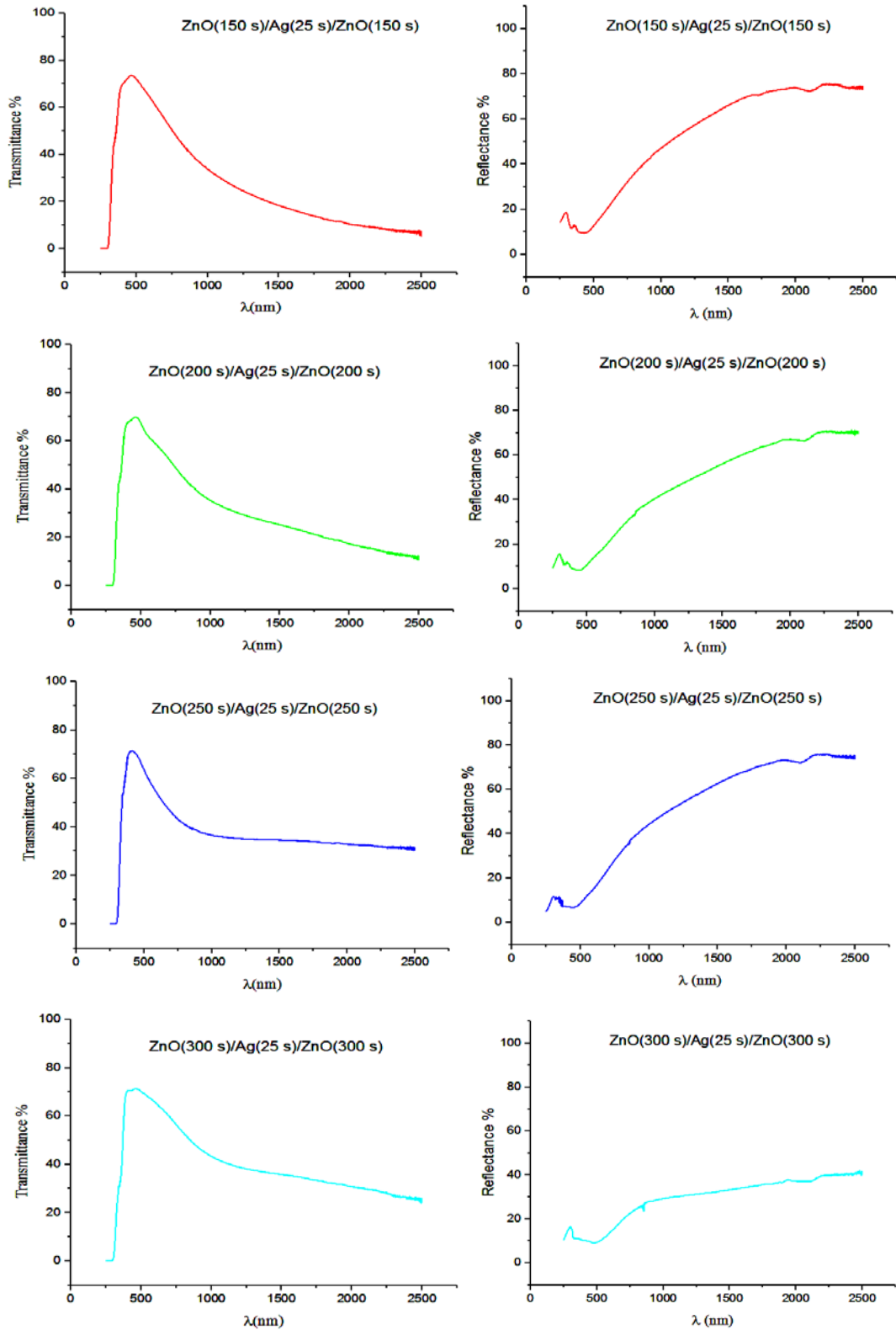


شکل ۴-۱۰ ضریب عبور در طول موج ۵۵۰ nm، مرئی، خورشیدی و فرورسرخ از لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های مختلف لایه نشانی ZnO

طیف عبور و بازتاب به دست آمده از لایه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر در شکل ۴-۱۱

آورده شده است.





شکل ۴-۱۱ طیف عبور (سمت چپ) و بازتاب (سمت راست) از لایه‌های ZnO/Ag/ZnO

برای زمان‌های مختلف لایه‌نشانی ZnO

اندازه‌گیری ضرایب عبور و بازتاب این پوشش‌ها همراه با نسبت ضریب عبور مرئی به خورشیدی در جدول ۲-۴، ارائه شده است.

جدول ۲-۴ ضریب عبور و بازتاب برای لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های مختلف لایه‌نشانی ZnO و تعیین طول موج گذار

ZnO deposition time (s)	$T_{vis}$ %	$T_{solar}$ %	$T_{NIR}$ %	$T_{vis}/T_{solar}$	$R_{vis}$ %	$R_{NIR}$ %	$\lambda_T$ (nm)
۱۰۰	۶۰	۳۹	۳۰	۱,۵۶	۲۴	۶۷	۷۹۴
۱۵۰	۶۶	۳۵	۲۳	۱,۸۸	۱۷	۶۵	۸۷۸
۲۰۰	۶۲	۳۶	۲۷	۱,۷۲	۱۵	۵۳	۹۳۶
۲۵۰	۶۳	۴۰	۳۶	۱,۵۷	۱۳	۴۸	۹۸۸
۳۰۰	۶۱	۴۲	۳۷	۱,۵۰	۹	۳۲	۱۵۷۷
شیشه معمولی بدون پوشش	۹۰	۷۹	۸۸	۱,۱۴	۱۴	۱۶	-

بازه طول موجی فرورسرخ در طیف خورشید، مقدار گرمای تابیده شده از خورشید می‌باشد که مسئول افزایش دمای محیط تحت تابش است. بنابراین با کاهش مقدار تابش فرورسرخ عبوری می‌توان از گرم شدن بیش از حد محیط تحت تابش خورشیدی کاست.

برای ارزیابی شیشه مورد استفاده در ساختمان هم از نظر انرژی و هم از نظر روشنایی روز، پارامترهای اپتیکی در دو طیف مرئی و فرورسرخ و هم در کل طیف خورشیدی باید در نظر گرفته شوند. بنابراین برای بررسی مقدار تابش بهینه عبوری از شیشه، نسبت ضریب عبور مرئی به ضریب عبور خورشیدی به عنوان پارامتر موثر در این ارزیابی مطرح می‌شود (جدول ۲-۴). این پارامتر اهمیت ضریب عبور مرئی به مقدار تابش فرورسرخ عبوری از شیشه را در اقلیم‌های گرم نشان می‌دهد. مقدار

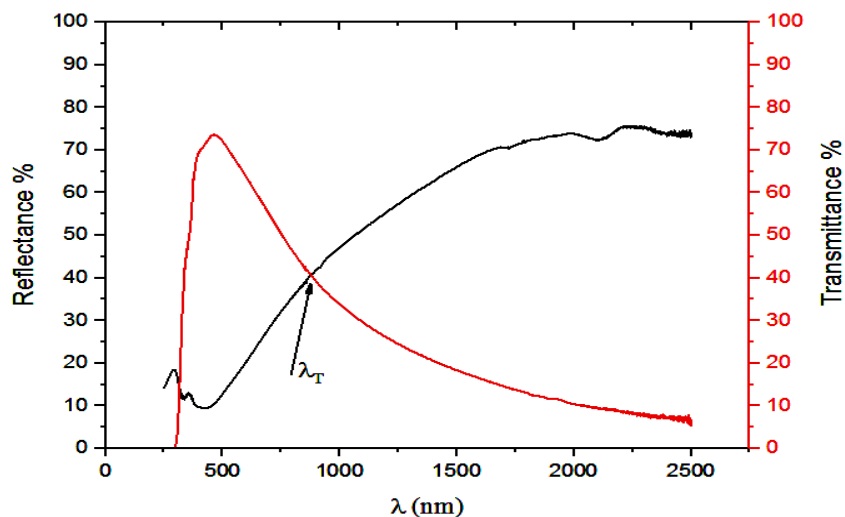
بهینه این نسبت، برای ۱۵۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی ZnO با ضریب بازتاب ۶۵٪ مقداری برابر ۱/۸۸ به دست آمد.

همان‌طور که در جدول ۲-۴ مشاهده می‌شود، همه پوشش‌های سه لایه ضریب عبور مرئی مناسب (بیشتر از ۶۰٪) را نشان می‌دهند. این نتیجه ناشی از حداقل جذب و پراکندگی در این طیف است.

اما با افزایش زمان لایه‌نشانی ZnO، بازتاب فرورسرخ فیلم از ۶۷٪ به ۳۲٪ برای ۳۰۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی ZnO کاهش می‌یابد که ناشی از کاهش رسانندگی فیلم در ضخامت‌های بیشتر می‌باشد.

پارامتر مهم دیگری که در جدول ۲-۴ معرفی شده، طول موج گذار،  $\lambda_T$ ، است که در این طول موج، گذار از حالت عبور زیاد به بازتاب زیاد اتفاق می‌افتد.

در شکل ۴-۱۱ موقعیت طول موج گذار برای فیلم با ۱۵۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی ZnO نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲ طیف عبور و بازتاب از لایه ZnO/Ag/ZnO برای ۱۵۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی ZnO و تعیین موقعیت طول موج گذار برای این پوشش

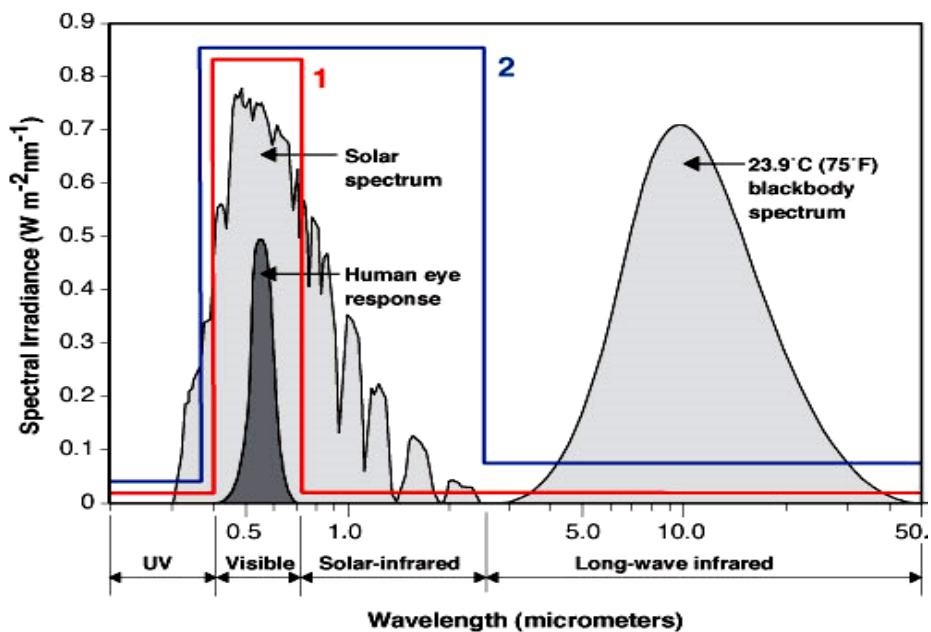
بسته به این طول موج دو دسته‌بندی برای پوشش‌های کم گسیل تعریف می‌شود:

- پوشش‌هایی که برای شیشه‌های کنترل‌کننده خورشیدی به کار می‌روند، با  $\lambda_T < 1 \mu\text{m}$  که کل تابش فرورسرخ نزدیک از شیشه را بازتاب می‌کند. این پوشش‌ها برای اقلیم گرم مناسب هستند.

- پوشش‌هایی که به عنوان عایق حرارتی کاربرد دارند. این پوشش‌ها با  $\lambda_T > 1 \mu\text{m}$  قسمت زیادی از تابش فرورسرخ نزدیک را عبور داده و در این پوشش‌ها بازتاب در طول موج‌های بزرگتر اتفاق می‌افتد. استفاده از این پوشش‌ها در اقلیم سرد که استفاده از گرمای خورشید مطلوب است، توصیه می‌شود.

علاوه بر این با توجه به جدول ۲-۴ مشاهده می‌شود که طول موج گذار  $\lambda_T$  با افزایش ضخامت ZnO شیفت قرمز دارد. به طوری که پوشش‌های با زمان‌های کمتر لایه‌نشانی ZnO که  $\lambda_T < 1 \mu\text{m}$ ، می‌تواند به عنوان پوشش کنترل‌کننده خورشیدی که طول موج‌های فرورسرخ را بازتاب می‌کنند در اقلیم گرم به کار برده شود و پوشش‌هایی با ضخامت بیشتر ZnO که  $\lambda_T > 1 \mu\text{m}$  است، چون قسمتی از تابش گرمایی خورشید را عبور می‌دهند و بهره خورشیدی مناسبی دارند، برای کاربرد در اقلیم‌های سرد پیشنهاد می‌گردند.

در شکل زیر شماتیکی از تابش خورشیدی همراه با تابش جسم سیاه و دو نوع شیشه کم گسیل ایده آل برای اقلیم گرم و سرد مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۳ طیف عبوری از شیشه کم گسیل ایده‌آل در مقایسه با طیف خورشید

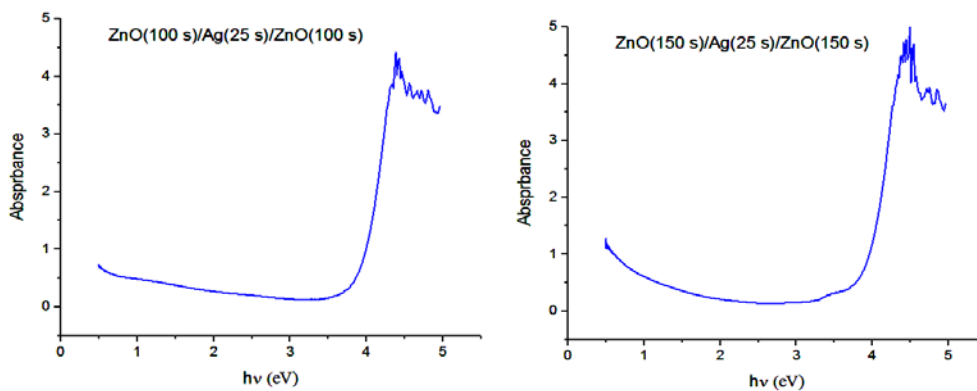
۱ (قرمز) عبور از شیشه کم گسیل برای اقلیم گرم

۲ (آبی) عبور از شیشه کم گسیل برای اقلیم سرد

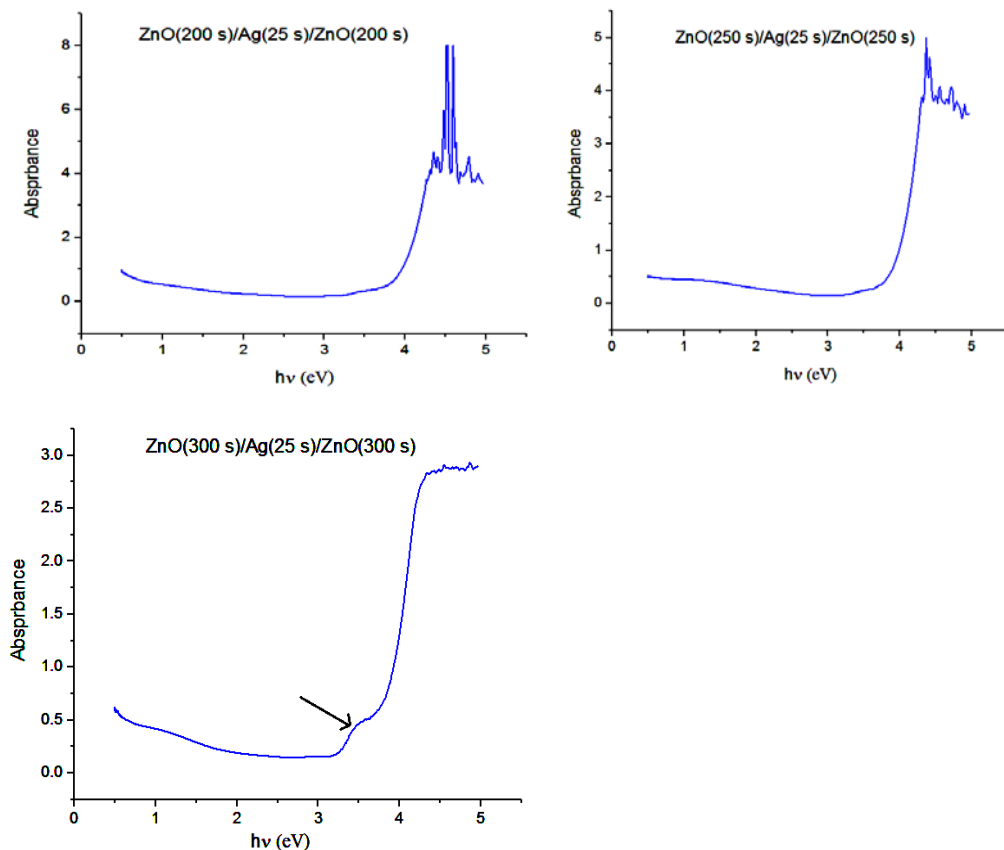
بنابراین با حداقل تعداد لایه‌ها و بدون اضافه کردن لایه جدید تنها با تغییر ضخامت لایه‌ها

می‌توان به ویژگی‌های مناسب شیشه کم گسیل برای هر کاربرد خاص دست یافت.

برای بررسی بیشتر در شکل ۴-۱۴ نمودار طیف جذب<sup>۱</sup> برای این فیلم‌ها مشاهده می‌شود.



<sup>1</sup> Absorbance



شکل ۴-۱۴ طیف جذب از لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های لایه‌نشانی ZnO از ۱۰۰ تا ۳۰۰ ثانیه

در این طیف‌ها پیکی در انرژی حدود  $3.5 \text{ eV}$  مشاهده می‌گردد که می‌توان آن را به جذب اکسیتونی نسبت داد. اما جذب اپتیکی قوی در انرژی‌های بالاتر از گاف نواری به دلیل حضور الکترونهای آزاد در نوار رسانش و اصل طرد پاولی - حدود  $4 \text{ eV}$  - از طریق جذب نوار به نوار<sup>۱</sup>، اتفاق می‌افتد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تراکم حامل‌ها (کاهش ضخامت ZnO) پیک جذب اکسیتونی به دلیل اثر استتار اکسیتون توسط حامل‌های آزاد کاهش یافته و جذب توسط تراکم حامل‌ها بر جذب اکسیتونی غالب می‌شود. از طرف دیگر، شیفت آبی در لبه اصلی گذارهای جذب با کاهش ضخامت ZnO در نمودارها مشاهده می‌شود. به طوریکه در نمونه‌های با تراکم حامل‌های بیشتر

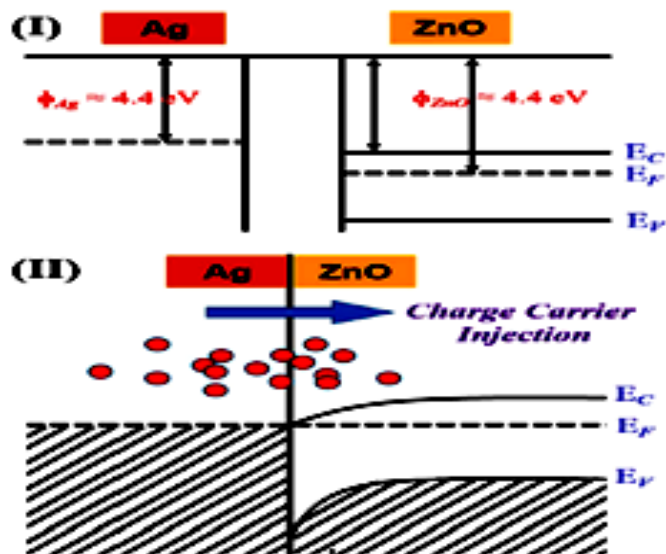
<sup>1</sup> band-to band absorption



در نوار رسانش، حالت‌های الکترونی پر شده به دلیل اصل طرد پاولی به حالت‌های با انرژی بالاتر منتقل می‌گردد و در نتیجه لبه اصلی گذارهای جذب به انرژی بالاتر شیفت پیدا می‌کند.

بنابراین لبه جذب برای فیلم‌های نازک با تراکم حامل‌های بیشتر، بالاتر از لبه جذب برای نمونه‌های با الکترون آزاد کمتر است (شکل ۴-۱۶) که این نتیجه ناشی از افزایش الکترون‌های آزاد و اصل طرد پاولی است.

یکی از پارامترهای مهم دیگری که در بررسی اپتیکی لایه‌های نازک مطالعه می‌شود، گاف انرژی فیلم است. در شکل ۴-۱۵ شماتیکی از شکل‌گیری گاف انرژی در ZnO و Ag قبل و بعد از تماس با هم نشان داده شده است.



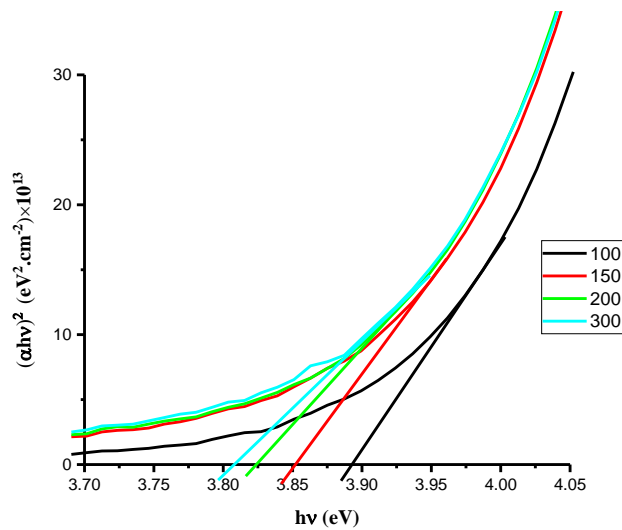
شکل ۴-۱۵ ساختار گاف انرژی برای ZnO و Ag قبل (I) و بعد (II) از لایه‌نشانی چندلایه ZnO/Ag/ZnO [۱۳۲, ۱۳۱]

با توجه به شکل ۴-۱۵ پس از تماس لایه نقره با ZnO با تزریق الکترون‌ها از لایه فلزی به لایه ZnO انرژی نوار رسانش و ظرفیت افزایش می‌یابد. چند لایه ZnO/Ag/ZnO گاف نواری مستقیم دارد و با توجه به آنچه در فصل ۲ توضیح داده شد، گاف نواری این لایه‌ها از برخورد شیب خط مماس بر منحنی  $(\alpha h\nu)^2$  بر حسب  $h\nu$  با محور طولی به دست می‌آید [۱۳۳]. در شکل زیر تعیین گاف انرژی برای فیلم‌ها نشان داده شده است.

ZnO یک نیم‌رسانای نوع n- با تراکم حامل‌های  $10^{16}$ – $10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$  است. وقتی تراکم حامل‌ها با ایجاد ناخالصی یا افزودن لایه دیگری به مقدار  $10^{19}$ – $10^{21}$   $\text{cm}^{-3}$  برسد، به تدریج جذب حامل‌های آزاد بر جذب اکسیتونی غالب می‌شود [۱۳۴, ۱۳۵].

وقتی تراکم الکترون‌ها با کاهش ضخامت زیاد می‌شود، پیر شدن تراز رسانش با الکترون‌های آزاد

منجر به گسترش گاف انرژی می‌شود.



