

## طراحی و لایه نشانی بخار فلزات (PVD) روی آلومینیوم و بررسی خواص اپتیکی آن

محمد رضا جلالی<sup>۱\*</sup>، حسین صلواتی<sup>۲</sup>، زهرا ممتاز<sup>۳</sup>

۱. استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور

۲. دانشیار، گروه شیمی، دانشگاه پیام نور

۳. کارشناس ارشد، فیزیک، دانشگاه پیام نور

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۳

## Designing and Inspecting the Metal's Steam (PVD) on Aluminum and Investigating its Optical Properties

M.R. Jalali<sup>1\*</sup>, H. Salavati<sup>2</sup>, Z. Momtaz<sup>3</sup>

1. Assistant Professor, Department of Physics, Payame Noor University

2. Associate Professor, Department of Chemistry, Payame Noor University

3. M.A., Department of Physics, Payame Noor University

Received: 2019/02/06

Accepted: 2020/03/03

### Original Article

### مقاله پژوهشی

#### Abstract

Considering the reflection theory and numerous applications of the mirror, we can achieve mirrors with thin-film, metal-dielectric coatings. Hence, in this article, with respect to the above-mentioned approach and using new materials, a mirror with maximum reflection of nearly 100% and of aluminum alloy is produced. Metal mirror is a very good reflector with a wavelength of 3 to 5 micrometers. The optimum intermediate layer for inspecting metals' steam is aluminum oxide. This compound has higher stabilization compared to other intermediate layer substances. After optimizing the accumulation conditions and calculating the number and thickness of layers and the interface, the resulting collection was designed. The physical vapor method (pvd) and the thickness of layers are measured by optical method. By conducting qualitative tests and examining reflection spectrum, the durability and stability of the set have been investigated. The mirror aluminum has more than 99% reflection in infrared field.

#### Keywords

Correlation layer, Metals' Steam Physical Method, Optical Method, Aluminum.

#### چکیده

با توجه به نظریه انعکاس و کاربردهای فراوان آینه، می‌توان به آینه‌هایی با پوشش‌های لایه نازک، فلز-دی الکتریک دست یافت؛ از این رو در این مقاله با در نظر گرفتن رهیافت بالا و با استفاده از مواد جدید، آینه‌ای با حداکثر بازتاب نزدیک به ۱۰۰٪ و با بسترهای از جنس فلز آلومینیوم ساخته شد. آینه فلزی ساخته شده یک انعکاس دهنده بسیار خوب در بازه طول موجی ۳ تا ۵ میکرومتر است. لایه واسط مطلوب برای لایه نشانی بخار فلزات، اکسید آلومینیم است که پایداری بالاتری نسبت به بقیه مواد لایه واسط دارد. پس از بهینه‌سازی شرایط انباشت و محاسبه تعداد و ضخامت لایه‌های نازک و لایه واسط، مجموعه برآیندی به روش فیزیکی بخار فلزات (PVD) لایه نشانی و ضخامت همه لایه‌ها به روش اپتیکی اندازه‌گیری می‌شود. با انجام آزمون‌های کیفی و بررسی طیف انعکاسی، دوام و پایداری مجموعه بررسی می‌شود. آینه آلومینیومی حاصل در ناحیه فروسرخ، انعکاسی بالاتر از ۹۹٪ دارد.

#### واژگان کلیدی

لایه نشانی، روش فیزیکی بخار فلزات، روش اپتیکی، آلومینیم.