ZnO deposition time (s)	$E_g$ (eV)
۱۰۰	۳٫۸۹
۱۵۰	۳٫۸۵
۲۰۰	۳٫۸۴
۳۰۰	۳٫۸۱

شکل ۴-۱۶ تعیین گاف انرژی لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های لایه‌نشانی ZnO از ۱۰۰ تا ۳۰۰ ثانیه

۲-۴-۳-۴ بررسی طیف مرئی و فرسرخ لایه‌های ZnO/Ag/ZnO در دماهای  $11^{\circ}\text{C}$ ،  
 $25^{\circ}\text{C}$ ،  $40^{\circ}\text{C}$ ،  $52^{\circ}\text{C}$ ،  $65^{\circ}\text{C}$

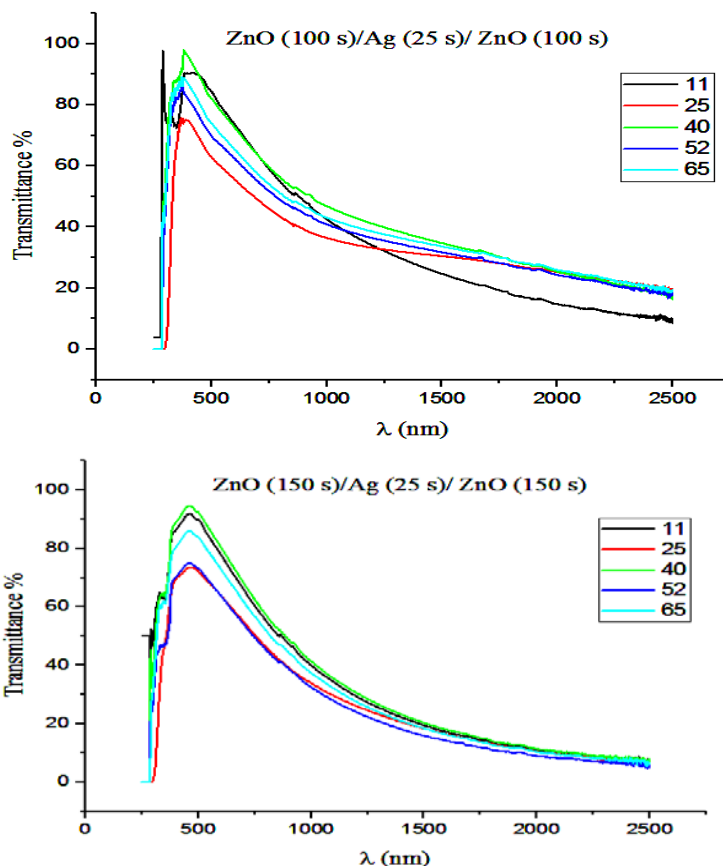
در بررسی دیگری برای تعیین عملکرد شیشه کم‌گسیل در دماهای مختلف شرایط جوی، با استفاده از یک سیرکولاتور دمای سطح نگهدارنده نمونه‌ها در اسپکتروفوتومتر با چرخش آب در دماهای مختلف، تغییر داده شد. سپس نمونه‌ها داخل نگهدارنده قرار گرفت و با نصب یک ترموکوپل کالیبره شده، بر روی سطح نمونه، دما در هر آزمون اندازه‌گیری و ثبت شد.

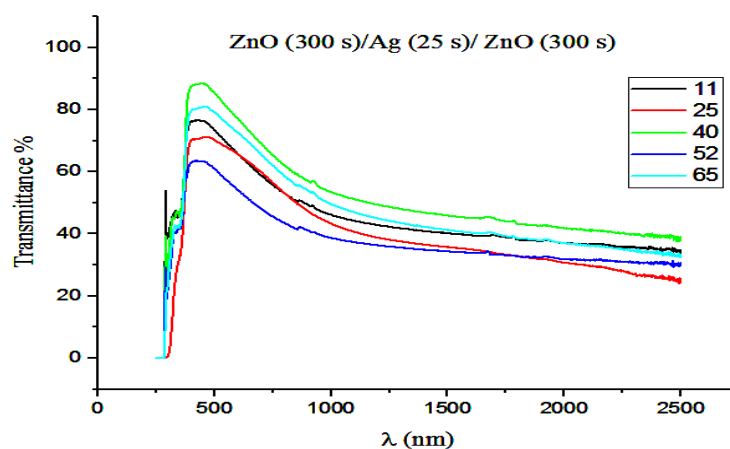
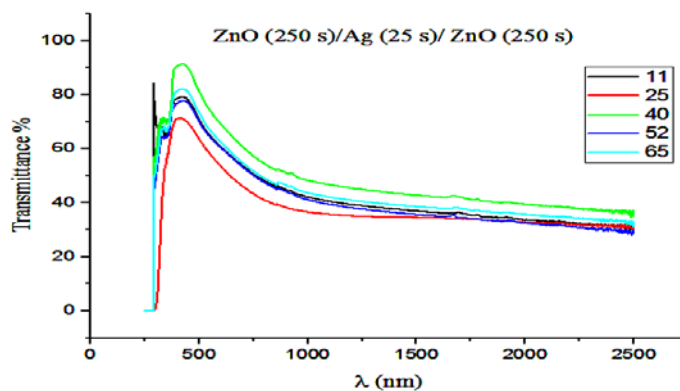
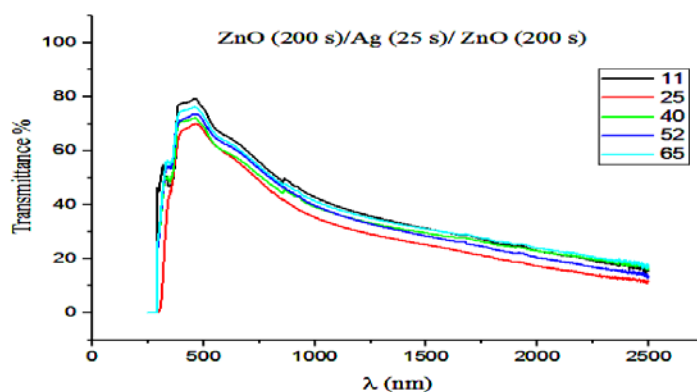


شکل ۴-۱۷ اسپکتروفوتومتر به همراه سیرکولاتور و ترموکوپل‌های نصب شده برای اندازه‌گیری دمای سطوح نمونه‌ها برای آزمون در دماهای مختلف

برای دماهای کمتر از ۱۰ درجه چون مه‌گرفتگی در سطح نمونه ایجاد می‌شود و نتایج طیف عبور را تحت تاثیر قرار می‌داد، اندازه‌گیری انجام نشد. با توجه به کاربرد پوشش‌ها در شیشه‌های خارجی ساختمان‌ها، دماهای بیش از ۶۵ درجه مورد بررسی قرار نگرفت.

نتایج این اندازه‌گیری (شکل ۴-۱۸) نشان داد تقریباً در همه موارد، در دمای سطح نمونه ۱۱ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد پیک عبور مرئی حدود ۲۰٪ افزایش داشته است. این در حالی است که طیف عبور در محدوده‌های دیگر تغییر محسوسی نشان نمی‌دهد. همچنین تقریباً در کلیه نمونه‌ها بیشترین پیک عبور مرئی در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق افتاده است که به معنای عملکرد بهتر شیشه در طیف مرئی برای اقلیم گرم است.





شکل ۴-۱۸ نمودار طیف عبور برای لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های لایه‌نشانی ZnO از ۱۰۰ تا ۳۰۰ ثانیه در دماهای مختلف  $11^{\circ}\text{C}$ ،  $25^{\circ}\text{C}$ ،  $40^{\circ}\text{C}$ ،  $52^{\circ}\text{C}$ ،  $65^{\circ}\text{C}$

#### ۴-۳-۵ بررسی ویژگی‌های حرارتی

برای ارزیابی عملکرد حرارتی شیشه‌های چندجداره پوشش‌دار، در شرایط مختلف آب‌وهوایی، در این بخش، با استفاده از نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های اپتیکی ضرایب عبور و بازتاب پوشش‌ها در

طیف مرئی و خورشیدی و با استفاده از گسیلندگی محاسبه شده برای پوشش، به شبیه‌سازی نرم‌افزاری، با مبنا قرار دادن مقدار اندازه‌گیری شده برای ضریب انتقال حرارت و ضریب بهره حرارت خورشیدی سیستم شیشه دوجداره با شیشه کم گسیل پرداختیم. در این بررسی، سیستم شیشه دوجداره به صورت ثابت و بدون قاب فرض شد، تا تحلیل‌ها بر بخش نورگذر پنجره متمرکز گردد. آرایش مورد نظر، به صورت یک جدار شیشه ۴ میلی‌متری پوشش‌دار، با پوشش‌های تعیین‌شده در بخش‌های قبلی، و جدار دیگر، با شیشه شفاف به ضخامت ۶ میلی‌متر، با فاصله گذار<sup>۱</sup> ۱۲ میلی‌متر بین دوجدار، و پر شده با گاز آرگون در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی عملکرد حرارتی هر یک از شیشه‌های مدل‌شده، براساس مشخصات حرارتی و نوری شیشه‌ها، که در جدول ۳-۴ آورده شده است، صورت گرفت. نتایج در جدول ۴-۴ ارائه شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، با کاهش ضخامت ZnO (با کاهش گسیلندگی سطح شیشه پوشش‌دار)، مقدار ضریب انتقال حرارت کاهش و مقاومت حرارتی شیشه افزایش می‌یابد.

---

<sup>۱</sup> spacer

جدول ۳-۴ مشخصات حرارتی و نوری شیشه‌های مورد مطالعه

ضریب گسیلندگی		انعکاس ضریب خورشیدی <sup>۴</sup> %		ضریب انعکاس نور مرئی <sup>۳</sup> %		ضریب عبور خورشیدی <sup>۲</sup> %	ضریب عبور نور مرئی <sup>۱</sup> %	نوع شیشه
طرف بدون پوشش	طرف پوشش‌دار	طرف بدون پوشش	طرف پوشش‌دار	طرف بدون پوشش	طرف پوشش‌دار			
۰٫۸۴	۰٫۰۷	۳۵	۴۴	۱۶	۲۴	۳۹	۶۱	ZnO (100 s)/Ag (25 s)/ ZnO (100 s)
۰٫۸۴	۰٫۰۹	۱۲	۳۸	۸	۱۷	۳۵	۶۵	ZnO (150 s)/Ag (25 s)/ ZnO (150 s)
۰٫۸۴	۰٫۲۴	۲۳	۳۴	۸	۱۵	۳۶	۶۲	ZnO (200 s)/Ag (25 s)/ ZnO (200 s)
۰٫۸۴	۰٫۰۹	۲۱	۴۲	۹	۱۳	۴۰	۵۹	ZnO (250 s)/Ag (25 s)/ ZnO (250 s)
۰٫۸۴	۰٫۳۰	۱۱	۱۷	۴	۵	۳۹	۶۳	ZnO (300 s)/Ag (25 s)/ ZnO (300 s)
۰٫۸۴	۰٫۸۴	۷	۷	۸	۸	۷۷	۸۷	شیشه فلوت ساده

جدول ۴-۴ مقادیر ضریب انتقال حرارت و ضریب بهره حرارتی خورشید (SHGC) برای لایه‌های

ZnO/Ag/ZnO برحسب زمان لایه‌نشانی ZnO از ۱۰۰ تا ۳۰۰ ثانیه

ZnO زمان لایه نشانی (S)	U-value (Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )	SHGC پوشش روی سطح ۳	SHGC پوشش روی سطح ۲
۱۰۰	۱٫۴۳	۰٫۴۸۴	۰٫۴۲۷
۱۵۰	۱٫۴۸	۰٫۵۲۰	۰٫۴۲۲
۲۰۰	۱٫۷۶	۰٫۵۳۴	۰٫۴۲۳
۲۵۰	۱٫۷۹	۰٫۵۴۱	۰٫۴۳۹
۳۰۰	۱٫۸۸	۰٫۶۱۸	۰٫۴۷۷

<sup>1</sup> Visible Transmittance

<sup>2</sup> Solar Transmittance

<sup>3</sup> Visible Reflectance

<sup>4</sup> Solar Reflectance



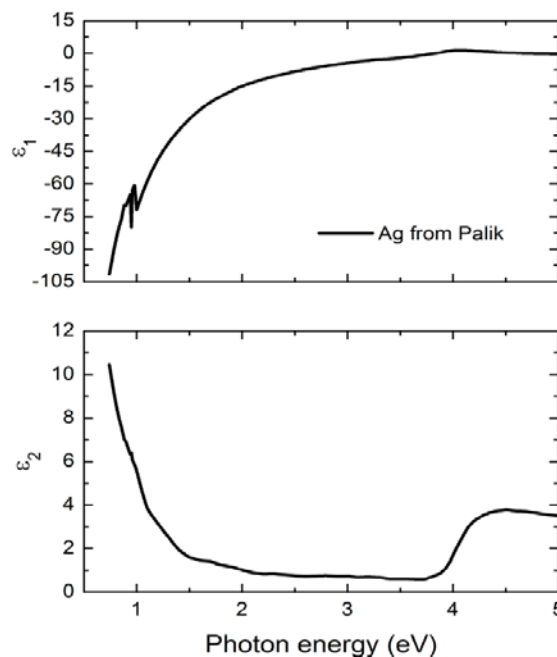
با توجه به جدول ۴-۴، ضریب انتقال حرارت برای ضخامت بهینه ZnO با ۱۵۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی ( $1,48 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ) به دست آمد. لایه‌های با ضخامت کمتر ZnO، با توجه به طول موج گذار کمتر، برای کاربرد در اقلیم گرم مناسب تشخیص داده می‌شوند، زیرا در این اقلیم نیاز به بهره‌برداری خورشیدی کمتر مدنظر است، با توجه به اعداد SHGC به دست آمده در جدول فوق، در سیستم شیشه دوجداره، این پوشش‌ها باید روی سطح ۲ قرار بگیرند.

#### ۶-۳-۴ نتیجه‌گیری

- با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول ۴-۱ این بخش، مقدار ضریب عبور مرئی برای تمام پوشش‌ها بیش از ۶۰٪ است. این امر نشان‌دهنده تأثیر کم ضخامت ZnO (در این محدوده ضخامت) بر میزان عبور طیف مرئی از این پوشش سه لایه است.
- از آنجا که مقاومت سطحی نسبت عکس با رسانندگی و بازتاب طیف فروسرخ دارد، بازتاب فروسرخ برای زمان لایه‌نشانی کمتر و در نتیجه، ضخامت کمتر ZnO افزایش می‌یابد.
- پوشش‌های با زمان‌های کمتر لایه‌نشانی ZnO می‌توانند به عنوان پوشش کنترل‌کننده خورشیدی، که طول موج‌های فروسرخ را بازتاب می‌کنند، در اقلیم گرم به کار برده شوند. با توجه به این نکته که پوشش‌هایی با ضخامت بیشتر ZnO قسمتی از تابش گرمایی خورشید را عبور می‌دهند و بهره خورشیدی مناسبی دارند، برای کاربرد در اقلیم‌های سرد پیشنهاد می‌گردند. این نتیجه در توافق با نتایج ضریب انتقال حرارت و ضریب بهره حرارتی خورشیدی به دست آمده در جدول ۴-۴ می‌باشد.
- وجود الکترون‌های آزاد می‌تواند به شدت ویژگی‌های اپتیکی فیلم‌ها را احتمالاً با جلوگیری از جذب اکسیتونی ناشی از اثر استتار الکترون‌های آزاد و گسترش گاف نواری به دلیل اثر BM تغییر دهد.
- گاف انرژی برای فیلم‌های نازک ZnO با تراکم حامل‌های بیشتر، بزرگتر از گاف انرژی نمونه‌های با الکترون آزاد کمتر است که این نتیجه ممکن است به شیفت آبی BM نسبت داده شود که ناشی از غلبه اثر جذب الکترون‌های آزاد به جذب اکسیتونی است.
- مقدار ضریب انتقال حرارت در ضخامت کمتر ZnO کاهش معنی‌داری را نشان می‌دهد.
- با توجه به موارد فوق، فیلم‌های با ضخامت کمتر ZnO برای استفاده در شیشه دوجداره در اقلیم گرم روی سطح ۲ و فیلم‌های با ضخامت بیشتر ZnO روی سطح ۳ برای اقلیم سرد مناسب‌ترند.

#### ۴-۴ لایه‌نشانی ZnO/Ag/ZnO با تغییر زمان لایه‌نشانی نقره

نقره یک فلز نجیب است که رسانندگی الکتریکی بسیار زیادی دارد. نقره ساختار بلوری FCC با ثابت شبکه ۰٫۴۰۹ نانومتر دارد. در شکل زیر دو منطقه مجزا در طیف نقره مشاهده می‌شود: در انرژی‌های کمتر از ۲٫۵ eV گذارهای الکترونیکی Intraband در طیف غالب شده ولی برای فوتون‌های با انرژی بیشتر گذارهای الکترونیکی interband مشاهده می‌شود [ ۱۳۶ ] .



شکل ۴-۱۹ قسمت حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک نقره

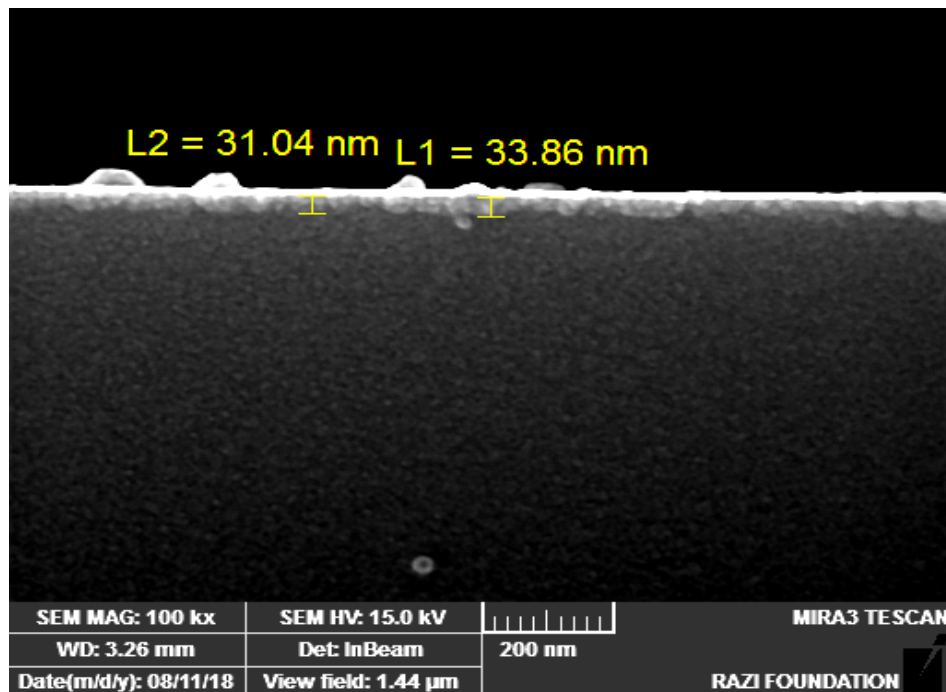
گذارهای با انرژی کم شامل الکترون‌های آزاد هستند و از قسمت مربوط به جذب درود می‌توان انرژی پلاسما و زمان پراکندگی را به دست آورد. از طرف دیگر در گذارهای با انرژی بیشتر که شامل الکترون‌های مقید هستند با پارامترهای یک مولفه به شکل نوسانگر معرفی می‌شود. در فلزات، انرژی رزونانس جذب بین نواری گذارهای الکترونیکی را از تراز فرمی به تراز خالی بالاتر بعدی یا از یک تراز پر شده پایینتر به تراز فرمی منتقل می‌کند [۱۳۷]. از نمودار تابع دی‌الکتریک شروع جذب بین نواری به وضوح در انرژی ۴ eV مشاهده می‌شود.

#### ۱-۴-۴ پارامترهای لایه‌نشانی

در این مرحله از آزمون‌ها، لایه‌نشانی لایه‌های بسیار نازک ZnO/Ag/ZnO روی شیشه برای ضخامت‌های مختلفی از لایه نقره با کنترل زمان لایه‌نشانی نقره انجام شد. در این مرحله سعی شد با استفاده از روش ساده، مقرون به صرفه و با حداقل تعداد لایه‌ها، بدون تغییر محسوسی در عبور طیف مرئی، عبور طیف فروسرخ را تا حد امکان کاهش دهیم. با اندازه‌گیری پارامترهای الکتریکی، گسیلندگی حرارتی فیلم‌ها را محاسبه کرده و به بررسی عملکرد اپتیکی-الکتریکی فیلم‌ها پرداختیم. نسبت ضریب عبور مرئی به ضریب عبور خورشیدی را به دست آورده و ضریب انتقال حرارت و ضریب بهره حرارتی خورشیدی سیستم شیشه دوجداره متشکل از شیشه با این پوشش‌ها را شبیه‌سازی کردیم. در کلیه نمونه‌های این بخش، زمان لایه‌نشانی برای ZnO، ۳۰۰ ثانیه و برای نقره ۱۰ تا ۴۵ ثانیه تنظیم شد.

#### ۲-۴-۴ تصاویر FESEM

تصویر FESEM از سطح مقطع نمونه با ساختار ZnO (300 s)/Ag (40 s)/ ZnO (300 s) در شکل ۴-۲۲ نشان داده شده است. ضخامت کل برای این پوشش سه لایه حدود ۳۳/۸ نانومتر به دست آمد. به دلیل ضخامت‌های بسیار کم هر لایه، امکان تعیین ضخامت هر یک از لایه‌ها میسر نشد.



شکل ۴-۲۰ تصویر برش مقطع لایه ZnO/Ag/ZnO با ۴۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی نقره

#### ۳-۴-۴ بررسی ویژگی‌های الکتریکی

در نمونه‌های بررسی شده در این رساله، برای ضخامت‌های فیلم با زمان لایه‌نشانی بیش از ۲۵ ثانیه، با افزایش تراکم حامل‌های آزاد، و تزریق شدن الکترون‌ها از لایه نقره به لایه ZnO، مقاومت الکتریکی فیلم به تدریج کاسته شد.

برای ضخامت‌های فیلم با زمان لایه‌نشانی کمتر، ضخامت نقره برای تزریق الکترون‌های آزاد به لایه دیگر کافی نبود. همچنین تماس ناقص الکتریکی به دلیل نقص‌های موجود در لایه جزیره‌ای نقره در ضخامت بسیار کم، موجب افزایش شدید مقاومت سطحی شد [۱۳۸]. ویژگی‌های الکتریکی سیستم با افزایش ضخامت نقره و بهبود بلورینگی لایه نقره بهبود یافت. به طوری که در این موارد هیچ سدی برای انتقال الکترون‌ها از لایه پیوسته نقره به لایه ZnO وجود نداشت و مطابق تئوری شاتکی، الکترون‌های آزاد به راحتی بین لایه‌ها حرکت می‌کنند [۱۳۹]. همان‌طور که در جدول ۴-۵ نشان داده شده است، ضخامت لایه نقره به شدت بر ویژگی‌های پوشش تاثیر گذاشته است.

در جدول ۴-۵، مقدار گسیلندگی، تحرک پذیری و مقاومت سطحی پوشش‌های ZnO/Ag/ZnO

برحسب زمان لایه‌نشانی لایه Ag لیست شده است.

جدول ۴-۵ ضریب عبور مرئی، مقاومت سطحی، گسیلندگی و تحرک پذیری برای لایه‌های ZnO/Ag/ZnO

برای زمان‌های مختلف لایه‌نشانی Ag

Ag deposition time (s)	$T_{vis}$ %	$R_{sh}$ ( $\Omega/sq$ )	Resistivity ( $\Omega.cm$ )	Emissivity ( $\epsilon$ )	$\mu$ ( $cm^2.v^{-1}.s^{-1}$ )	n ( $cm^{-3}$ )	$\eta=T_{vis}/\epsilon$
۰	۸۶	-	-	-	-	-	-
۱۰	۵۷	۵۶,۱ M	-	-	-	-	-
۱۵	۵۵	۵,۹ M	-	-	-	-	-
۲۵	۶۷	۳,۶	$۵,۷ \times 10^{-۴}$	۰,۳۴	۲,۴	$۳,۵ \times 10^{۲۱}$	۱,۹۶
۲۸	۶۵	۲,۸	$۳,۷ \times 10^{-۴}$	۰,۳۰	۶,۳	$۳,۶ \times 10^{۲۱}$	۲,۱۶
۳۵	۶۹	۱,۳	$۱,۹ \times 10^{-۴}$	۰,۱۸	۷,۸	$۳,۷ \times 10^{۲۱}$	۳,۸۲
۴۰	۷۴	۹,۱۵	$۱,۸ \times 10^{-۴}$	۰,۱۱	۹,۴	$۴,۱ \times 10^{۲۱}$	۶,۷۵
۴۵	۵۱	۲,۲۸	$۴,۵ \times 10^{-۵}$	۰,۰۳	۱۷,۱	$۷,۸ \times 10^{۲۱}$	۱۷,۴

همان‌طور که در جدول ۴-۵ مشاهده می‌شود، کاهش شدید مقاومت سطحی با افزایش ضخامت

نقره در زمان لایه‌نشانی ۱۰ تا ۲۵ ثانیه اتفاق افتاده است. برای فیلم‌های با زمان لایه‌نشانی بیش از ۲۵

ثانیه با افزایش ضخامت نقره به دلیل پیوستگی ساختار لایه، مقدار مقاومت سطحی با سرعت کمتری

کاهش یافته است. بنابراین افزایش زمان لایه‌نشانی نقره به دلیل کاهش پراکندگی ناشی از نواقص

موجود در بلورینگی ضعیف به تحرک پذیری بیشتر و کاهش مقاومت سطحی [ ۱۴۰ ] و در نهایت به

کاهش گسیلندگی می‌انجامد. همچنین با افزایش تراکم حامل‌ها و افزایش تحرک‌پذیری، رسانندگی

نیز افزایش می‌یابد ( $\sigma = ne\mu$ ). از طرفی همان‌طور که قبلاً هم گفته شد، مطابق با رابطه هاگن-روبنز

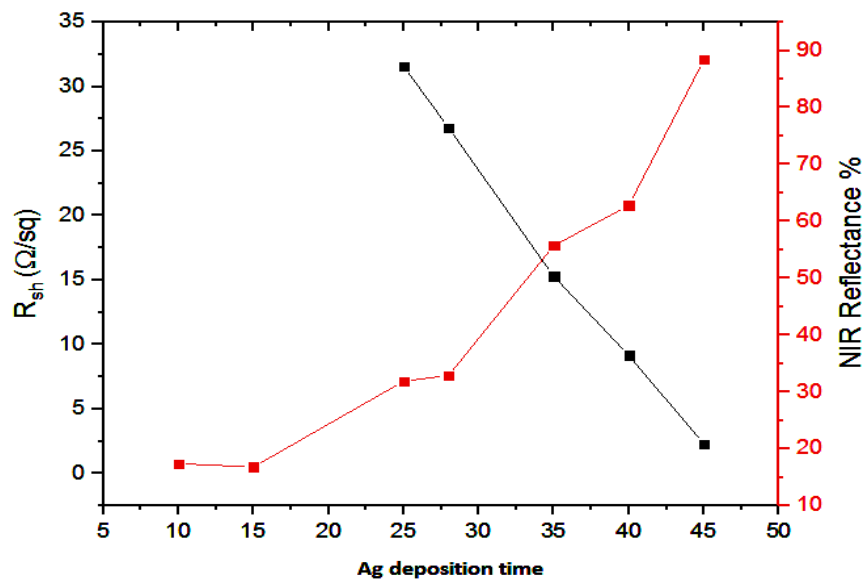
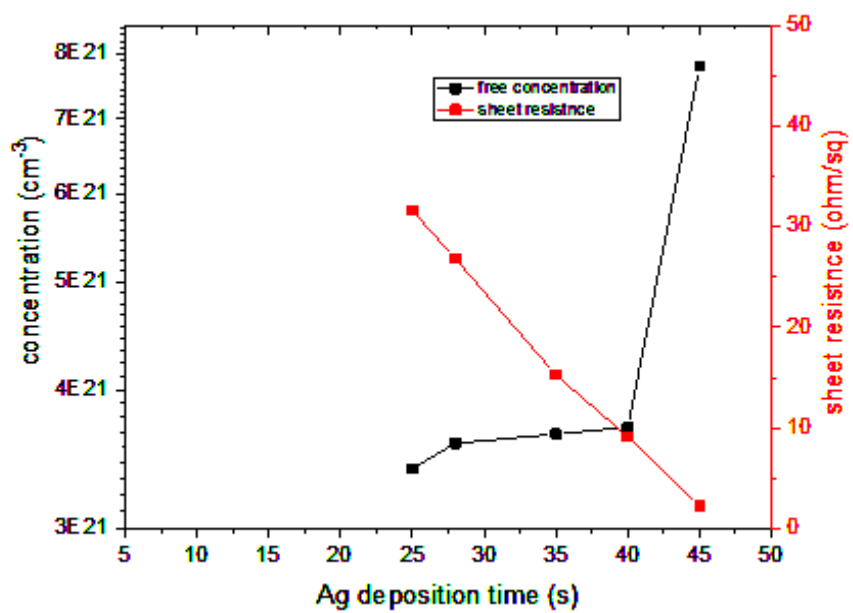
بازتاب در محدوده فرسرخ با افزایش رسانندگی افزایش می‌یابد. علاوه بر تراکم حامل‌ها، تحرک پذیری الکترون‌های رسانش در فیلم‌های لایه نازک ممکن است تحت تاثیر محدودیت الکترون‌های داخلی نانوذرات باشد. بررسی‌ها نشان داد که وقتی سایز ذرات با طول مسیر آزاد میانگین<sup>۱</sup> الکترون‌های داخلی نانوذرات قابل مقایسه باشد (برای ضخامت‌های کمتر لایه نقره)، برخورد‌های الکترون‌های آزاد با سطح ذره به برخورد‌های اضافی می‌انجامد و این باعث کاهش تحرک پذیری می‌شود [۱۴۱]. با بررسی رسانندگی  $\sigma$ ، فیلم مشاهده شد که افزایش تدریجی ضخامت باعث گذار ناگهانی از حالت عایق به رسانای الکتریکی شود و این نشان می‌دهد که رسانندگی فیلم‌ها بیشتر تحت تاثیر تحرک پذیری الکترون‌هاست تا تراکم حامل‌های درون نانوذرات. در واقع در ضخامت‌های بسیار کم فیلم‌های فلزی رسانندگی بسیار کم است و الکترون‌ها محدود به داخل ذرات مجزا از هم هستند. با افزایش ضخامت، مسیرهای اتصال بین ذرات مجاور هم برقرار شده و می‌تواند الکترون‌ها را از حالت جایگزیده داخل تک ذره خارج کرده و تحرک پذیری الکترون‌ها به شدت افزایش می‌یابد.

معیار<sup>۲</sup>  $\eta = T_{vis}/\varepsilon$  نیز در جدول نشان داده شده است. این معیار، مقدار بهینه ضخامت نقره را با زمان لایه‌نشانی ۴۰ و ۴۵ ثانیه نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، ضخامت لایه نقره نمی‌تواند به طور پیوسته افزایش یابد، چون در کاربرد پوشش‌های کم گسیل در شیشه ساختمانی، استفاده از نور روز پارامتر مهمی برای ارزیابی این شیشه‌ها محسوب می‌شود که با افزایش ضخامت لایه نقره، کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقدار عبور طیف مرئی نور خورشید به وجود می‌آید.

شکل ۴-۲۱ رابطه ضریب بازتاب فرسرخ و مقاومت سطحی لایه‌ها را با زمان لایه‌نشانی  $A_g$  نشان می‌دهد. افزایش ضخامت نقره با افزایش تراکم حامل‌های آزاد، به کاهش مقاومت سطحی و به افزایش رسانندگی و بازتاب فرسرخ از فیلم منجر می‌شود.

<sup>1</sup> mean free path

<sup>2</sup> figure of merit



شکل ۴-۲۱ نمودار مقاومت الکتریکی سطحی و تراکم حامل‌ها (بالا) و نمودار مقاومت الکتریکی سطحی و بازتاب در محدوده فروسرخ (پایین) برای لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برحسب زمان لایه‌نشانی Ag از ۱۰ تا ۴۵ ثانیه

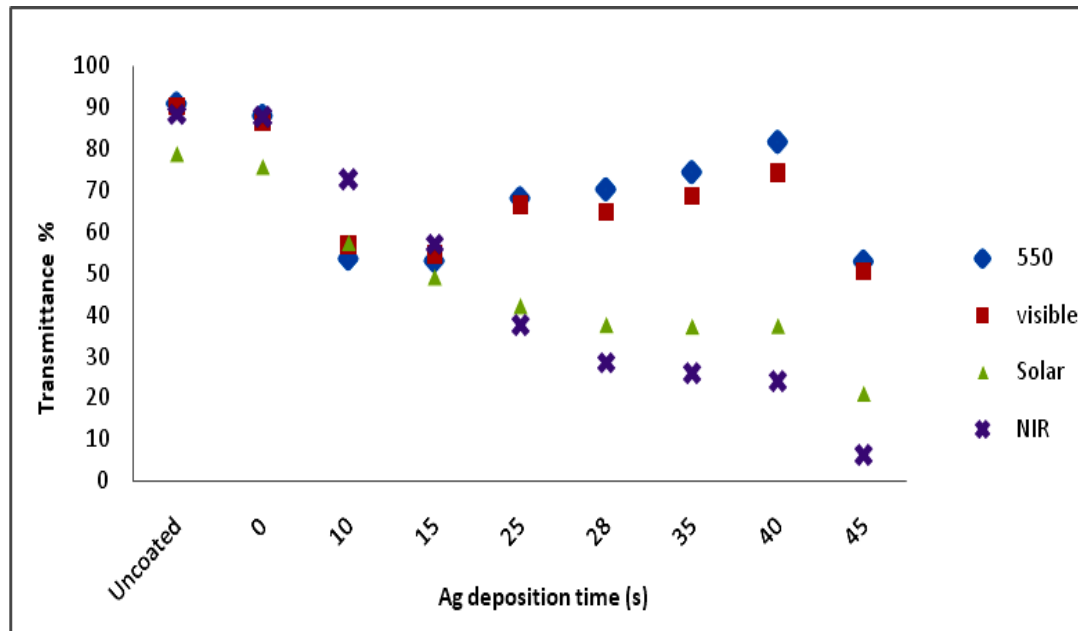


#### ۴-۴-۴ بررسی ویژگی‌های اپتیکی در طیف مرئی و فروسرخ در دماهای مختلف نمونه هنگام آزمون اسپکتروسکوپی

##### ۱-۴-۴-۴ بررسی ویژگی‌های اپتیکی در طیف مرئی و فروسرخ در دمای اتاق

در این بخش، برای بررسی چندلایه‌ها با هدف کاهش بازتاب فروسرخ، لایه نقره با زمان لایه‌نشانی ۱۰ تا ۴۵ ثانیه لایه‌نشانی شد.

با توجه به شکل ۴-۲۲، بهترین عملکرد پوشش سه لایه ZnO/Ag/ZnO در طیف مرئی با زمان لایه‌نشانی ۴۰ ثانیه برای لایه نقره با ضریب عبور مرئی حدود ۸۲٪ به دست آمد. همان‌طور که قبلاً هم ذکر شد، بهترین عملکرد شیشه در ساختمان، با حداکثر عبور در طیف مرئی و حداکثر بازتاب در طیف فروسرخ به دست می‌آید.



شکل ۴-۲۲ ضریب عبور از لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های مختلف لایه‌نشانی Ag

ضرایب عبور و بازتاب این پوشش‌ها همراه با نسبت ضریب عبور مرئی به خورشیدی در جدول

۶-۴ لیست شده است.

جدول ۶-۴ ضریب عبور و بازتاب برای لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های مختلف لایه‌نشانی Ag و تعیین طول موج گذار

ZnO deposition time (s)	$T_{vis}$ %	$T_{solar}$ %	$T_{NIR}$ %	$R_{NIR}$ %	$T_{vis}/T_{solar}$	$\lambda_T$ (nm)
شیشه معمولی بدون پوشش	۹۰	۷۹	۸۸	۱۶	۱٫۱۴	-
۱۰	۵۷	۵۸	۷۳	۱۷	۰٫۹۹	-
۱۵	۵۵	۴۹	۵۷	۱۷	۱٫۱	-
۲۵	۶۵	۴۲	۳۸	۳۲	۱٫۵	۱۵۷۷
۲۸	۶۵	۳۸	۲۸	۳۳	۱٫۷	۱۱۹۹
۳۵	۶۹	۳۷	۲۶	۵۶	۱٫۸	۹۴۲
۴۰	۷۴	۳۸	۲۴	۶۳	۲٫۰	۹۳۰
۴۵	۵۱	۲۱	۶	۸۸	۲٫۴	۵۷۶

همان‌طور که در جدول ۶-۴ نشان داده شده است، با لایه‌نشانی نقره با زمان ۱۰ و ۱۵ ثانیه بین

دو لایه ZnO، کاهش محسوس ضریب عبور در ناحیه مرئی مشاهده می‌شود. این کاهش را می‌توان به

شکل‌گیری لایه نقره به صورت جزیره‌ای در ضخامت‌های بسیار نازک نسبت داد. این ساختار جزیره‌ای

باعث پراکندگی فوتون‌ها در طول موج مرئی می‌شود. سپس با افزایش ضخامت نقره در زمان‌های

لایه‌نشانی ۲۵، ۲۸، ۳۵ و ۴۰ ثانیه به دلیل تغییر ساختار نانوذرات نقره آگلومره‌ی جزیره‌ای به لایه

فوق نازک پیوسته و کاهش پراکندگی فوتون‌ها، عبور در ناحیه مرئی تا رسیدن به ضخامت بهینه افزایش می‌یابد [۱۴۲, ۱۴۳]. همچنین با افزایش ضخامت نقره، پلاسمون‌های سطحی جایگزیده در نزدیکی خوشه‌ها و مرزها کاهش یافته و جذب توسط آنها کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل ۴-۲۲ مشاهده می‌شود، ضریب عبور بهینه در ناحیه مرئی فیلم‌های ZnO/Ag/ZnO،  $T_{vis} = 74\%$ ، برای ۴۰ ثانیه لایه‌نشانی نقره به دست آمد. برای ضخامت‌های بیشتر از مقدار بهینه، با لایه‌نشانی نقره ۴۵ ثانیه، مقدار ضریب عبور مرئی به ۵۰٪ کاهش می‌یابد. این رفتار می‌تواند ناشی از افزایش جذب و بازتاب در ضخامت‌های بیشتر نقره باشد.

برای بررسی اپتیکی نمونه‌ها در طیف فرورسرخ، مجدداً به بررسی نمودار شکل ۴-۲۲ می‌پردازیم. در این نمودار، تک لایه‌ی ZnO با زمان لایه‌نشانی ۳۰۰ ثانیه همچنان عبور زیادی را در این طیف نشان می‌دهد. اندازه‌گیری‌ها نشان داد با افزایش ضخامت نقره تراکم حامل‌های آزاد افزایش یافته و چون الکترون‌های بیشتری برای جذب در دسترس هستند پس جذب حامل‌ها افزایش می‌یابد.

از طرفی بر اساس قضیه درود در مورد افزایش رسانندگی با افزایش تراکم حامل‌ها مطابق فرمول

زیر داریم:

$$\sigma = \frac{n \cdot e^2 \cdot \tau}{m} \quad (10-4)$$

که در آن  $\sigma$  رسانندگی،  $n$  تراکم حامل‌های آزاد،  $\tau$  زمان آزاد میانگین،  $e$  و  $m$  بار و جرم الکترون می‌باشد.

همچنین مقاومت سطحی با افزایش رسانندگی کاهش می‌یابد:

$$R_{sh} = \frac{1}{\sigma \cdot d} \quad (11-4)$$

که در آن  $R_{sh}$  مقاومت سطحی فیلم و  $d$  ضخامت آن می‌باشد.

اما در ضخامت‌های بیشتر با زمان لایه‌نشانی ۳۵ و ۴۵ ثانیه لایه‌نشانی نقره چون رسانندگی فیلم با افزایش الکترون‌های آزاد افزایش می‌یابد پس بازتاب در فرکانس‌های کم (طول موج‌های زیاد) بر جذب حامل‌ها غلبه کرده و به شدت افزایش می‌یابد (جدول ۴-۶). به عبارت دیگر ارتباط بین بازتاب اپتیکی و رسانندگی الکتریکی در فرکانس‌های کم از معادله هاگن-روبنز<sup>۱</sup> به دست می‌آید. بر اساس این رابطه بازتاب اپتیکی در فرکانس‌های بسیار کم (طول موج‌های زیاد طیف فرورسرخ) با افزایش رسانندگی، افزایش می‌یابد. در این تحقیق برای فیلم با ۴۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی نقره، با بالاترین ضریب عبور مرئی، مقاومت سطحی ۹/۱۵ اهم بر مترمربع و ضریب بازتاب فرورسرخ ۶۲/۸٪ به دست آمده است.

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، نسبت ضریب عبور مرئی به خورشیدی برای عملکرد مناسب شیشه گم گسیل مقدار بیشتری دارد. همچنین بازتاب تابش گرمایی طیف خورشیدی در محدوده فرورسرخ در این موارد باید مقدار بزرگتری داشته باشد. مقدار بهینه این نسبت برای زمان لایه‌نشانی ۴۰ ثانیه نقره با ضریب بازتاب ۶۳٪ مقداری برابر ۲ به دست آمد.

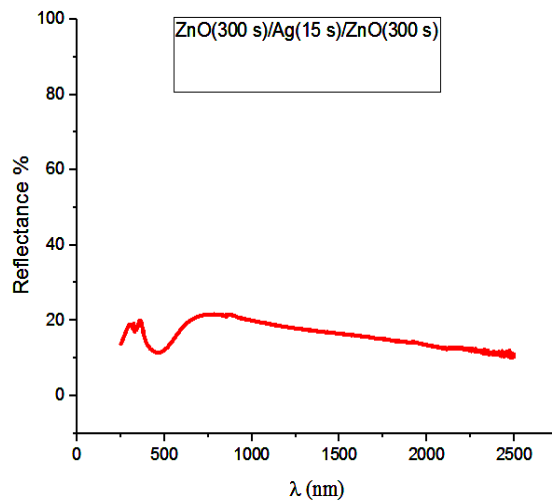
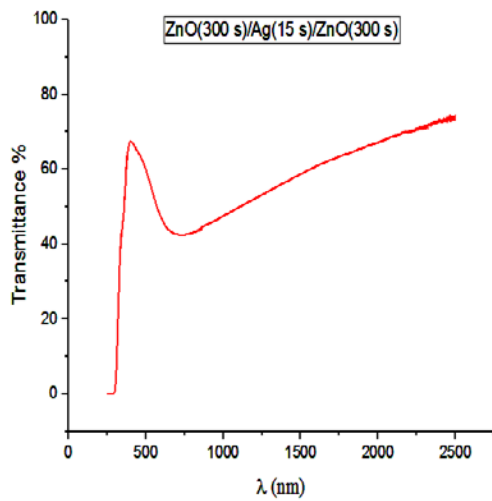
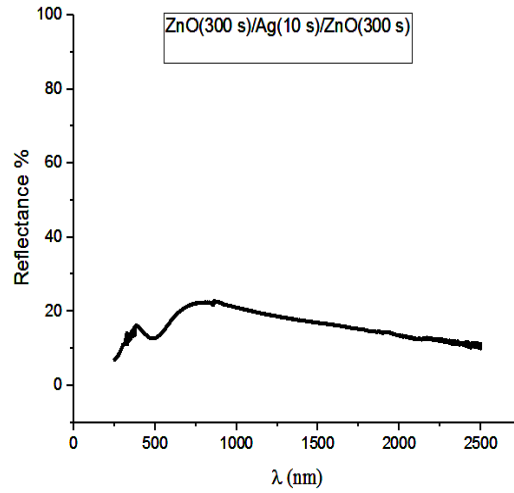
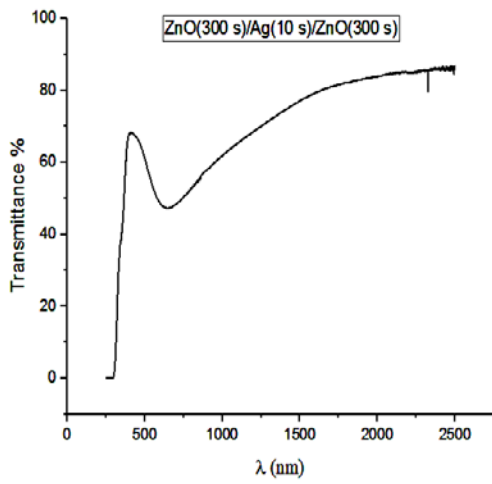
با توجه به مقادیر طول موج گذار  $\lambda_T$  در جدول ۴-۶، مشاهده می‌شود که طول موج گذار با افزایش ضخامت نقره شیفت آبی دارد. همان‌طور که در جدول مشخص شده است، پوشش‌های با زمان‌های کمتر لایه‌نشانی نقره که  $\lambda_T > 1\mu m$  است، چون قسمتی از تابش گرمایی خورشید را عبور می‌دهند و بهره خورشیدی مناسبی دارند، برای کاربرد در اقلیم‌های سرد پیشنهاد می‌گردند و پوشش‌هایی با ضخامت بیشتر نقره که  $\lambda_T < 1\mu m$ ، می‌تواند به عنوان پوشش کنترل‌کننده خورشیدی که طول موج‌های فرورسرخ را بازتاب می‌کنند برای اقلیم گرم توصیه می‌شوند.

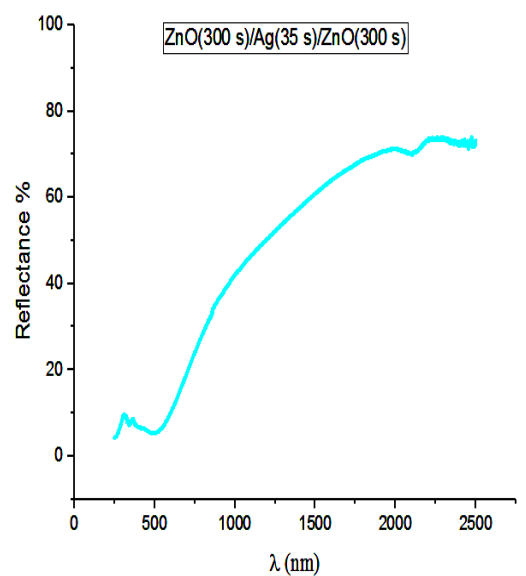
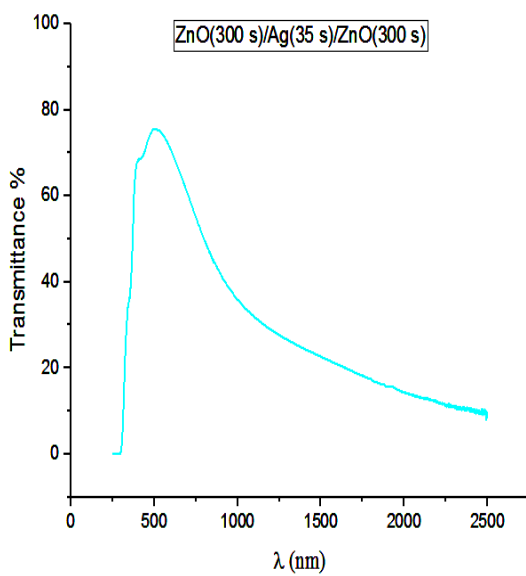
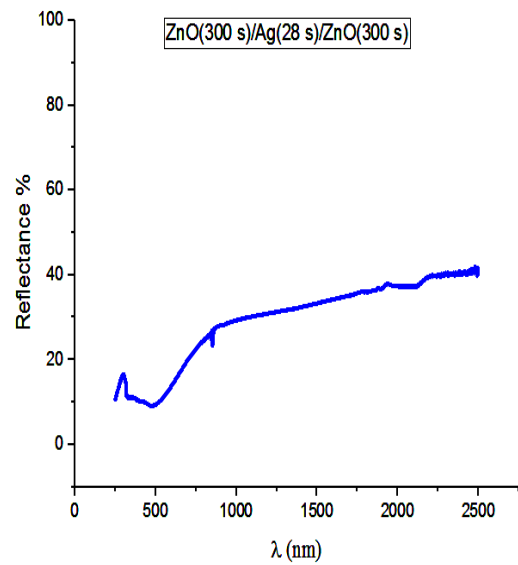
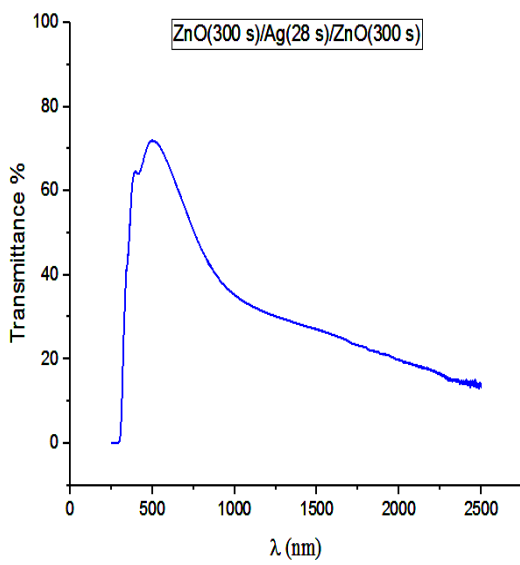
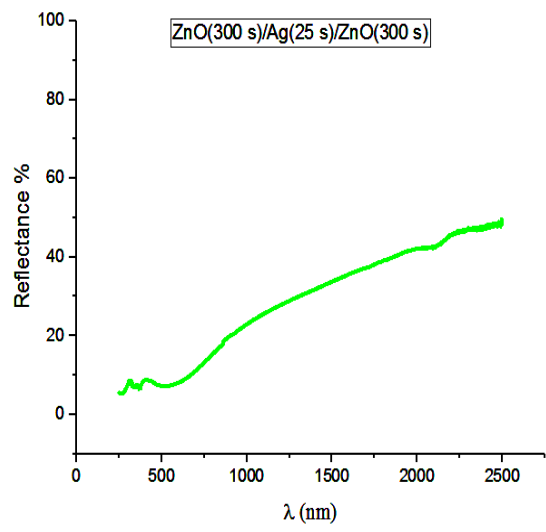
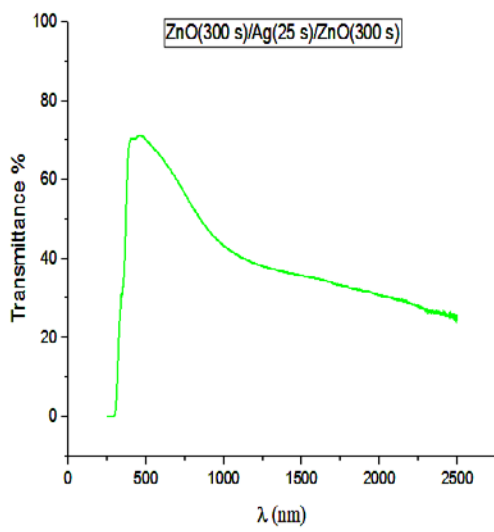
---

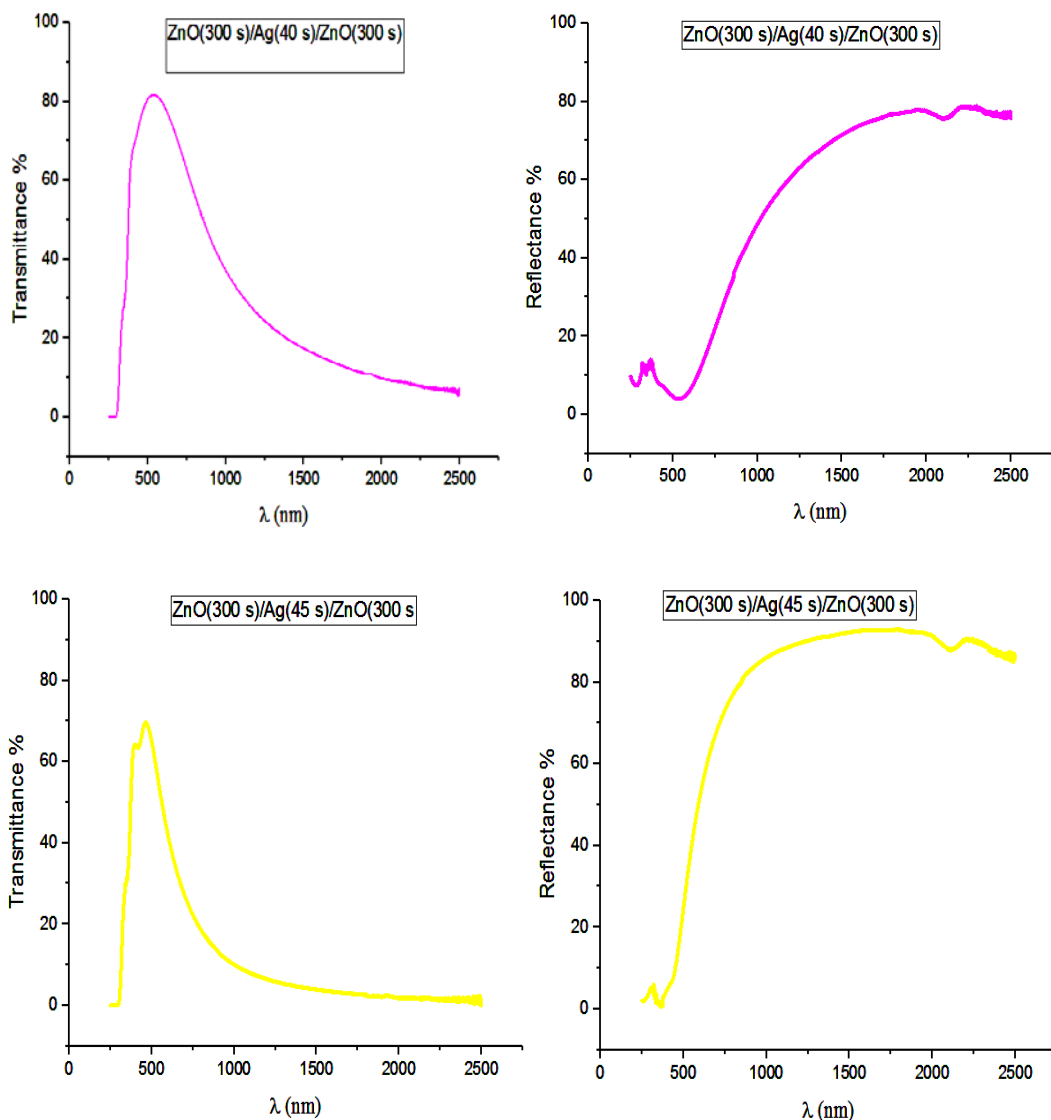
<sup>1</sup> Hugen-Robens

شکل ۴-۲۳ طیف عبور و بازتاب نمونه‌های چند لایه ZnO/Ag/ZnO را با زمان‌های مختلف

۱۰ تا ۴۵ ثانیه برای لایه‌نشانی نقره نشان می‌دهد.

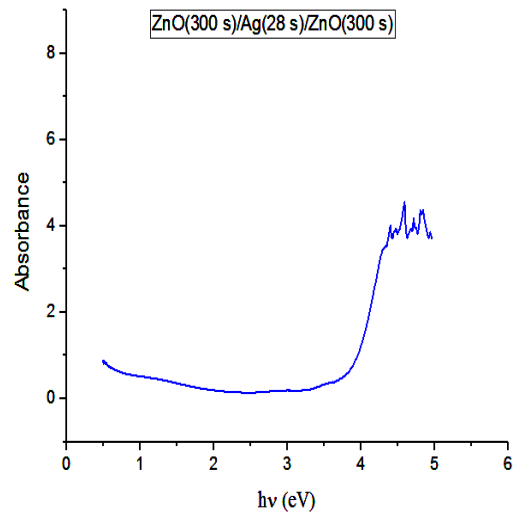
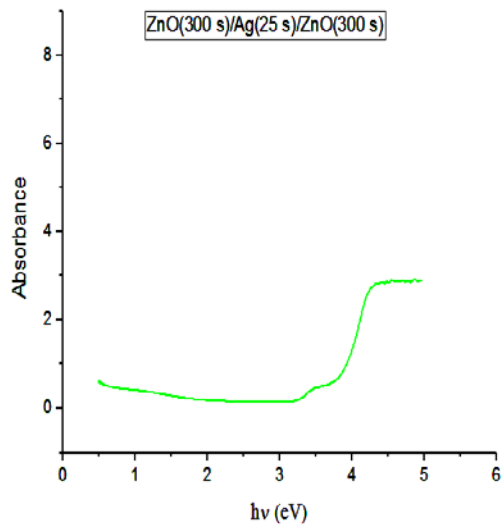
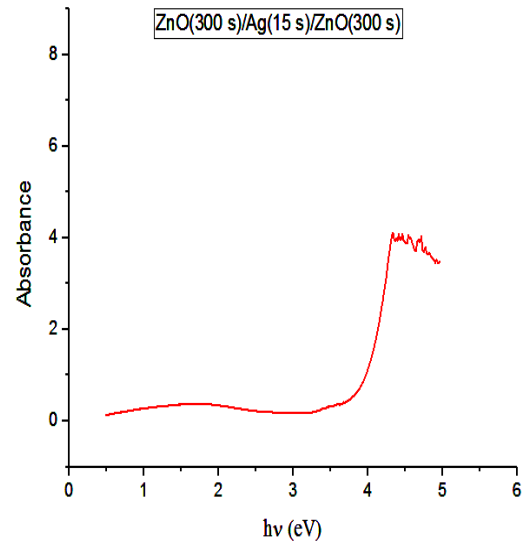
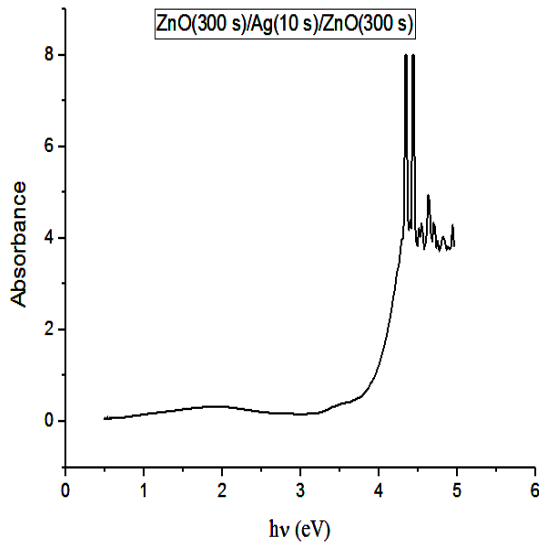




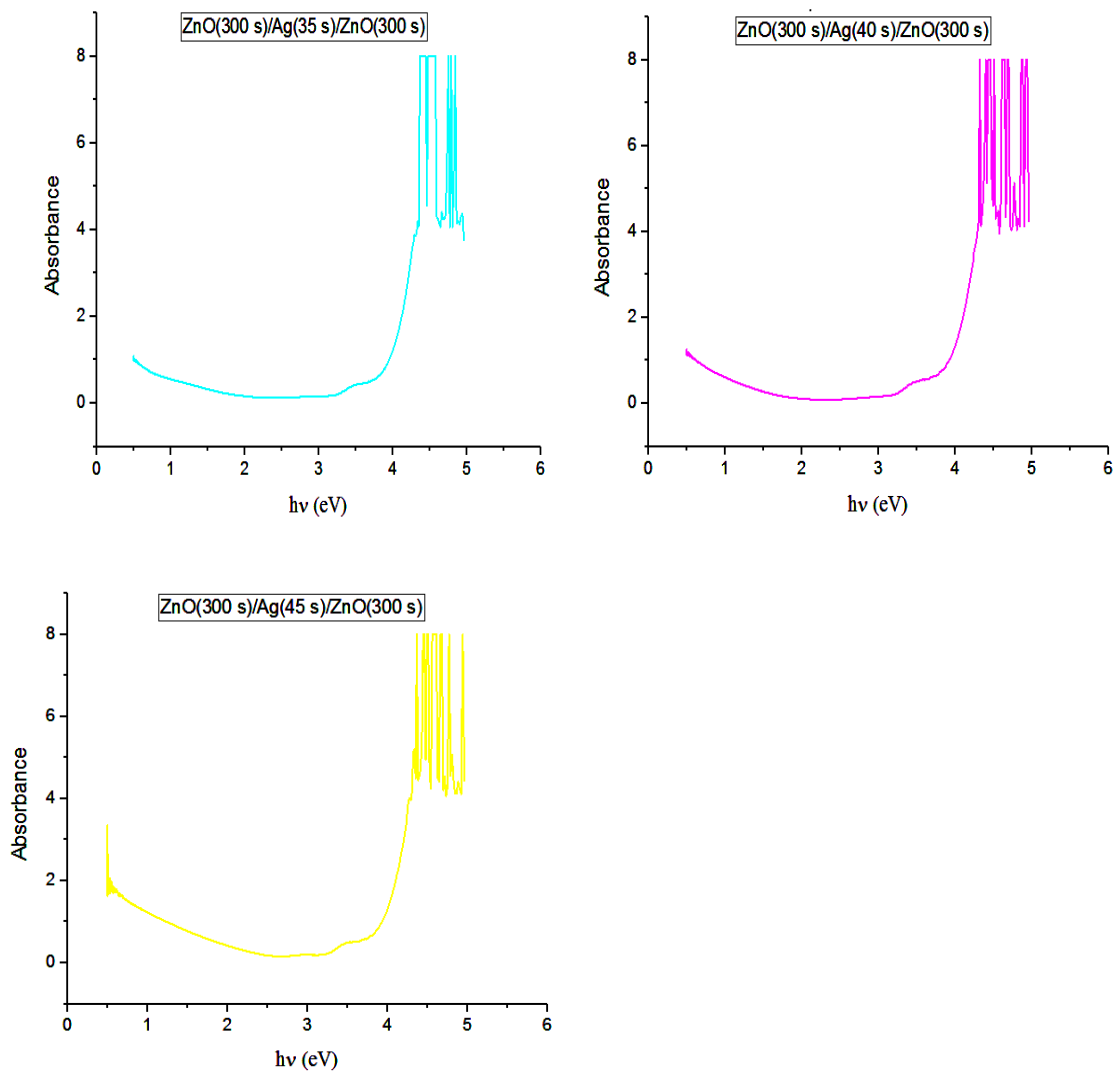


شکل ۴-۲۳ طیف عبور (سمت چپ) و بازتاب (سمت راست) از لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های مختلف لایه‌نشانی نقره

برخلاف حالت بالک فلزی که جذب الکترون آزاد در ناحیه فرسرخ اتفاق می‌افتد، فیلم نانوذرات فلزی (فیلم‌های بسیار نازک نانومتری) رزونانس پلاسمون سطحی جایگزیده، جذب در محدوده مرئی از خود نشان می‌دهد [۱۴۴]. بنابراین وقتی تراکم حامل‌ها از  $2 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$  بیشتر شود، فرکانس پلازما اتفاق افتاده و لبه جذب به محدوده مرئی شیفت پیدا کرده و عبور مرئی کاهش می‌یابد.







شکل ۴-۲۴ طیف جذب از لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های لایه‌نشانی نقره

از ۱۰ تا ۴۵ ثانیه

تراکم الکترونی کم می‌تواند اثر استتار الکترون آزاد<sup>۱</sup> را در فیلم‌های با ضخامت بسیار نازک نقره کاهش داده و در نتیجه گذارهای<sup>۲</sup> بین‌نواری جایگزین جذب درود<sup>۳</sup> (الکترون‌های آزاد) می‌شود [۱۴۵].

<sup>۱</sup> free-electron screening effect

<sup>۲</sup> interband transitions

<sup>۳</sup> Drude absorption

همان‌طور که در بخش قبل هم گفته شد، با افزایش ضخامت لایه فلزی، مسیرهای اتصال بین ذرات مجاور هم برقرار شده و می‌تواند الکترون‌ها را از حالت جایگزیده داخل تک ذره خارج کرده و تحرک‌پذیری الکترون‌ها به شدت افزایش می‌یابد.

محاسبه گاف انرژی از لبه جذب برای فیلم‌ها در شکل ۴-۲۵ زیر به دست آمد:

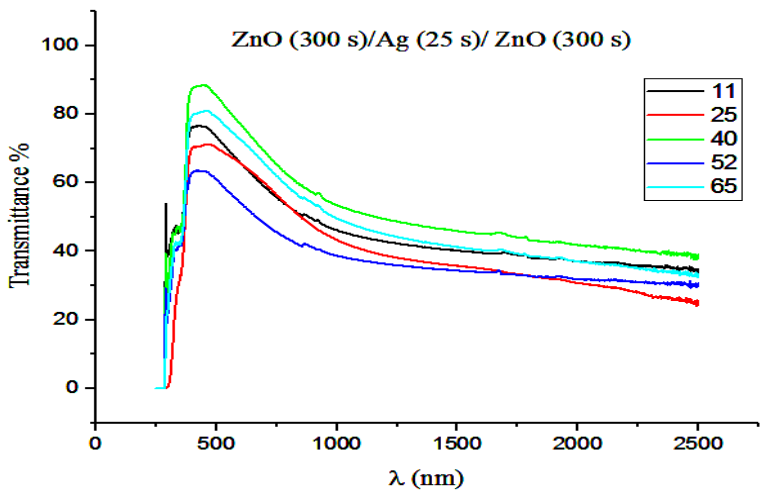
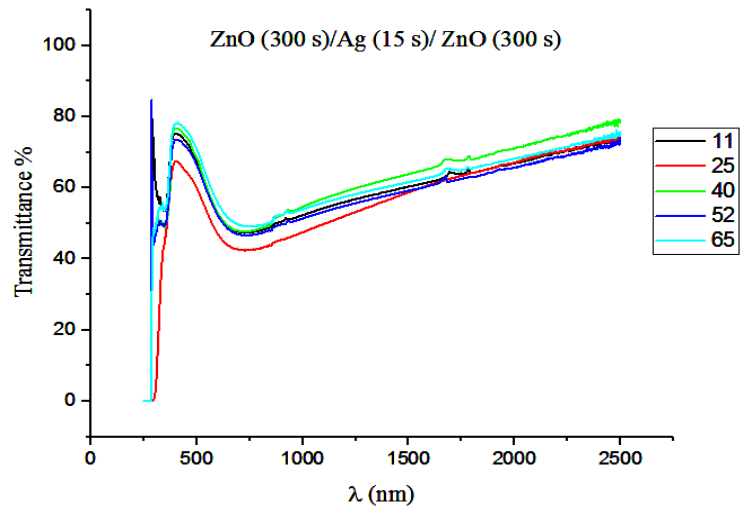
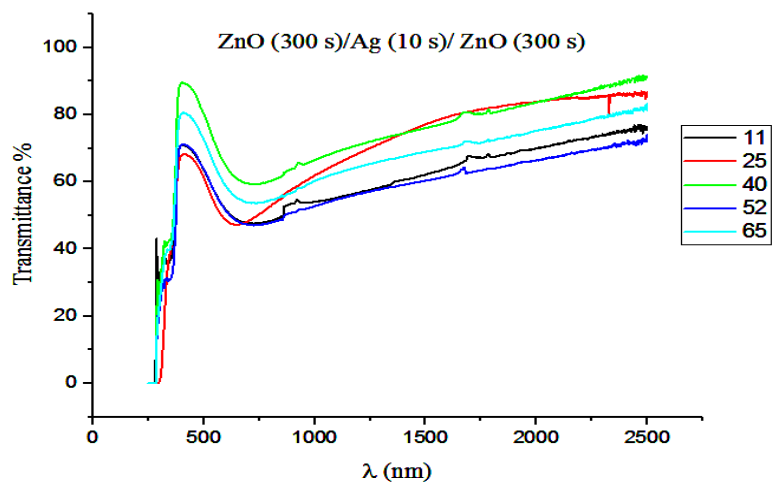
Ag deposition time in ZnO/Ag/ZnO (s)	$E_g$ (eV)
۱۰	۴٫۰۵
۱۵	۴٫۰۷
۲۸	۴٫۰۸
۳۵	۴٫۱۰
۴۰	۴٫۱۱
۴۵	۴٫۱۳

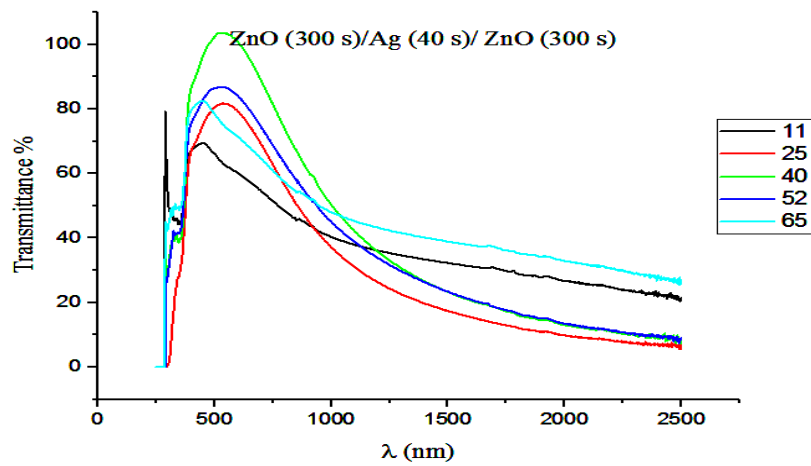
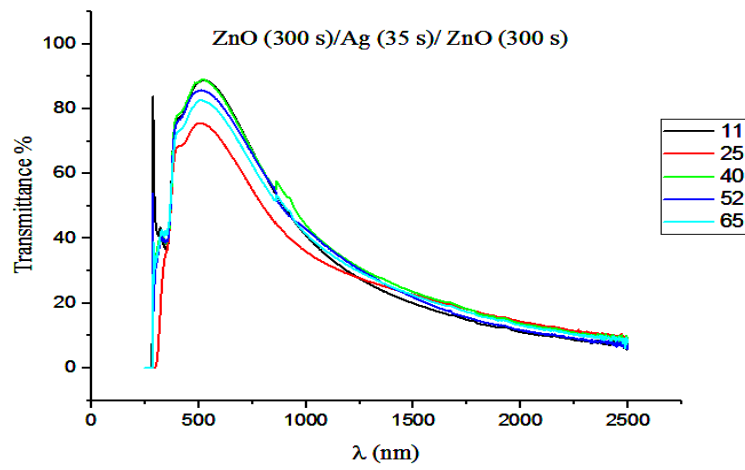
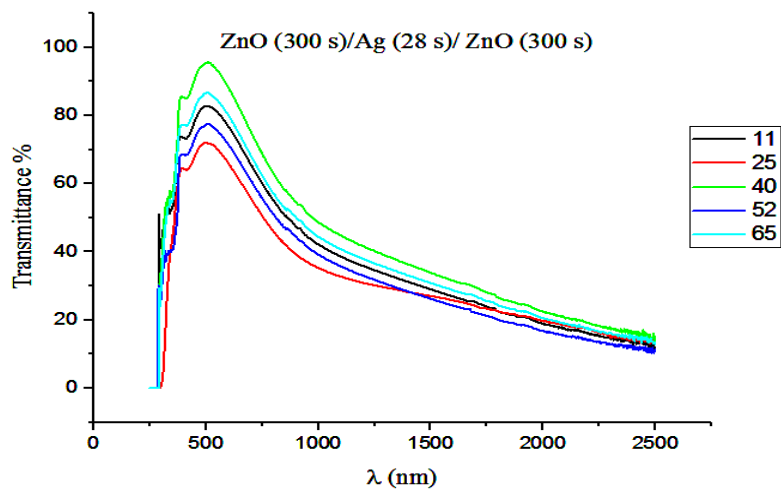
شکل ۴-۲۵ تعیین گاف انرژی لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های لایه‌نشانی نقره از ۱۰ تا ۴۵ ثانیه

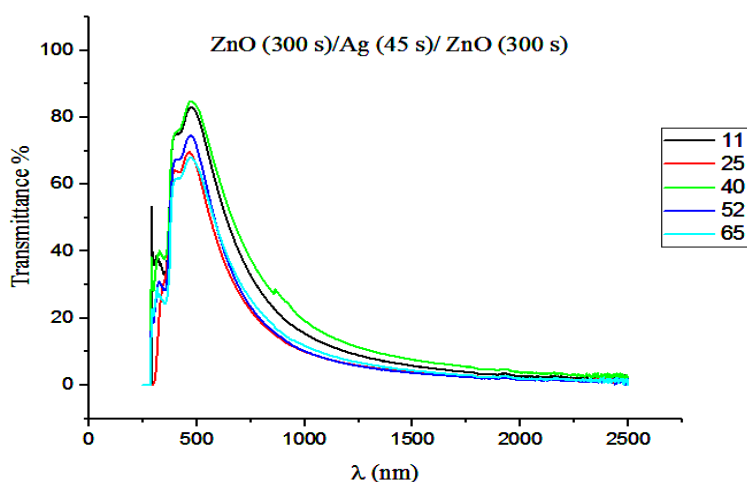
همان‌طور که مشاهده می‌شود، در فیلم‌های نازک‌تر با تراکم حامل‌های بار کمتر،  $E_g$  کاهش می‌یابد.

۲-۴-۴-۴ بررسی طیف مرئی و فروسرخ لایه‌های ZnO/Ag/ZnO در دماهای  $0^{\circ}\text{C}$ ،  $11^{\circ}\text{C}$ ،  $25^{\circ}\text{C}$ ،  $40^{\circ}\text{C}$ ،  $52^{\circ}\text{C}$ ،  $65^{\circ}\text{C}$

در بررسی طیف عبور نمونه‌ها در دماهای مختلف هنگام آزمون اسپکتروسکوپی نتایج زیر به دست آمد.







شکل ۴-۲۶ نمودار طیف عبور برای لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های لایه‌نشانی Ag

از ۱۰ تا ۴۵ ثانیه در دماهای مختلف  $11^{\circ}\text{C}$ ،  $25^{\circ}\text{C}$ ،  $40^{\circ}\text{C}$ ،  $52^{\circ}\text{C}$ ،  $65^{\circ}\text{C}$

در این نمودارها نیز پیک طیف مرئی برای نمونه با دمای ۴۰ درجه حدود ۲۰ درصد افزایش عبور

نسبت به اندازه‌گیری اسپکتروسکوپی در دمای اتاق را نشان می‌دهد.

#### ۵-۴-۴ بررسی ویژگی‌های حرارتی

برای کاهش انتقال حرارت از شیشه از طریق تابش، استفاده از شیشه پوشش‌دار کم‌گسیل یا کنترل‌کننده انرژی به عنوان راه حلی مطلوب مطرح می‌شود. همان‌طور که قبلاً هم بیان شد، استفاده از این پوشش‌ها با بازتاب طیف فروسرخ خورشید که مسئول گرم شدن محیط در معرض تابش می‌باشد، عبور، جذب و در نهایت گسیل از سطح را کاهش داده و کمک زیادی در صرفه‌جویی مصرف انرژی در ساختمان‌ها می‌کند. برای ارزیابی تاثیر ضخامت نقره بر عملکرد حرارتی شیشه پوشش‌دار کم‌گسیل که در این رساله به صورت پوشش‌های چندلایه، لایه‌نشانی شده است، با اندازه‌گیری پارامترهای اپتیکی مطابق جدول ۴-۷ و استفاده از این پارامترها در نرم افزار LBNL Window 7.1 شبیه‌سازی شرایط واقعی استفاده از این شیشه‌ها در ساختمان انجام گردیده‌است.

جدول ۴-۷ پارامترهای اپتیکی و گسیلندگی از لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های لایه‌نشانی Ag از ۱۰ تا ۴۵ ثانیه مورد استفاده در نرم افزار

ضرب گسیلندگی		ضرب انعکاس خورشیدی <sup>۴</sup> %		ضرب انعکاس نور مرئی <sup>۳</sup> %		ضرب عبور خورشیدی <sup>۲</sup> %	ضرب عبور نور مرئی <sup>۱</sup> %	نوع شیشه
بدون پوشش	طرف پوشش‌دار	بدون پوشش	طرف پوشش‌دار	بدون پوشش	طرف پوشش‌دار			
۰٫۸۴	۰٫۸۴	۹	۱۳	۱۰	۱۳	۵۴	۵۳	ZnO (300 s)/Ag (10 s)/ ZnO (300 s)
۰٫۸۴	۰٫۸۴	۶	۱۴	۶	۱۳	۴۶	۵۱	ZnO (300 s)/Ag (15 s)/ ZnO (300 s)
۰٫۸۴	۰٫۳	۱۱	۱۷	۴	۵	۳۹	۶۳	ZnO (300 s)/Ag (25 s)/ ZnO (300 s)
۰٫۸۴	۰٫۲۹	۲۰	۲۰	۶	۱۱	۳۵	۶۲	ZnO (300 s)/Ag (28 s)/ ZnO (300 s)
۰٫۸۴	۰٫۰۸	۱۸	۵۳	۵	۱۳	۳۴	۶۵	ZnO (300 s)/Ag (35 s)/ ZnO (300 s)
۰٫۸۴	۰٫۱۱	۱۴	۳۵	۵	۵	۳۴	۷۲	ZnO (300 s)/Ag (40 s)/ ZnO (300 s)
۰٫۸۴	۰٫۰۳	۴۹	۵۳	۳۰	۳۳	۱۹	۴۸	ZnO (300 s)/Ag (45 s)/ ZnO (300 s)
۰٫۸۴	۰٫۸۴	۷	۷	۸	۸	۷۷	۸۷	شیشه فلوت ساده

<sup>1</sup> Visible Transmittance

<sup>2</sup> Solar Transmittance

<sup>3</sup> Visible Reflectance

<sup>4</sup> Solar Reflectance

جدول ۴-۸ مقادیر ضریب انتقال حرارت و ضریب بهره حرارتی خورشید (SHGC) از لایه‌های ZnO/Ag/ZnO برای زمان‌های لایه‌نشانی Ag از ۱۰ تا ۴۵ ثانیه

زمان لایه نشانی Ag (S)	U-value ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )	SHGC پوشش روی سطح ۳	SHGC پوشش روی سطح ۲
۰	۲٫۷۳	۰٫۷۴۱	۰٫۷۴۱
۱۰	۲٫۷۲	۰٫۶۳۴	۰٫۵۳۷
۱۵	۲٫۷۲	۰٫۶۳۲	۰٫۴۸۶
۲۵	۱٫۹۵	۰٫۶۱۸	۰٫۴۷۷
۲۸	۱٫۹۳	۰٫۵۹۶	۰٫۴۷۶
۳۵	۱٫۴	۰٫۵۹۲	۰٫۴۴۵
۴۰	۱٫۴۹	۰٫۵۵۳	۰٫۴۳۳
۴۵	۱٫۲۴	۰٫۴۱	۰٫۲۸۸

با توجه به نتایج به دست آمده در این بخش، ویژگی‌های حرارتی و اپتیکی پوشش‌های سه لایه ZnO/Ag/ZnO برای ضخامت‌های متفاوتی از لایه نقره بررسی شدند. با توجه به هدف مورد نظر در کاربرد این پوشش در شیشه پنجره ساختمان، مقدار بهینه ضخامت نقره در پوشش سه لایه با ۷۴٪ ضریب عبور طیف مرئی، ۳۷٪ ضریب عبور طیف خورشیدی و ۲۴٪ ضریب عبور طیف فروسرخ برای ۴۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی نقره به دست آمد.

همان‌طور که در جدول ۴-۸ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب انتقال حرارت برای شیشه پوشش‌دار دوجداره پر شده با گاز آرگون، با ضخامت بهینه نقره (۴۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی نقره) در این رساله برابر  $1.49 W/(m^2.K)$  به دست آمد.

#### ۶-۴-۴ نتیجه‌گیری

- برای فیلم‌های مورد بررسی در این بخش، در ضخامت‌های بیشتر با زمان ۳۵ تا ۴۵ ثانیه برای لایه‌نشانی نقره، با توجه به این نکته که رسانندگی فیلم با افزایش الکترون‌های آزاد افزایش می‌یابد، بازتاب در فرکانس‌های کم (طول موج‌های زیاد) بر جذب حامل‌ها غلبه کرده و به شدت افزایش می‌یابد.
- همان‌طور که در جدول ۶-۴ مشاهده می‌شود، پوشش‌هایی با زمان‌های کمتر لایه‌نشانی نقره برای کاربرد در اقلیم‌های سرد و پوشش‌هایی با ضخامت بیشتر نقره در اقلیم گرم پیشنهاد می‌گردند .
- در فیلم‌های نازک‌تر با تراکم حامل‌های بار کمتر،  $E_g$  کاهش می‌یابد.
- در اقلیم سرد با نیاز به بهره‌رسانی حرارتی خورشیدی بالا، استفاده از پوشش با ضخامت کمتر نقره روی سطح ۳ و برای اقلیم گرم، پوشش با ضخامت بیشتر نقره روی سطح ۲ توصیه می‌شود.



#### ۵-۴ لایه‌نشانی ZnO/Ag/ZnO/Ag/ZnO با تغییر زمان لایه‌نشانی نقره در دو لایه

##### ۱-۵-۴ پارامترهای لایه‌نشانی

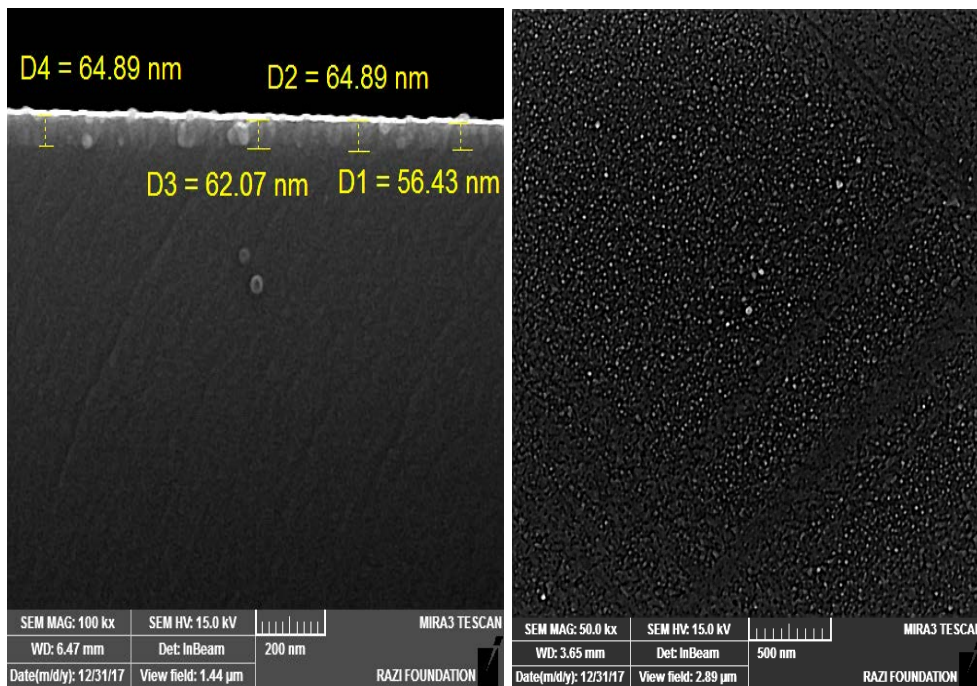
در این سری از نمونه‌ها، برای بررسی تاثیر ضخامت لایه فلزی در فیلمهای با یک یا دو لایه فلز نقره دو سری از فیلم‌ها لایه‌نشانی و ویژگیهای اپتیکی و الکتریکی آنها باهم مقایسه شد. در سری اول همه نمونه‌ها، اکسید روی به مدت ۳۰۰ ثانیه به عنوان دی‌الکتریک لایه‌نشانی شد. سپس بدون شکستن خلاء، نقره با زمان‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ ثانیه به عنوان لایه دوم و دوباره اکسید روی با شرایط یکسانی با لایه اول لایه‌نشانی شد. در سری دوم نمونه‌ها به عنوان پوشش‌های کم گسیل دولایه، پس از سومین لایه بدون شکستن خلاء دوباره لایه دیگری از نقره به عنوان چهارمین لایه با شرایط یکسان با لایه دوم لایه‌نشانی و برای جلوگیری از اکسیداسیون نقره، لایه دیگری از اکسید روی برای پنجمین لایه، لایه‌نشانی شد تا نمونه‌های کم گسیل با دو لایه نقره برای مقایسه با نمونه‌های سری اول آماده شوند.

##### ۲-۵-۴ تصاویر FESEM

تصاویر FESEM از سطح مقطع نمونه ساخته

ZnO (300 s)/Ag (20 s)/ ZnO (300 s)/ Ag (20 s)/ ZnO (300 s) در شکل ۴-۲۷ نشان داده شده

است. ضخامت کل برای این پوشش سه لایه حدود ۶۴ نانومتر به دست آمد.



شکل ۴-۲۷ تصاویر سطحی و برش مقطع لایه ZnO/Ag/ZnO/Ag/ZnO

با ۱۵ ثانیه زمان لایه‌نشانی نقره در هر لایه

#### ۴-۵-۳ بررسی ویژگی‌های الکتریکی

برای بررسی عملکرد الکتریکی لایه‌ها، ابتدا با دستگاه چهار-پراب، مقاومت سطحی ( $R_{sh}$ ) چندلایه‌ها اندازه‌گیری شد. سپس با دستگاه اثر هال به اندازه‌گیری تراکم حامل‌ها ( $n$ ) و تحرک پذیری ( $\mu$ ) پرداختیم و با استفاده از مقدار مقاومت سطحی، گسیلندگی ( $\epsilon$ ) را محاسبه کردیم. جدول ۴-۹ مقادیر مقاومت سطحی، گسیلندگی، تراکم حامل‌ها و تحرک پذیری برای چندلایه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۹-۴ پارامترهای الکتریکی اندازه‌گیری شده در پوشش‌های سه لایه و پنج لایه

Layers	$R_{sh}$ ( $\Omega/sq$ )	Resistivity ( $\Omega.cm$ )	$\epsilon$	$n$ ( $cm^{-3}$ )	$\mu$ ( $cm^2/V.s$ )
ZnO (300 s)/Ag (10 s)/ZnO (300 s)	۵۶,۱ M	-	-	-	-
ZnO (300 s)/Ag (10 s)/ZnO (300 s)/Ag (10 s)/ZnO (300 s)	۱۸,۱ M	-	-	-	-
ZnO (300 s)/Ag (20 s)/ZnO (300 s)	۵۲	$۷,۷ \times 10^{-۴}$	۰,۵	$۳,۴۹ \times 10^{۲۱}$	۲,۴
ZnO (300 s)/Ag (15 s)/ZnO (300 s)	۵,۸ M	-	-	-	-
ZnO (300 s)/Ag (15 s)/ZnO (300 s)/Ag (15 s)/ZnO (300 s)	۳,۴ k	-	-	-	-
ZnO (300 s)/Ag (30 s)/ZnO (300 s)	۱۸,۵	$۲,۷ \times 10^{-۴}$	۰,۲	$۳,۶ \times 10^{۲۱}$	۶,۳
ZnO (300 s)/Ag (30 s)/ZnO (300 s)	۱۸,۵	$۲,۷ \times 10^{-۴}$	۰,۲	$۳,۶ \times 10^{۲۱}$	۶,۳
ZnO (300 s)/Ag (30 s)/ZnO (300 s)/Ag (30 s)/ZnO (300 s)	۶,۳	$۶,۶ \times 10^{-۵}$	۰,۰۸	$۷,۷ \times 10^{۲۱}$	۱۲,۲
ZnO (300 s)/Ag (60 s)/ZnO (300 s)	۳,۰	$۴,۴ \times 10^{-۵}$	۰,۰۴	$۷,۸ \times 10^{۲۱}$	۱۷,۱

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در زمانهای کم لایه‌نشانی نقره ۱۰ و ۱۵ ثانیه، هم در پوشش‌های سه لایه و هم در پوشش ۵ لایه، به دلیل ساختار جزیره‌ای نقره مقاومت سطحی پوشش بسیار زیاد بوده و امکان اندازه‌گیری دیگر پارامترهای الکتریکی وجود نداشت. چون در حالت آمورف، افزایش مرز بین دانه‌ها به صورت دام حامل‌ها عمل کرده و مقدار مقاومت الکتریکی به شدت افزایش می‌یابد. همچنین بلورینگی ضعیف این چندلایه‌ها باعث کاهش تحرک‌پذیری می‌شود. چون در این لایه‌ها تعداد زیاد نواقص باعث پراکندگی زیاد شده و تحرک‌پذیری کاهش اما با افزایش ضخامت لایه میانی و بهبود بلورینگی لایه‌ها، تحرک‌پذیری نیز افزایش می‌یابد.

با افزایش ضخامت نقره در پوشش‌های سه لایه و هم در پوشش ۵ لایه، کاهش پراکندگی به دلیل بهبود بلورینگی، با افزایش تراکم حامل‌های آزاد و در نتیجه افزایش تحرک‌پذیری باعث بهبود مقاومت سطحی پوشش‌ها می‌شود. چون لایه نقره می‌تواند الکترون‌ها را به لایه اکسید روی تزریق کرده و مقاومت الکتریکی چندلایه‌ها را کاهش دهد. اما در نمونه‌های مختلف با ضخامت یکسان نقره در پوشش سه لایه ZnO (300 s)/Ag (60 s)/ZnO (300 s) در مقایسه با پوشش ۵ لایه

ZnO (300 s)/Ag (30 s)/ZnO (300 s)/Ag (30 s)/ZnO (300 s) پیوستگی و بلورینگی لایه نقره بهتر است. پس بزرگتر بودن اندازه بلورک‌ها، و به تبع آن، کاهش مقاومت سطحی در این پوشش‌ها به کم‌شدن گسیلندگی می‌انجامد.

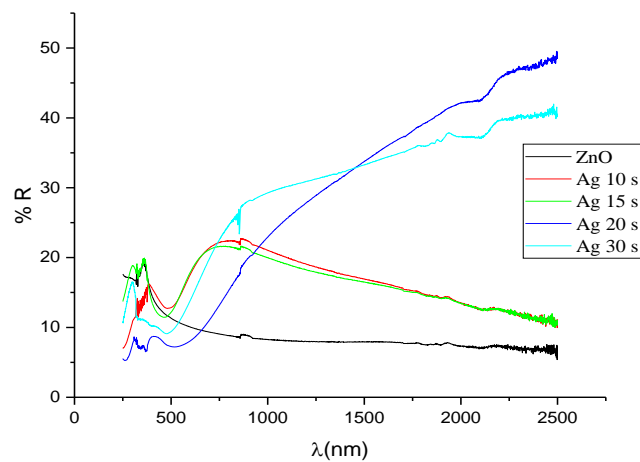
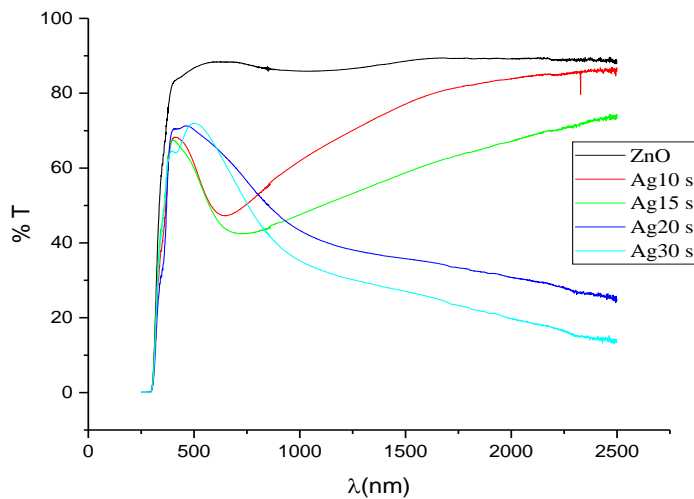
و در توافق با عملکرد اپتیکی مشاهده می‌شود که با کاهش گسیلندگی، توانایی پوشش برای بازتاب در ناحیه فرورسرخ به شدت افزایش می‌یابد. بنابراین همان‌طور که در شکل ۴-۲۸ مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت نقره عبور در ناحیه مرئی به دلیل کاهش پراکندگی ناشی از ذرات کپه شده جزیره‌ای و تبدیل آن به یک لایه پیوسته، افزایش می‌یابد. سپس با افزایش حامل‌های بار و افزایش رسانندگی، مقاومت سطحی و در نهایت گسیلندگی لایه کاهش یافته و بازتاب در ناحیه فرورسرخ افزایش می‌یابد.

#### ۴-۵-۴ بررسی ویژگی‌های اپتیکی در طیف مرئی و فرورسرخ در دماهای مختلف نمونه هنگام آزمون اسپکتروسکوپی

##### ۱-۴-۵-۴ بررسی ویژگی‌های اپتیکی در طیف مرئی و فرورسرخ در دمای اتاق

شکل ۴-۲۸ نمودارهای عبور و بازتاب از تک لایه اکسید روی همراه با نمودارهای سه لایه ZnO/Ag/ZnO با زمان‌های لایه‌نشانی ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ ثانیه برای لایه نقره را نشان می‌دهد. نتایج طیف عبور نشان می‌دهد همان‌طور که انتظار می‌رفت اکسید روی بیش از ۸۵٪ از طول موج‌های بالاتر از ۳۳۰ نانومتر را عبور می‌دهد. سپس در زمان‌های کم لایه‌نشانی نقره (۱۰ و ۱۵ ثانیه) به دلیل آگلومره بودن لایه جزیره‌ای نقره در ضخامت‌های کم، پراکندگی فوتونها در ناحیه مرئی افزایش یافته و عبور طیف مرئی کاهش و برای انرژی‌های کمتر (طول موج‌های بلندتر) عبور دوباره افزایش یافت. با افزایش ضخامت نقره با وجود تبدیل جزیره‌ها به فیلم یکنواخت اما ممکن است به دلیل افزایش جذب پلاسمون‌های سطحی، عبور در طیف مرئی حدود ۶۵ درصد بوده ولی به دلیل افزایش رسانندگی در

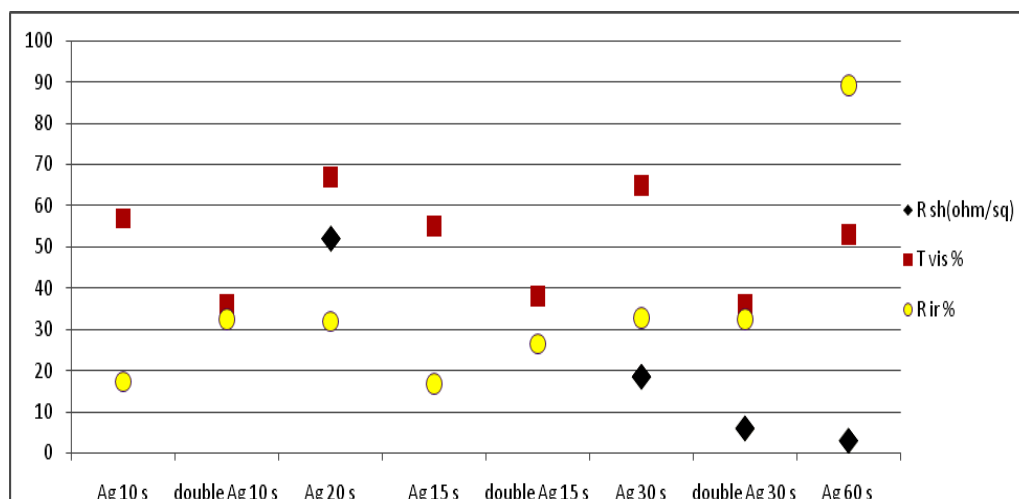
ضخامت بیشتر که تراکم حامل‌های آزاد لایه فلزی نقره افزایش می‌یابد، بازتاب طیف فروسرخ به شدت افزایش یافته و عبور کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۲۸ نمودار عبور (بالا) و بازتاب (پایین) تک لایه اکسید روی (ZnO) و سه لایه‌های ZnO/Ag/ZnO با زمان لایه‌نشانی نقره ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ ثانیه

با توجه به نمودارهای فوق، با افزایش ضخامت نقره، بازتاب در طیف فروسرخ افزایش یافته در

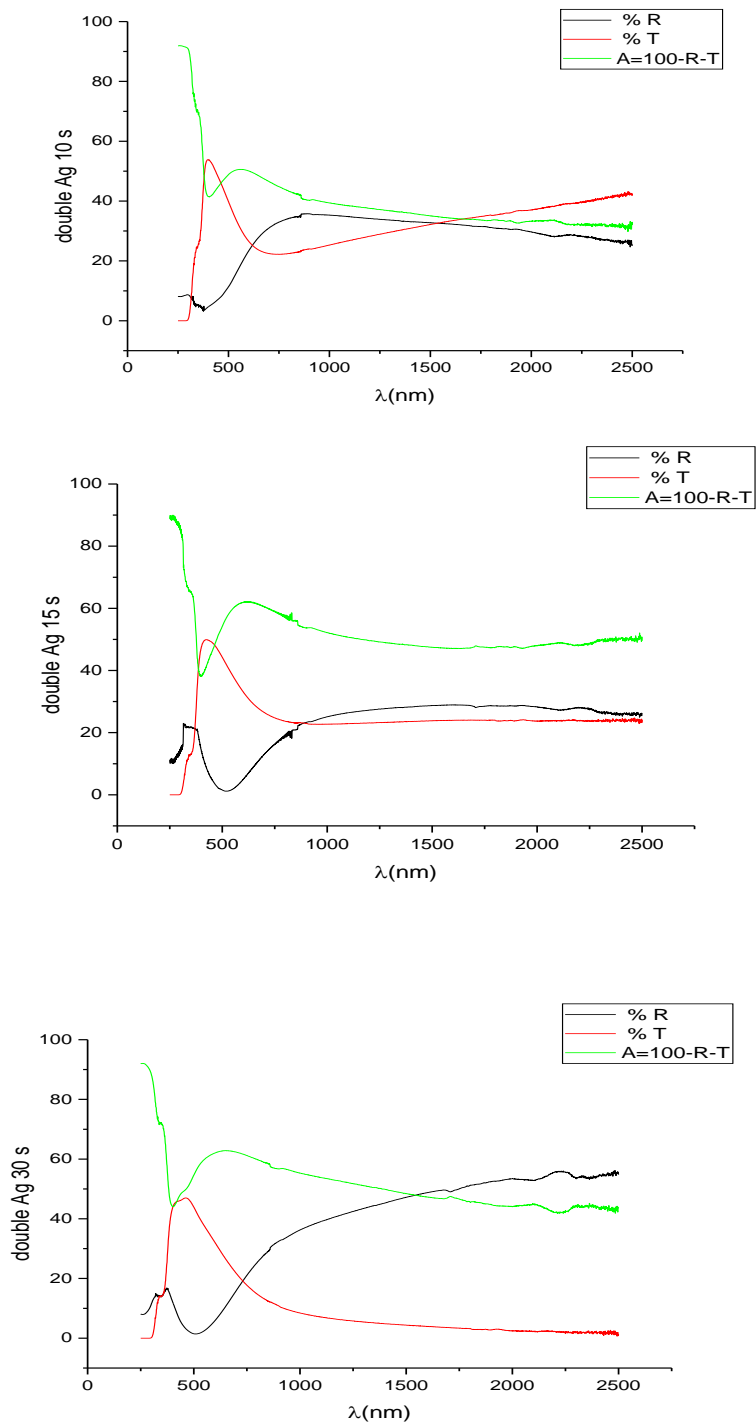
صورتی که در طیف مرئی تا ۳۰ ثانیه لایه‌نشانی نقره، کاهش محسوسی در عبور مشاهده نشد.



شکل ۴-۲۹ نمودار مقایسه پارامترهای اپتیکی و الکتریکی پوشش‌های با تک لایه و دو لایه نقره

همان‌طور که در شکل ۴-۲۹ مشاهده می‌شود، در تمام نمونه‌های سه لایه ضریب عبور مرئی و ضریب بازتاب فروسرخ بیشتر از نمونه ۵ لایه با ضخامت لایه فلزی یکسان است. به طور مثال برای نمونه با فیلم ۵ لایه با دو لایه نقره هر کدام با زمان لایه‌نشانی ۱۵ ثانیه، ضریب عبور مرئی حدود ۴۰ درصد و ضریب بازتاب فروسرخ حدود ۲۵ درصد است. درحالی‌که برای فیلم سه لایه با ۳۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی نقره، ضریب عبور مرئی حدود ۶۵ درصد و ضریب بازتاب فروسرخ حدود ۳۳ درصد می‌باشد.

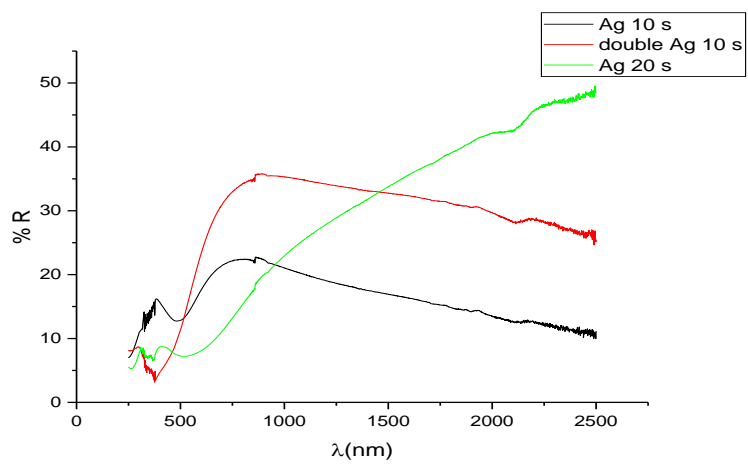
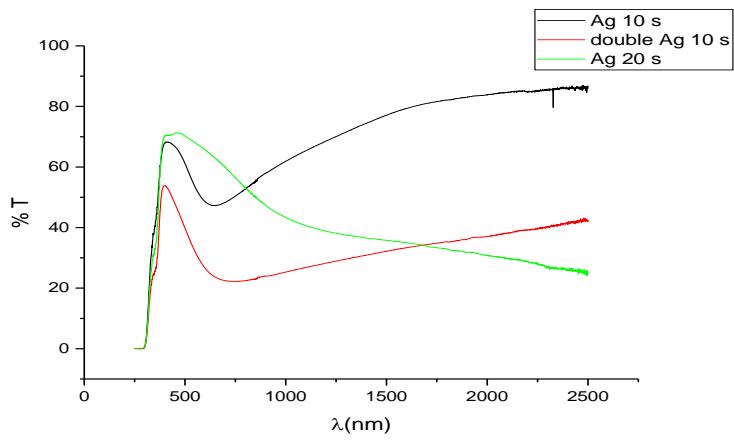
در شکل ۴-۳۰ نمودار طیف جذب، عبور و بازتاب برای این پوشش‌ها با دو لایه نقره نشان داده شده است. در همه پوشش‌های با دو لایه نقره با ۱۰ تا ۳۰ ثانیه زمان لایه‌نشانی، عبور و بازتاب در طیف مرئی تقریباً بدون تغییر بود اما در طیف فروسرخ به دلیل افزایش ضخامت نقره برای لایه‌نشانی ۱۵ ثانیه، تراکم حامل‌ها افزایش یافته و چون حامل‌های بیشتری در دسترس هستند، جذب فوتون‌ها با این حامل‌ها افزایش و عبور کاهش می‌یابد. اما با افزایش ضخامت نقره در دو لایه‌ها با ۳۰ ثانیه لایه‌نشانی نقره در هر لایه، به دلیل افزایش رسانندگی، بازتاب در ناحیه فروسرخ به شدت افزایش می‌یابد. بنابراین روند تغییرات طیف عبور و بازتاب در پوشش‌های با دو لایه نقره همانند پوشش‌های با یک لایه نقره مشاهده شد.

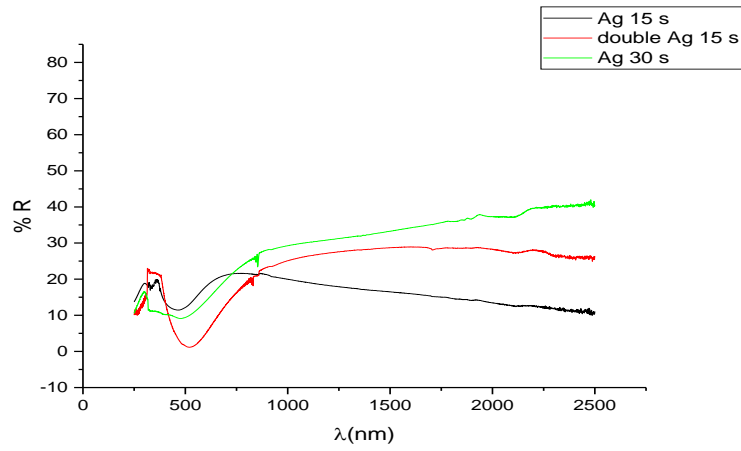
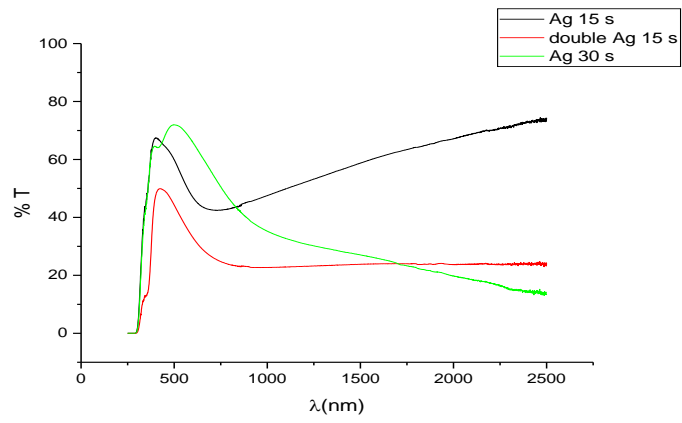


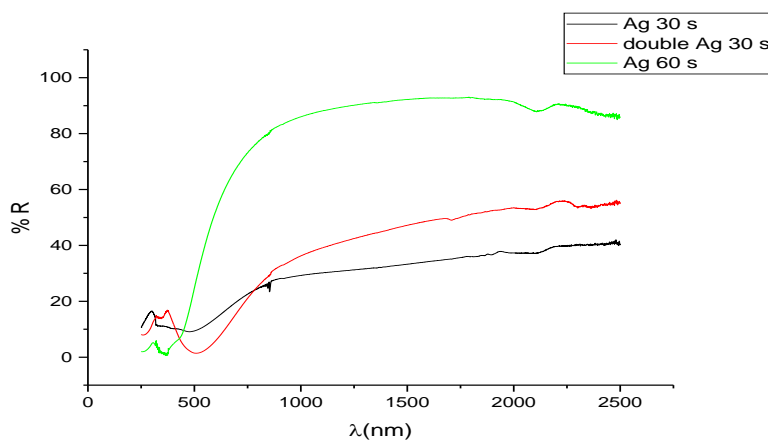
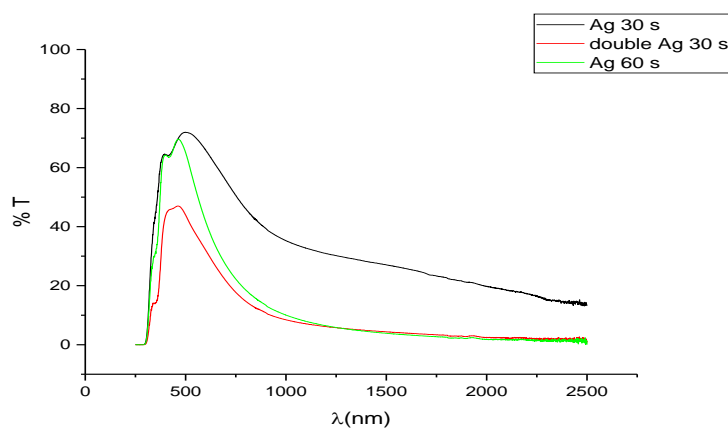
شکل ۴-۳۰ نمودار جذب، عبور و بازتاب پوشش‌های با دو لایه نقره با زمان لایه‌نشانی ۱۰، ۱۵ و ۳۰ ثانیه برای هر لایه

حال به مقایسه طیف عبور و بازتاب با توجه به ضخامت نقره در پوشش‌های با یک یا دو لایه نقره می‌پردازیم. در شکل ۴-۲۹ مشاهده می‌شود که در تمام موارد، طیف عبور در دو لایه نقره حدود ۲۰ درصد نسبت به تک لایه نقره کمتر بوده است. این در حالی است که اگر به جای دو لایه نقره یک لایه نقره با ضخامت دو برابر لایه‌نشانی می‌شد، عبور مرئی تقریباً بدون تغییر ولی بازتاب طیف فرسرخ در مواردی بیش از ۲ برابر می‌شد. از طرفی در پوشش‌های تک و دولایه نقره، عبور و بازتاب روند تغییرات طیف مشابهی را طی می‌کنند. این نشان می‌دهد که تغییر رفتار طیف عبور و بازتاب به پیوستگی لایه نقره وابسته است نه صرفاً به ضخامت آن. به طوری که با افزایش یک لایه نقره و اکسید روی به پوشش‌های سه لایه، همچنان ساختار فلز به صورت ناپیوسته و جزیره‌ای است و در این ساختار ممکن است رزونانس پلاسمون‌های سطحی یکی از فاکتورهای اصلی جذب اپتیکی لایه محسوب شده و این باعث کاهش عبور گردد. اما با دو برابر شدن زمان لایه‌نشانی نقره و افزایش ضخامت، کاهش جذب را می‌توان به کاهش تحریک پلاسمون‌های سطحی و کاهش جذب نور توسط آنها نسبت داد.









شکل ۴-۳۱ نمودار عبور و بازتاب پوشش‌های تک لایه و دو لایه نقره با زمان لایه‌نشانی ۱۰، ۱۵ و ۳۰ ثانیه برای هر لایه

در جدول زیر ضرایب عبور و بازتاب هر پوشش در بازه طیف مرئی و فروسرخ به دست آمده

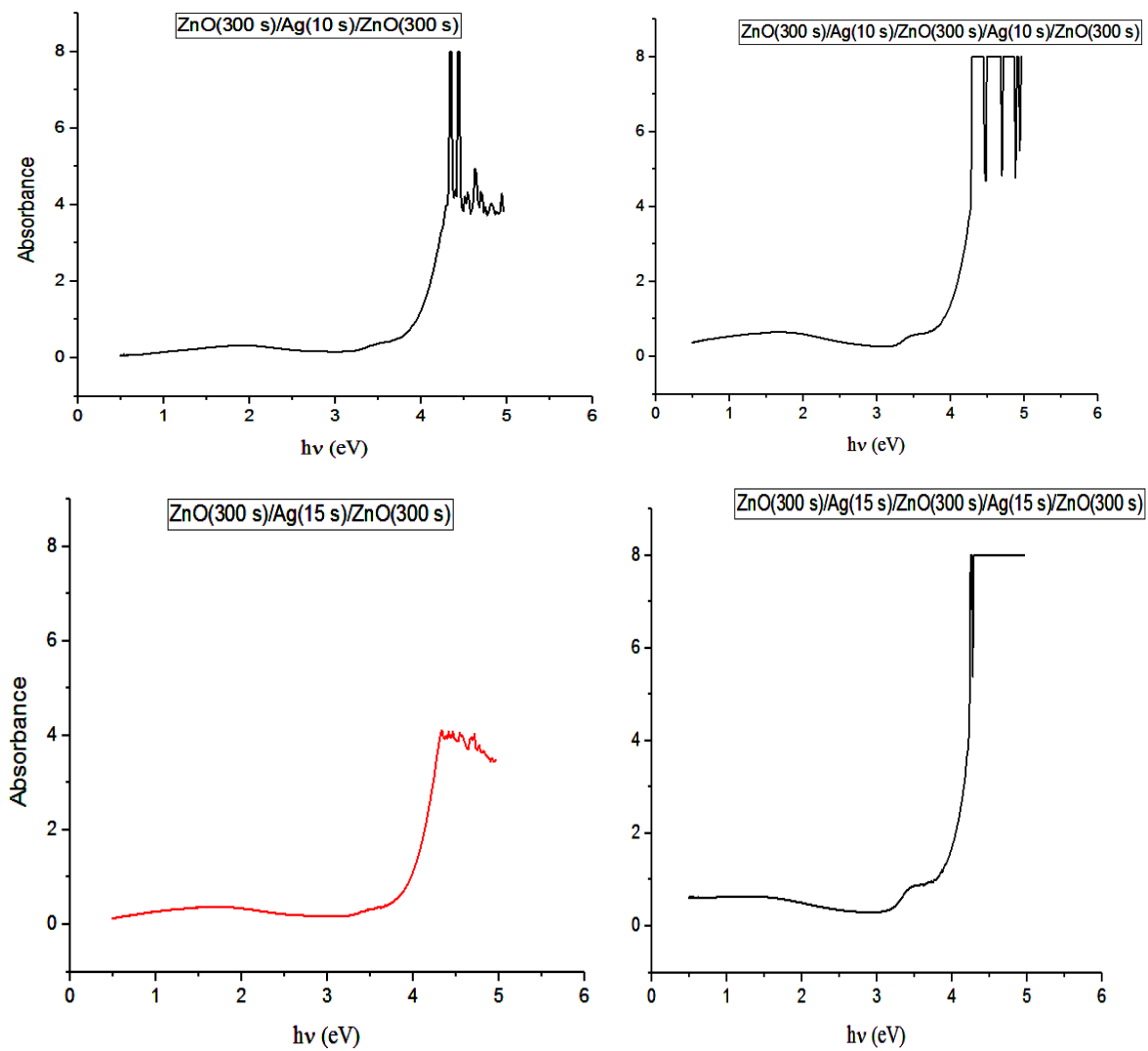
است.

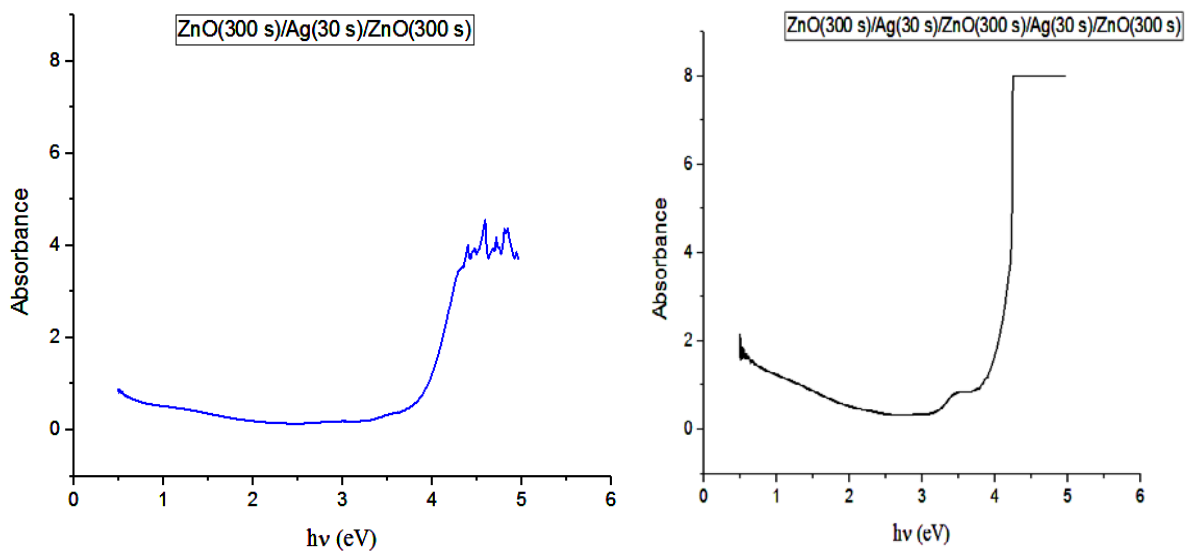
جدول ۴-۱۰ مقادیر ضریب عبور و بازتاب پوشش‌های سه لایه و پنج لایه در طیف مرئی و فروسرخ

Layers (deposition time)	T <sub>vis</sub> %	T <sub>Ir</sub> %	R <sub>vis</sub> %	R <sub>NIR</sub> %
ZnO (300 s)/Ag (10 s)/ZnO (300s)	۵۶٫۹	۷۲٫۶	۱۶٫۵	۱۷٫۴
ZnO (300 s)/Ag (10 s)/ZnO (300s)/Ag (10 s)/ZnO (300s)	۳۵٫۸	۳۱٫۱	۱۷٫۱	۳۲٫۵
ZnO (300 s)/Ag (20 s)/ZnO (300 s)	۶۶٫۵	۳۷٫۵	۸٫۷	۳۲
ZnO (300 s)/Ag (15 s)/ZnO (300 s)	۵۴٫۵	۵۷٫۱	۱۵٫۸	۱۷
ZnO (300 s)/Ag (15 s)/ZnO (300 s)/Ag (15 s)/ZnO (300s)	۳۸٫۳	۲۳٫۴	۷٫۷	۲۶٫۵
ZnO (300 s)/Ag (30 s)/ZnO (300 s)	۶۴٫۷	۲۸٫۳	۱۳٫۲	۳۳
ZnO (300 s)/Ag (30 s)/ZnO (300 s)	۶۴٫۷	۲۸٫۳	۱۳٫۲	۳۳
ZnO (300 s)/Ag (30 s)/ZnO (300 s)/Ag (30 s)/ZnO (300 s)	۳۵٫۸	۵٫۸	۸٫۲	۳۲٫۵
ZnO (300 s)/Ag (60 s)/ZnO (300 s)	۵۳	۰٫۱۵	۳۷	۸۹

- طیف جذب

شکل زیر طیف جذب سه لایه‌ها و پنج لایه‌ها را با هم مقایسه می‌کند.





شکل ۴-۳۲ نمودار جذب پوشش‌های تک لایه و دو لایه نقره

با زمان لایه‌نشانی ۱۰، ۱۵ و ۳۰ ثانیه برای هر لایه

همان‌طور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، در فیلم‌های دو لایه نقره پیک جذب در انرژی

$3.5 \text{ eV}$  که می‌تواند به جذب اکسیتون‌ها نسبت داده شود، به دلیل تراکم حامل‌های کم‌تر قابل

مشاهده است.

۲-۴-۵-۴ بررسی طیف مرئی و فرسرخ لایه‌های ZnO/Ag/ZnO /Ag/ZnO در دماهای  
 $11^{\circ}\text{C}$

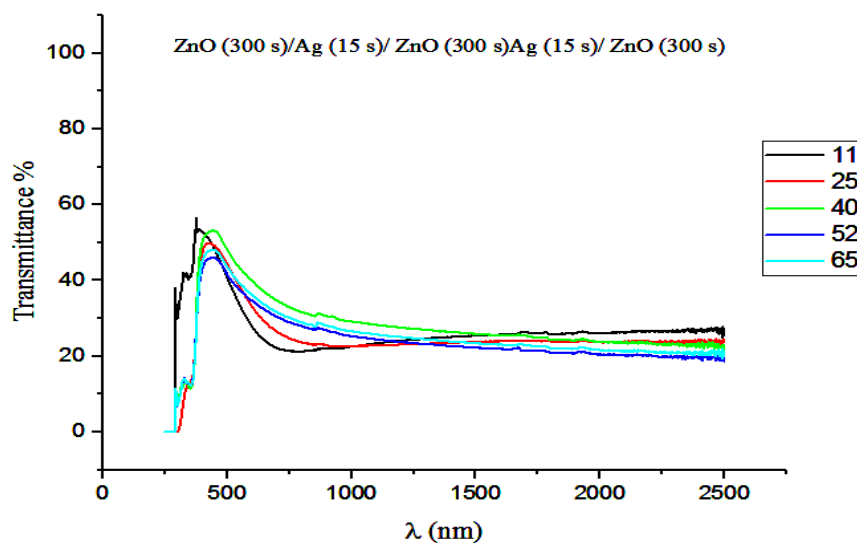
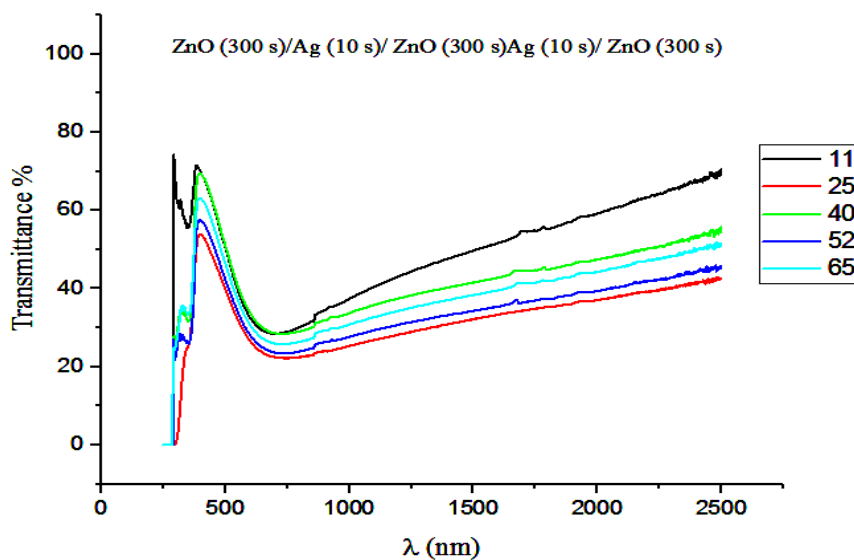
$25^{\circ}\text{C}$ ،  $40^{\circ}\text{C}$ ،  $52^{\circ}\text{C}$ ،  $65^{\circ}\text{C}$

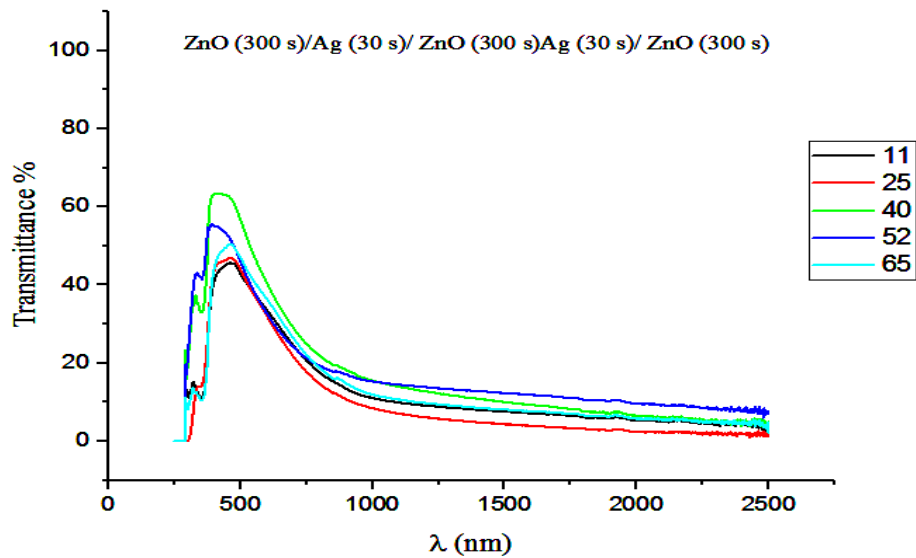
در بررسی طیف عبور نمونه‌ها در دماهای مختلف هنگام آزمون اسپکتروسکوپی نتایج زیر به دست

آمد.

در این نمودارها نیز پیک طیف مرئی برای نمونه با دمای  $40^{\circ}\text{C}$  درجه حدود  $20\%$  درصد افزایش عبور

نسبت به اندازه‌گیری اسپکتروسکوپی در دمای اتاق را نشان می‌دهد.





شکل ۴-۳۳ نمودار طیف عبور برای پوشش‌های تک لایه و دو لایه نقره با زمان لایه‌نشانی ۱۰، ۱۵ و ۳۰ ثانیه برای هر لایه در دماهای مختلف ۱۱ °C، ۲۵ °C، ۴۰ °C، ۵۲ °C، ۶۵ °C

#### ۴-۵-۵ بررسی ویژگی‌های حرارتی

در این بخش به شبیه‌سازی مقدار ضریب انتقال حرارت سیستم شیشه دوجداره با دو لایه نقره

تمرکز می‌گردد.



جدول ۱۱-۴ پارامترهای اپتیکی و الکتریکی مورد استفاده در نرم افزار

ضریب گسیلندگی		ضریب انعکاس خورشیدی		ضریب انعکاس نور مرئی		ضریب عبور خورشیدی	ضریب عبور نور مرئی	نوع شیشه
		%		%				
طرف بدون پوشش	طرف پوشش دار	طرف بدون پوشش	طرف پوشش دار	طرف بدون پوشش	طرف پوشش دار	%	%	
۰٫۸۴	۰٫۸۴	۲۷	۳۶	۸	۲۱	۱۵	۳۶	ZnO (300 s)/Ag (10 s)/ ZnO (300 s) /Ag (10 s)/ ZnO (300 s)
۰٫۸۴	۰٫۸۴	۱۶	۱۸	۷	۱۲	۲۵	۳۸	ZnO (300 s)/Ag (15 s)/ ZnO (300 s) /Ag (15 s)/ ZnO (300 s)
۰٫۸۴	۰٫۰۷	۱۴	۲۳	۱۲	۱۷	۲۹	۳۶	ZnO (300 s)/Ag (30 s)/ ZnO (300 s) /Ag (30 s)/ ZnO (300 s)
۰٫۸۴	۰٫۸۴	۷	۷	۸	۸	۷۷	۸۷	شیشه فلوت ساده

جدول ۱۲-۴ مقادیر ضریب انتقال حرارت و ضریب بهره حرارتی خورشید (SHGC) برای پوشش‌های تک لایه و دو لایه نقره با زمان لایه‌نشانی ۱۰، ۱۵ و ۳۰ ثانیه برای هر لایه

آرایش پوشش	U-value (Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )	SHGC پوشش روی سطح ۳	SHGC پوشش روی سطح ۲
ZnO (300 s)/Ag (10 s)/ ZnO (300 s) /Ag (10 s)/ ZnO (300 s)	۲٫۷۱	۰٫۵	۰٫۲۸
ZnO (300 s)/Ag (15 s)/ ZnO (300 s) /Ag (15 s)/ ZnO (300 s)	۲٫۷۱	۰٫۵۴	۰٫۳۷
ZnO (300 s)/Ag (30 s)/ ZnO (300 s) /Ag (30 s)/ ZnO (300 s)	۱٫۳۷	۰٫۵۷	۰٫۳۲

#### ۴-۵-۶ بررسی نتایج اپتیکی و الکتریکی پوشش‌های تک لایه و دو لایه نقره

در این بخش ویژگی‌های اپتیکی و الکتریکی پوشش‌های کم گسیل با یک و دو لایه نقره با تغییر ضخامت نقره بررسی شد. اندازه‌گیری‌ها برای پوشش کم گسیل با یک لایه نقره با زمان لایه‌نشانی ۶۰ ثانیه، گسیلندگی ۰/۰۴ و بازتاب فروسرخ ۸۹ درصد را نشان داد. در حالی که برای یک پوشش کم گسیل با دو لایه نقره مقدار گسیلندگی ۰/۰۸ و بازتاب فروسرخ به حدود ۳۲ درصد برای ۳۰ ثانیه لایه‌نشانی نقره در هر لایه رسید. بنابراین باید توجه داشت که در لایه‌نشانی لایه‌های مختلف با دستگاه اسپاترینگ، کنترل شرایط لایه‌نشانی و انتخاب ضخامت لایه‌ها باید به دقت انجام شود تا تداخل اپتیکی در لایه‌ها منجر به از دست دادن ویژگی اپتیکی با کاربرد خاص نگردد. از طرفی در پوشش‌های کم گسیل می‌توان از لایه‌های میانی برای بهبود ویژگی اپتیکی پوشش استفاده کرد و لزوماً تنها با افزایش تعداد لایه فلزی نمی‌توان به ویژگی کاملاً مناسب اپتیکی و الکتریکی دست یافت. به نظر می‌رسد در شرایط بهینه به دست آمده در این فصل می‌توان با تغییر ضخامت لایه اکسید روی به عنوان لایه دی‌الکتریک بالایی و پایینی لایه فلز نقره، به ویژگی‌های مطلوب‌تری در پوشش‌های کم گسیل با دو لایه نقره دست یافت.

#### ۴-۶ نتیجه‌گیری

اکسیدهای فلزی رسانا با کاربرد در صنایع اپتوالکترونیک مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. در ترکیب با لایه‌های بسیار نازک فلزی، تراکم زیاد الکترون‌های آزاد به شدت خواص اپتیکی اکسیدهای رسانا را تحت تاثیر قرار می‌دهند. در این میان فلزات نجیب مثل نقره نیز توجه زیادی در کاربردهای پلاسمونیک به خود اختصاص داده‌اند. در این موارد ساختار نانو در این فیلم‌ها ویژگی‌های منحصر به فردی نسبت به حالت بالک از خود نشان می‌دهند. بنابراین دانش ویژگی‌های اپتیکی یک ماده با پیچیدگیهای زیادی همراه است.

در این رساله ویژگی‌های اپتیکی و الکتریکی فیلم‌های چندلایه با کاربرد به عنوان پوشش کم گسیل روی شیشه در ساختمان با فیلم‌های فوق نازک نقره و اکسید روی بررسی شد.

علاوه بر طیف عبور و بازتاب از فیلمهای ZnO/Ag/ZnO با تغییر زمان لایه‌نشانی Ag و ZnO، گاف انرژی اپتیکی این فیلمها با استفاده از منحنی جذب هر فیلم محاسبه شد.

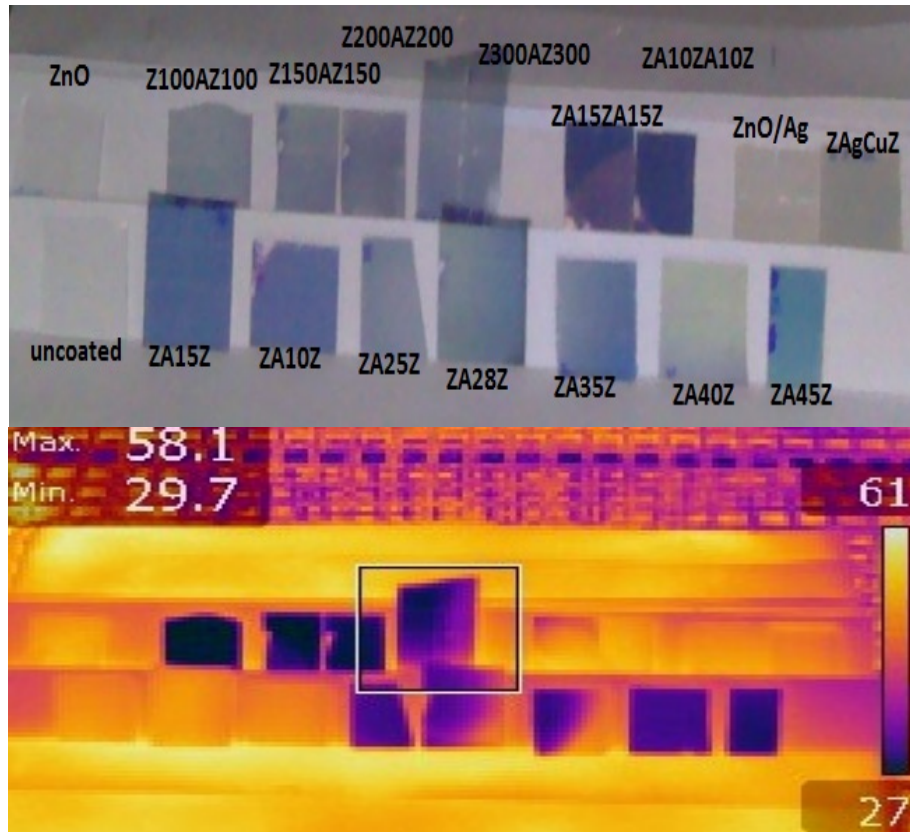
نتایج نشان داد افزایش تراکم حامل‌ها می‌تواند باعث پهن‌شدگی گاف انرژی گردد.

بررسی عملکرد الکتریکی فیلم‌ها نشان داد، با افزایش ضخامت نقره در سه لایه‌ها، تراکم حامل‌ها افزایش یافته و افزایش رسانندگی الکتریکی با کاهش مقاومت سطحی به کاهش گسیلندگی پوشش می‌انجامد.

درحالی‌که کاهش زمان لایه‌نشانی ZnO به افزایش تراکم حامل‌ها و افزایش رسانندگی فیلم‌ها منجر می‌گردد. بنابراین گسیلندگی فیلم‌ها با کاهش ضخامت ZnO کاهش یافت.

برای بررسی گسیلندگی سطح شیشه با پوشش‌های لایه‌نشانی شده در این رساله، عکسی با دوربین فروسرخ از نمونه‌های نگهداری شده در آن در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  تهیه شد. قراردعی نمونه‌ها در دمای  $60^{\circ}$  درجه با هدف حذف تابش دیگر سطوح روی نمونه‌ها صورت گرفت. بدین ترتیب تابش

گسیل شده صرفاً مربوط به شیشه خواهد بود و با مشخص بودن دمای سطوح نمونه‌ها، میتوان گسیلندگی آنها را با دقت قابل قبولی تعیین کرد. گسیلندگی کم برای نمونه‌های با ضخامت کمتر لایه ZnO و ضخامت بیشتر لایه Ag، در مقایسه با شیشه بدون پوشش، در توافق خوبی با محاسبات و اندازه‌گیری‌های انجام شده در بخش‌های قبلی این فصل در شکل ۴-۳۴ مشاهده شد.



شکل ۴-۳۴ تصویر نمونه‌های لایه‌نشانی شده در دمای اتاق و دمای  $60^{\circ}\text{C}$  با دوربین فروسرخ

همان‌طور که در تصویر شکل ۴-۳۴ قابل ملاحظه است، نمونه‌های با گسیلندگی سطح کم، دمای سطح بسیار کمتری در مقایسه با نمونه‌های با گسیلندگی سطح بیشتر، در شرایط محیطی یکسان دارند.

همچنین با افزایش رسانندگی در کلیه فیلم‌ها بازتاب در طیف فروسرخ به شدت افزایش یافت. به عبارت دیگر، ویژگی‌های اپتیکی لایه‌های نازک به شدت وابسته به ضخامت فیلم‌ها تحت تاثیر تراکم

حامل‌ها است. این وابستگی می‌تواند به بهبود بلورینگی فیلم‌ها نسبت داده شود. همچنین در ضخامت‌های بسیار کم لایه‌ها اثر محدودیت کوانتومی به دلیل سایز بسیار کم نانوذرات غالب است.

با توجه به اهداف این رساله مبنی بر استفاده از شیشه با پوشش کم گسیل در ساختمان با الزام عبور زیاد طیف مرئی برای کاهش نیاز به نور مصنوعی در ساختمان و کنترل عبور یا بازتاب طیف فروسرخ برای اقلیم گرم و سرد، عملکرد کلیه فیلم‌ها با این دیدگاه بررسی شد. ضخامت بهینه لایه فلزی و اکسید فلزی با این رویکرد برای کاربرد در هر اقلیم با مطالعه طول موج گذار تعیین شد.

همچنین مقایسه‌ای بین ویژگی‌های اپتیکی تک لایه نقره در پوشش سه لایه با ضخامت یکسانی از دو لایه نقره در فیلم‌های پنج لایه  $ZnO/Ag/ZnO/Ag/ZnO$  انجام شد. این مطالعه نشان داد در ضخامت‌های مساوی دولایه نقره نسبت به تک لایه نقره، پراکندگی بیشتر فوتونها و نیز افزایش جذب به کاهش عبور در کل طیف تابش فرودی می‌گردد.

سرانجام میزان ضریب انتقال حرارت و ضریب بهره حرارتی خورشیدی برای هر فیلم به صورت پوشش روی سطح ۲ یا ۳ از مجموعه شیشه دوجداره با استفاده از نرم افزار Window شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد استفاده از پوشش کم گسیل متشکل از لایه‌های لایه‌نشانی شده در این رساله با ضخامت کمتر  $ZnO$  و ضخامت بیشتر لایه نقره در شیشه دوجداره با کاهش عبور تابش فروسرخ نزدیک، در اقلیم گرم و استفاده از پوشش سه لایه با ضخامت بیشتر  $ZnO$  و ضخامت کمتر لایه نقره به شرط گسیلندگی کم پوشش که مانع گسیل گرمای داخل ساختمان به بیرون می‌شود، برای کاربرد در اقلیم سرد پیشنهاد می‌گردد.

با توجه به نتایج مثبت به دست آمده در این رساله می‌توان به کاربرد صنعتی این پوشش‌ها با حداقل تعداد لایه‌ها فقط با تغییر مناسب ضخامت هر لایه برای اقلیم‌های مختلف ایران پرداخت.

#### ۷-۴ پیشنهاداتی برای کارهای آینده

با توجه به بررسی‌های انجام شده می‌توان با حداقل تعداد لایه‌ها با انتخاب هوشمندانه نوع و ضخامت هر لایه به عملکرد مطلوبی برای پوشش چندلایه با کاربرد خاص رسید. با توجه به این مورد می‌توان از لایه‌های اکسید فلزی دیگری با تراکم حامل‌های بیشتر یا با آرایش فلزی به عنوان دی‌الکتریک در پوشش‌های چندلایه در کاربردهای صنعتی استفاده کرد.

همچنین می‌توان از آرایش دیگری از فلزات همراه با دی‌الکتریک‌ها برای کاربرد پوشش کم گسیل در ساختمان یا سلول‌های خورشیدی استفاده کرده و یا حتی با تغییر پارامترهای لایه‌نشانی به بررسی ویژگی‌های چندلایه‌ها پرداخت.

در بررسی‌های دیگری می‌توان کاربرد پوشش‌های کم گسیل را برای اجزای دیگری مثل رنگ‌های نما یا پوشش مناسب برای بام در ساختمان مطالعه کرد و با افزایش تعداد لایه‌ها با هدف دوام بیشتر پوشش در معرض شرایط جوی به عملکرد مناسبی برای پوشش کم گسیل در نما یا بام با هدف کاهش مصرف انرژی در ساختمان پرداخت.

همچنین با توجه به کاربرد این پوشش‌ها می‌توان عملکرد پوشش کم گسیل در شیشه خودرو با هدف کاهش عبور تابش گرمایی و یا جلوگیری از خیرگی را مد نظر قرار داد.

- 1 Climate Change, Global Warming and the Built Environment, Architecture, Building Sector
- 2 Silvi, Cesare, (2004) “*Solar Energy*”, in 2004 Survey of Energy Resources, 20th Edition, Edited by Judy Trinnaman and Alan Clarke, Netherlands: Elsevier Ltd.
- 3 <http://www.arkema-inc.com/index.cfm>
- 4 Schaefer C, Brauer G, and Szczyrbowski J (1997) “Low emissivity coatings on architectural glass” *Surface and Coatings Technology*, 93, pp 37–45
- 5 G Leftheriotis and P Yianoulis (2012) “*Glazings and Coatings*” University of Patras, Patras, Greece, pp.327.
- 6 C. Kittel (2005) “*introduction to solid state physics*” 8<sup>th</sup> edition. John Wiley & Sons, Inc.,
- 7 J. A . Dobrowolski (1978) “ ‘ *Coatings and Filters*’ W . G . Driscoll and W.Vaughan (eds.) Handbook of Optics , McGraw-Hill , New York, 8 pp 1- 124 .
- 8 H . A . Macleod (1986) “*Thin Film Optical Filters*” McGraw-Hill , New York , pp 519.
- 9 European standard, EN 673 (1998) ” *Thermal insulation of glazing- Calculation rules for determining the steady “ U” value of glazing*’ .
- 10 P.Drude (1900) “*Lehrbuch der optic*” ,Verlag von S. Hirzel, Leipzig.
- 11 N. F. Mott and H. Jones (1958) “*the theory of the properties of metals and alloys*” Dover Publications Inc., New York,.
- 12 Haga, M., Isobe, K., Boone, S. R., Pierpont, C. G. (1990) *Inorg. Chem.*, 29, pp 3795.
- 13 A. M. Dioffo (1968) " treatment of general case of dielectric films with different optical properties” *Rev. Opt. Theor. Instrum.* 47 pp 117-129.
- 14 A.Dresler (1933) “Uber eine neuartige filterkombination zur genauen angleichung der spektralen empfindlichkeit von photozellen an die augenempfin” *Das Licht* 3 pp 41-43.
- 15 Z. Knittl (1976) “*Optics of Thin Films*” Wiley & Sons, London pp 548.
- 16 Rail, J.; Stange, A. F.; Htibler, K.; Kaim, W. *Angew.(1998) Chem. Int. Ed.*, 37 pp 2681.
- 17 Lever, A. B. P.; Auburn, P. R.; Dodsworth, E. S.; Haga, M. A.; Liu, W.; Melnik, M.; Nevin, W. A. J. (1988) *Am. Chem. Soc.*, 110 pp 8076.
- 18 H. Aydin, H.M. El-Nasser, C. Aydinc, A.A. Al-Ghamdi, F.Yakuphanoglu (2015) *Appl. Surf. Sci.*
- 19 J. Nomoto, H. Makino, T. Yamamoto (2015) *J. Appl. Phys.* 117.
- 20 D. Kim, I. Yun, H. Kim (2010) *Curr. Appl. Phys.* 10 pp 459.
- 21 Q. You, H. Cai, K. Gao, Z. Hu, S. Guo, P. Liang, J. Sun, N. Xu, J.Wu, (2015) *J. Alloys Compd.* 415 pp 626.
- 22 S. ILICAN, M. CAGLAR, Y. CAGLAR (2007) *Materials Science-Poland*, Vol. 25, No. 3.
- 23 L.-W. Wang and A. Zunger (1994) "Dielectric Constants of Silicon Quantum Dots," *Physical Review Letters*, vol. 73, pp. 1039-1042.

- 
- 24 H. C. Weissker, J. Furthmüller, and F. Bechstedt (2002) "Optical properties of Ge and Si nanocrystallites from ab initio calculations. II. Hydrogenated nanocrystallites," *Physical Review B*, vol. 65, pp. 155328.
- 25 R. J. Elliott (1957) "Intensity of Optical Absorption by Excitons," *Physical Review*, vol. 108, pp. 1384-1389.
- 26 D. C. Reynolds, D. C. Look, and B. Jogai (2000) "Combined effects of screening and band gap renormalization on the energy of optical transitions in ZnO and GaN," *Journal of Applied Physics*, vol. 88, pp. 5760-5763.
- 27 J. G. Gay (1971) "Screening of Excitons in Semiconductors," *Physical Review B*, vol. 4, pp. 2567-2575.
- 28 T. Makino, Y. Segawa, S. Yoshida, A. Tsukazaki, A. Ohtomo, M. Kawasaki, et al., (2005) "Free-Carrier effects on Zero- and One-Phonon Absorption Onsets of n-Type ZnO," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 44(10), pp. 7275-7280.
- 29 H. Fujiwara and M. Kondo (2005) "Effects of carrier concentration on the dielectric function of ZnO:Ga and In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Sn studied by spectroscopic ellipsometry: analysis of free-carrier and band-edge absorption," *Physical Review B*, vol. 71, 75109.
- 30 J. G. Lu, S. Fujita, T. Kawaharamura, H. Nishinaka, Y. Kamada, T. Ohshima, et al., (2007) "Carrier concentration dependence of band gap shift in n-type ZnO:Al films," *Journal of Applied Physics*, vol. 101, 083705
- 31 A. Sommerfeld (1927) "Zu Zur elektronentheorie der metalle", *Naturwissenschaften* 15 (41), pp 825-832.
- 32 P. Drude (1900) "Zur elektronentheorie der metalle", *Annalen der physik* 306 (3), 566-613
- 33 N. Ashcroft and D. Mermin, (1976) "Solid State Physics".
- 34 J.M. Ziman, (1979) "principles of the theory of solids", Cambridge University Press.
- 35 Mihaela Girtan, "Comparison of ITO/metal/ITO and ZnO/metal/ZnO characteristics as transparent electrodes for third generation solar cells", (2012) *Sol. Energy Mater Sol. Cells* 100 , pp 153–161.
- 36 S. Chu, J. Zhao, Z. Zuo, J. Kong, L. Li, J. Liu (2011), "Enhanced output power using MgZnO/ZnO/MgZnO double hetero structure in ZnO homo junction light emitting diode" *J. Appl. Phys.* 109, 123110
- 37 Frederick H.Hart (1984) "Low emissivity coating on transparent substrate", Patent No.US4462883
- 38 Klaus W.Harting (2000), "Neutral, high visible, durable Low-E glass coating system" Patent No.US6059909
- 39 VijayenS.Veerasamy (2002) "Low e coating system including protective DLC" Patent No. US6447891 B1
- 40 Jean-marc Lemmer (2007) "Coated article with Low e coating including IR reflecting layers and corresponding method" Patent No. US7198851 B2
- 41 Jean-marc Lemmer (2005) "Coated article with Low e coating including tin oxide interlayer" Patent No. US2005/0191502 A1
- 42 Disteldorf (2014) "Coated article with Low e coating having absorbing layers for low film side reflectance and low visible transmission", Patent No. US 2014/0071524 A1



- 
- 43 Klaus W. Hartig, Philip J. Lingle, (1998) “*High performance, durable, low emissivity glass and method of making same*” Patent No. EP0567735 B1
- 44 Klaus W. Hartig, Steven L. Larson, Philip J. Lingle, (1996) “*Dual silver layer Low-E glass coating system and insulating glass units made therefrom*”, Patent No. US 5557462 A
- 45 Klaus W. Hartig (1998) “*Neutral, high visible, durable low e glass coating system and insulating glass units made therefrom*” Patent No. US 5770321
- 46 Jose Ferreira, Pierrot Pallotta, Richard Blacker (2009) “*Coated article with low-E coating having zinc stannate based layer between IR reflecting layers for reduced mottling and corresponding method*”, Patent No. US 8281617 B2
- 47 Peter Yong Nian Yang, Sepideh Yadollahi (2000) “*Low emissivity window films*” Patent No. US 6030671 A
- 48 Leftheriotis G and Yianoulis. P (1999) “Characterization and stability of low emittance multiple coatings for glazing applications”. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 58 pp: 185–197
- 49 Leftheriotis G, Yianoulis P, and Patrikios D (1997) “Deposition and optical properties of optimized ZnS/Ag/ZnS thin films for energy saving applications” *Thin Solid Films* 306: 92
- 50 Shihui Yu, Lingxia Li, Xiaosong Lyu & Weifeng Zhang (2016) “Preparation and investigation of nano-thick FTO/Ag/FTO multilayer transparent electrodes with high figure of merit” *Scientific Reports* 6:20399.
- 51 Yuchao Niu, Xiaoyu Ma, Xiangju Liu, Weimin Wang, Yongtai Zhen, and Ying Gao (2017), “Spreadability of Ag Layer on Oxides and High Performance of AZO/Ag/AZO Sandwiched transparent Conductive Film”, *Journal of Nanoscience*, Article ID 2409062
- 52 Stella Van Eek, Xia Yan, Weimin Li, Sascha Kreher, and Selvaraj Venkataraj, (2017) “Investigation of material properties and thermal stabilities of magnetron-sputter-deposited ZnO:Al/Ag/ZnO:Al transparent conductive coating for thin-film solar cell applications” *Japanese Journal of Applied Physics* 56, 08MA12
- 53 S.-S. Lin and J.-L. Huang (2004), *Surf. Coatings Technol.* 185, 222.
- 54 Christopher J. Barile, Daniel J. Slotcavage, and Michael D. McGehee, (2016) “Polymer-Nanoparticle Electrochromic Materials that Selectively Modulate Visible and Near-Infrared Light”, *Chemistry of Materials is published by the American Chemical Society*. 1155 Sixteenth Street N.W., Washington, DC 20036
- 55 S. Chu, J. Zhao, Z. Zuo, J. Kong, L. Li, J. Liu (2011), “Enhanced output power using MgZnO/ZnO/MgZnO double heterostructure in ZnO homojunction light emitting diode” *J. Appl. Phys.* 109 123110.
- 56 S. Fernandez, F.B. Naranjo (2010) ” Optimization of aluminum-doped zinc oxide films deposited at low temperature by radio-frequency sputtering on flexible substrates for solar cell applications”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 94 ,157.

- 
- 57 H. Hosono, N. Ichinose, Y. Shigesato, (2002) "Proceedings of the 2nd International Symposium on Transparent Oxide Thin Films for Electronics and Optics", *Thin Solid Films*, 411, 1
- 58 Anuradha Purohit, S. Chander, Anshu Sharma, S.P. Nehra, M.S. Dhaka (2015) "Impact of low temperature annealing on structural, optical, electrical and morphological properties of ZnO thin films grown by RF sputtering for photovoltaic applications" *Optical Materials* 49, pp: 51–58.
- 59 Jing Chen, Gaowu Qin, Jiansheng Wang, Jiangyu Yu, Bo Shen, Song Li, Yuping Ren, Liang Zuo, Wen Shen, Biswajit Das (2013) "One-step fabrication of sub-10 -nm plasmonic nanogaps for reliable SERS sensing of micro organisms" *Biosens. Bioelectron.* 44 pp:191.
- 60 Franz Faupel, Vladimir Zaporozhchenko, Thomas Strunskus, Mady Elbahri (2010) "Metal - Polymer Nano composites for Functional Applications" *Adv. Eng. Mat.* 12, pp:1177.
- 61 M. Rycenga, et al. (2011) "Controlling the Synthesis and Assembly of Silver Nanostructures for Plasmonic applications" *Chem. Rev.* 111, pp:3669.
- 62 Yong-Seok Park, Ho-Kyun Park, Jin-A Jeong, Han-Ki Kim, Kwang-Hyuk Choi, Seok-In Na and Dong-Yu Kim (2009) "Comparative Investigation of Transparent ITO/Ag/ITO and ITO/Cu/ITO Electrodes Grown by Dual-Target DC Sputtering for Organic Photovoltaics" *J. Electrochem.Soc.* 156, H588.
- 63 Thomas Winkler, Hans Schmidt, Harald Flügge, Fabian Nikolayzik, Ihno Baumann, Stephan Schmale, Hans-Hermann Johannes, Torsten Rabe, Sami Hamwi, Thomas Riedl, Wolfgang Kowalsky (2012) "Realization of ultrathin silver layers in highly conductive and transparent zinc tin oxide/silver/zinc tin oxide multilayer electrodes deposited at room temperature for transparent organic devices" *Thin Solid Films* 520, pp:4669.
- 64 Sahu, D. R. & Huang, J. L (2009) "Development of ZnO-based transparent conductive coatings" *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 93, pp:1923.
- 65 D. Arai, M. Kondo, A. Matsuda (2006) "Reduction of light-induced defects by nanostructure tailored silicon solar cells using low-cost TCO substrates" *Solar Energy Mater. Solar Cells* 90, pp:3174.
- 66 H.W. Wu, R.Y. Yang, C.M. Hsiung, C.H. Chu (2012) "Influence of Ag thickness of aluminum-doped ZnO/Ag/aluminum-doped ZnO thin films" *Thin Solid Films* 520, pp:7147.
- 67 H.W. Wu, C.H. Chu (2013) "Structural and optoelectronic properties of AZO/Mo/AZO thin films prepared by rf magnetron sputtering" *Mater. Lett.* 105, pp: 65.
- 68 D.R. Sahu, J.L. Huang (2006) "Design of ZnO/Ag/ZnO multilayer transparent conductive films", *Mater. Sci. Eng.B* 130, pp: 295.
- 69 J.A. Jeong, H.K. Kim (2009) "Low resistance and highly transparent ITO – Ag – ITO multilayer electrode using surface plasmon resonance of Ag layer for bulk-hetero junction organic solar cells", *Solar Energy Mater. Solar Cells* 93, pp: 1801.
- 70 Y.P. Wang, J.G. Lu, X. Bie, Z.Z. Ye, X. Li, D. Song, X.Y. Zhao, W.Y. Ye (2011) "Transparent conductive and near-infrared reflective Cu-based Al-doped ZnO

---

multilayer films grown by magnetron sputtering at room temperature” *Appl. Surf.Sci.* 257, pp: 5966.

71 J.-A. Jeong, Y.-S.Park, H.-K.Kim (2010) “Comparison of electrical, optical, structural, and interface properties of IZO-Ag-IZO and IZO-Au-IZO multilayer electrodes for organic photovoltaics” *J. Appl. Phys.* 107, pp: 023111.

72 D. Kim, I. Yun, H. Kim (2010) “Fabrication of rough Al doped ZnO films deposited by low pressure chemical vapor deposition for high efficiency thin film solar cells” *Curr. Appl. Phys.* 10.

73 Jun Ho Kim, Han-Kyeol Lee, Jin-Young Na, Sun-Kyung Kim, Young-Zo Yoo, Tae-Yeon Seong (2015) “Dependence of optical and electrical properties on Ag thickness in TiO<sub>2</sub>/Ag/TiO<sub>2</sub> multilayer films for photovoltaic devices” *J. Ceramics International*, 41, pp: 8059.

74 C. Guillén , J. Herrero (2011) “TCO/metal/TCO structures for energy and flexible electronics” *J. Thin Solid Films* 520, 1.

75 Annica M. Nilsson, Arne Roos (2009) “Evaluation of optical and thermal properties of coatings for energy efficient windows” *J. Thin Solid Films* 517, pp:3173.

76 Kazuhiro Kato, Hideo Omoto and Atsushi Takamatsu (2010) “Electrical and Structural Properties of ZnO/Ag Multilayers Deposited by Magnetron Sputtering for Energy-Efficient Windows” *Advanced Materials Research* Vol 117, pp: 69-74.

77 Qiaoxia Zhang, Yanghua Zhao, Zhenhong Jia, Zhengfei Qin, Liang Chu, Jianping Yang, Jian Zhang, Wei Huang, and Xing’ao Li, High Stable (2016) “Transparent and Conductive ZnO/Ag/ZnO Nanofilm Electrodes on Rigid/Flexible Substrates” *Energies*, 9, 443.

78 D.R. Sahu, Shin-Yuan Lin, Jow-Lay Huang (2006) “ZnO/Ag/ZnO multilayer films for the application of a very low resistance transparent electrode” *Applied Surface Science*, 252 pp: 7509–7514

79 A. El Hajj, B. Lucas, M. Chakaroun, R. Antony, B. Ratier, M. Aldissi (2012) “Optimization of ZnO/Ag/ZnO multilayer electrodes obtained by Ion Beam Sputtering for optoelectronic devices” *Thin Solid Films*, 520, pp:4666–4668.

80 J.A. Jeong, H.K. Kim (2009) *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 93, 1801.

81 S.H. Mohamed (2008) “Effects of Ag layer and ZnO top layer thicknesses on the physical properties of ZnO/Ag/Zno multilayer system” *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 69, pp:2378– 2384

82 Clarke, J.A., (2001), “*Energy Simulation in Building Design*”, Butterworth-Heinemann, Oxford.

83 Morbitzer, Ch.A., (2003), “*Towards the Integration of Simulation into the Building Design Process*”, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Energy System Research Unit, University of Strathclyde, Glasgow, UK

84 Dr.-Bernhard (2004), “*Looking through walls - Coatings on glass for buildings*”, Klein-Str. 110, D-52078 Aachen, Germany

85 Klems, J. H. and H. Keller (1987), “*Measurement of Single and Double Glazing Thermal Performance under Realistic Conditions using The Mobile Window Thermal Test (MoWiTT) Facility*”, Honolulu, HI, USA, ASME, New York, NY, USA.

---

86 Klems, J. H., J. L. Warner, et al. (1996), “Comparison Between Calculated and Measured SHGC for Complex Fenestration Systems” ASHRAE Transactions 102(1): 931- 939.

87 Klems, J. H. and H. Keller (1987), “Thermal Performance Measurements of Sealed Insulating Glass Units with Low-E Coatings Using the MoWiTT Field-Test Facility”, ASHRAE Transactions Vol 93, Part 1.

88 Klems, J. H. (1989), “U-Values, Solar Heat Gain and Thermal Performance: Recent Studies Using the MoWiTT”, ASHRAE Transactions Vol 95, Part 1.

89 Clarke, J.A., Janak, M., Ruyssevelt, P. (1998), “Assessing the Overall Performance of Advanced Glazing Systems”, *Solar Energy* 63 (4), pp: 231– 241.

90 Annica M. Nilsson, Arne Roos, (2009) “Evaluation of optical and thermal properties of coatings for energy efficient windows”, *Thin Solid Films*, 517, pp: 3173–3177.

91 S. Chu, J. Zhao, Z. Zuo, J. Kong, L. Li, J. Liu, (2011) “Enhanced output power using MgZnO/ZnO/MgZnO double hetero structure in ZnO homo junction light emitting diode” *J. Appl. Phys.* 109, 123110.

92 E. Fortunato, D. Brida, I. Ferreira, H. Aguas, P. Nunes, R. Martins (2001) “Production and characterization of large area flexible thin film position sensitive detectors” *Thin Solid Films*, 383, pp: 310–313.

93 M. Berginski, J. Hupkes, M. Schulte, G. Schöpe, H. Stiebig, B. Rech, M. Wuttig, (2007) “The effect of front ZnO:Al surface texture and optical transparency on efficient light trapping in silicon thin-film solar cells”, *J. Appl. Phys.* 074903-1–074903-11.

94 J. Chen, et al. (2013) “One-step fabrication of sub-10 -nm plasmonic nanogaps for reliable SERS sensing of microorganisms”, *Biosens. Bioelectron.* 44, 191.

95 M. Rycenga, et al. (2011) “Controlling the Synthesis and Assembly of Silver Nanostructures for Plasmonic applications” , *Chem. Rev.* 111, 3669.

96 F. Faupel, et al., (2010) “Metal - Polymer Nano composites for Functional Applications” ,*Adv. Eng. Mat.* 12, 1177.

97 Park, Y. S. *et al.* (2009) “Comparative Investigation of Transparent ITO/Ag/ITO and ITO/Cu/ITO Electrodes Grown by Dual-Target DC Sputtering for Organic Photovoltaics”, *J. Electrochem. Soc.* 156, H588.

98 Winkler, T. *et al.* (2012) “Realization of ultrathin silver layers in highly conductive and transparent zinc tin oxide/silver/zinc tin oxide multilayer electrodes deposited at room temperature for transparent organic devices”, *Thin Solid Films* 520, 4669.

99 Sahu, D. R. & Huang, J. L, (2009) “Development of ZnO-based transparent conductive coatings”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 93, 1923.

100 Shihui Yu, Lingxia Li, Xiaosong Lyu & Weifeng Zhang, (2016) “Preparation and investigation of nano-thick FTO/Ag/FTO multilayer transparent electrodes with high figure of merit”, *sci rep.* 6, pp: 23099-23106.

101 Li Duana, Wei Gaoa, Ruiqun Chena, Zhuxi Fu, (2008) “Influence of post-annealing conditions on properties of ZnO:Ag films”, *Solid State Commun.* 145, pp: 479–481.

- 
- 102 Anuradha Purohit, S. Chander , Anshu Sharma , S.P. Nehra , M.S. Dhaka, (2015) “Impact of low temperature annealing on structural, optical, electrical and morphological properties of ZnO thin films grown by RF sputtering for photovoltaic applications”, *Opt. Mater.* 49, pp: 51–58.
- 103 Jun Ho Kim, Yoon-Jong Moon, Sun-Kyung Kim, Young-Zo Yoo, Tae-Yeon Seong, (2015) “Al-doped ZnO/Ag/Al-doped ZnO multilayer films with a high figure of merit”, *Ceram. Int.* 41, pp: 14805-14810.
- 104 Stella Van Eek, Xia Yan, Weimin Li, Sascha Kreher, and Selvaraj Venkataraj, (2017) “Investigation of material properties and thermal stabilities of magnetron-sputter-deposited ZnO:Al/Ag/ZnO:Al transparent conductive coatings for thin-film solar cell applications”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 56, 08MA12.
- 105 Kazuhiro Kato, Hideo Omoto and Atsushi Takamatsu, (2010) “Electrical and Structural Properties of ZnO/Ag Multilayers Deposited by Magnetron Sputtering for Energy-Efficient Windows”, *Adv. Mater. Res.* 117, pp: 69-74.
- 106 Kazuhiro Kato, Hideo Omoto, Takao Tomioka, Atsushi Takamatsu, (2011) “Visible and near infrared light absorbance of Ag thin films deposited on ZnO under layers by magnetron sputtering”, *Sol. Energy Mater Sol. Cells* 95, pp: 2352-2356.
- 107 E. Bertran, C. Corbella, M. Vives, A. Pinyol, C. Person, I. Porqueras, (2003) “RF sputtering deposition of Ag/ITO coatings at room temperature”, *Solid State Ionics.* 165, pp: 139– 148.
- 108 Qiaoxia Zhang , Yanghua Zhao , Zhenhong Jia , Zhengfei Qin , Liang Chu , Jianping Yang , Jian Zhang , Wei Huang and Xing’ao Li., (2016) “High Stable, Transparent and Conductive ZnO/Ag/ZnO Nanofilm Electrodes on Rigid/Flexible Substrates”, *Energies.* 9, 443.
- 109 Po Kai Chiu<sup>1</sup>, Wen Hao Cho, Hung Ping Chen, Chien Nan Hsiao<sup>1</sup> and Jer Ren Yang, (2012) “Study of a sandwich structure of transparent conducting oxide films prepared by electron beam evaporation at room temperature”, *Nanoscale Res. Lett.* 7, 304.
- 110 Yuchao Niu, Xiaoyu Ma, Xiangju Liu, Weimin Wang, Yongtai Zhen, and Ying Gao, (2017) “Spreadability of Ag Layer on Oxides and High Performance of AZO/Ag/AZO Sandwiched Transparent Conductive Film”, *Int. J. Nanosci.*, 2409062.
- 111 Jun Ho Kim, Han-Kyeol Lee, Jin-Young Na, Sun-Kyung Kim, Young-Zo Yoo, Tae-Yeon Seong, (2015) “Dependence of optical and electrical properties on Ag thickness in TiO<sub>2</sub>/Ag/TiO<sub>2</sub> multilayer films for photovoltaic devices”, *Ceram. Int.* 41, pp: 8059– 8063.
- 112 A. El Hajj , B. Lucas a, M. Chakaroun , R. Antony , B. Ratier , M. Aldissi, (2012) “Optimization of ZnO/Ag/ZnO multilayer electrodes obtained by Ion Beam Sputtering for optoelectronic devices”, *Thin Solid Films.* 520, pp: 4666–4668.
- 113 Mihaela Girtan, (2012) “Comparison of ITO/metal/ITO and ZnO/metal/ZnO characteristics as transparent electrodes for third generation solar cells” *Sol. Energy Mater Sol. Cells*, 100, pp: 153–161

- 
- 114 C. Guillén , J. Herrero, (2012) “TCO/metal/TCO structures for energy and flexible electronics”, *Thin Solid Films*, 520, pp: 1–17
- 115 Haacke, G., (2008) “New figure of merit for transparent conductors”. *J. Appl. Phys.* 47, pp: 4086–4089.
- 116 S.H. Mohamed, (2008) “Effects of Ag layer and ZnO top layer thickness on the physical properties of ZnO/Ag/Zno multilayer system” *J. Phys. Chem. Solids*, 69 pp: 2378– 2384.
- 117 Po-Kai Chiu, Bo-Heng Liou, Chien-Nan Hsiao, Jer-Ren Yang, Donyau Chiang, Wen-Hao Cho, and Chao-Te Lee, (2014) “Investigation on optical and electrical properties of ZnO sandwich structure with metal interlayer” *Jpn. J. Appl. Phys.* 53, 05FF05
- 118 D. Arai, M. Kondo, A. Matsuda, (2006) “Reduction of light-induced defects by nano-structure tailored silicon solar cells using low-cost TCO substrates” *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 90, 3174.
- 119 H.W. Wu, R.Y. Yang, C.M. Hsiung, C.H. Chu, (2012) “Influence of Ag thickness of aluminum-doped ZnO/Ag/aluminum-doped ZnO thin films”, *Thin Solid Films*, 520, 7147.
- 120 H.W. Wu, C.H. Chu, (2013) “Structural and optoelectronic properties of AZO/Mo/AZO thin films prepared by rf magnetron sputtering”, *Mater. Lett.*, 105, 65.
- 121 D.R. Sahu, J.L. Huang, (2006) “Design of ZnO/Ag/ZnO multilayer transparent conductive films”, *Mater. Sci. Eng. B*, 130, 295.
- 122 J.A. Jeong, H.K. Kim, (2009) “Low resistance and highly transparent ITO – Ag – ITO multilayer electrode using surface plasmon resonance of Ag layer for bulk-heterojunction organic solar cells”, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 93, 1801.
- 123 Y.P. Wang, J.G. Lu, X. Bie, Z.Z. Ye, X. Li, D. Song, X.Y. Zhao, W.Y. Ye, (2011) “Transparent conductive and near-infrared reflective Cu-based Al-doped ZnO multilayer films grown by magnetron sputtering at room temperature”, *Appl. Surf.Sci.*, 257, 5966.
- 124 D. Kim, (2010) “Low temperature deposition of transparent conducting ITO/Au/ITO films by reactive magnetron sputtering” *Appl. Surf. Sci.*, 256, 1774.
- 125 J.-A. Jeong, Y.-S.Park, H.-K.Kim, (2010) “Comparison of electrical, optical, structural, and interface properties of IZO-Ag-IZO and IZO-Au-IZO multilayer electrodes for organic photovoltaics”, *J. Appl. Phys.* 107, 023111.
- 126 Jun HoKim, Han-KyeolLee, Jin-YoungNa, Sun-KyungKim, Young-ZoYoo, Tae-YeonSeong, (2015) “Dependence of optical and electrical properties on Ag thickness in TiO<sub>2</sub>/Ag/TiO<sub>2</sub> multilayer films for photovoltaic devices” , *J. Ceramics International*, 41, 8059.
- 127 C. Guillén , J. Herrero, (2011) “TCO/metal/TCO structures for energy and flexible electronics”, *J. Thin Solid Films* 520, 1.
- 128 G. Haacke, (1976) “New figure of merit for transparent conductors”, *J. Appl. Phys.* 47, 4086.

- 
- 129 J.M. Ziman,(1985). “*Principles of the theory of solids*” (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0521297338.
- 130 Johnson T E (1991) “*Low-E Glazing Design Guide*” (Massachusetts: Butterworth-Heinemann)
- 131 Vikas Sharmaa, Parmod Kumarb, Ashish Kumarb, Surbhia, K. Asokanb, K. Sachdeva, (2017) “High-performance radiation stable ZnO/Ag/ZnO multilayer transparent conductive electrode”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 169, pp:122–131.
- 132 H. Han, N. D. Theodore, and T. L. Alford, (2008) “Improved conductivity and mechanism of carrier transport in zinc oxide with embedded silver layer”, *J. Appl. Phys.* 103, 013708.
- 133 Vikas Sharmaa, Parmod Kumarb, Ashish Kumarb, Surbhia, K. Asokanb, K. Sachdeva, (2017) “High-performance radiation stable ZnO/Ag/ZnO multilayer transparent conductive electrode”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 169, pp: 122–131.
- 134 D. C. Reynolds, D. C. Look, and B. Jogai, (2000) "Combined effects of screening and band gap renormalization on the energy of optical transitions in ZnO and GaN," *Journal of Applied Physics*, vol. 88, pp. 5760-5763.
- 135 J. G. Gay, (1971) "Screening of Excitons in Semiconductors," *Physical Review B*, vol. 4, pp. 2567-2575.
- 136 Winsemius, P., van Kampen, F.F., Lengkeek, H.P., and van Went, C.G., (1976) "Temperature Dependence of the Optical Properties of Au, Ag and Cu." *J. Phys. F: Metal Phys.*, Vol. 6, No. 8, pp: 1583-1606.
- 137 Ehrenreich, H. and Philipp, H.R., (1962) "Optical Properties of Ag and Cu." *Phys. Rev.* 128, pp: 1622.
- 138 Crupi, I. et al. (2012) “Optimization of ZnO: Al/Ag/ZnO: Al structures for ultra-thin high-performance transparent conductive electrodes”. *Thin Solid Films* ,520, pp: 4432–4435.
- 139 Federico Giovannetti, Sebastian Föste, Nicole Ehrmann, Gunter Rockendorf, (2012) “High transmittance, low emissivity glass covers for flat plate collectors: Applications and performance”, *Energy Procedia*. 30, pp: 106 – 115
- 140 Fortunato, E. et al. (2008) “Highly stable transparent and conducting gallium-doped zinc oxide thin films for photovoltaic applications”. *Sol.Energy Mater. Sol. Cells* 92, pp: 1605–1610.
- 141 U. Kreibig and C. v. Fragstein, (1969) "The limitation of electron mean free path in small silver particles," *Zeitschrift für Physik*, vol. 224, pp. 307-323.
- 142 Jingkai Yang , Hongli Zhao,Hesong Sha,Jian Li,Liping Zhao,Jiajia Chen, Bin Yu,Fucheng Zhang, (2014) “Improvement of high-temperature resistance of the Ag-based multilayer films deposited by magnetron sputtering”, *Mater. Lett.* 118, pp: 62–65.
- 143 J. Szczyrbowski, A. Dietrich, and K. Hartig, (1987) “Evaluation and control of the properties of thin sputtered silver films for spectrally selective coatings”, *Solar Energy Mater.* 16, pp: 103-111.
- 144 U. Kreibig and M. Vollmer, (1995) “*Optical properties of metal clusters*”, Springer.

---

145 M. Jałochowski, M. Stozak, and R. Zdyb, (2002) “Anomalous optical absorption in ultrathin Pb films”, *Physical Review B*, vol. 66, p. 205417.





## **Abstract**

The low-emissivity (low-E) coatings are multiple ultra thin layers on glass used for producing spectrally selective glazing. The use of low-E glazing in building windows makes possible to limit the radiative heat transfer without reducing the visible transmittance perceptibly and accordingly altering the necessary natural lighting in the low energy buildings. In this thesis, ZnO/Ag/ZnO thin films are deposited on glass substrate via RF and DC sputtering by ZnO and Ag targets respectively, in various deposition time of ZnO and Ag layers. The NIR reflectance is advanced by using a feasible and affordable method with a low number of ultra thin layers and by reducing the cost of the vacuum. Presented results are related to electrical, optical and thermal properties for multi-layers based on sandwiched Ag by ZnO in diverse deposition time at room temperature.

The electrical and optical properties of the single and double Low-E coatings are investigated as a function of Ag deposition time, too.

The goal of this work is to highlight the correlation between the Ag and ZnO ultra thin films in multi-layers and the resulting properties, in order to advance low emissivity solutions with high ratio of visible transmittance to solar transmittance, high NIR reflectance and low glazing system U-value.

**Key words:** Optical properties, Building, Saving energy, Low E Coatings, Ag, ZnO





**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Physics and Nuclear Engineering**

PhD Dissertation in Solid State Physics

**Optical Investigation of the Metal Oxide (for example ZnO)  
Nanostructured Coated Glasses and Improved Thermal  
Performance Glasses for Using in the Building Industry**

By: Elham Haratian Nezhad

Supervisor(s):

Dr Hamid Haratizadeh

Dr Behrouz Mohammad Kari

March 2019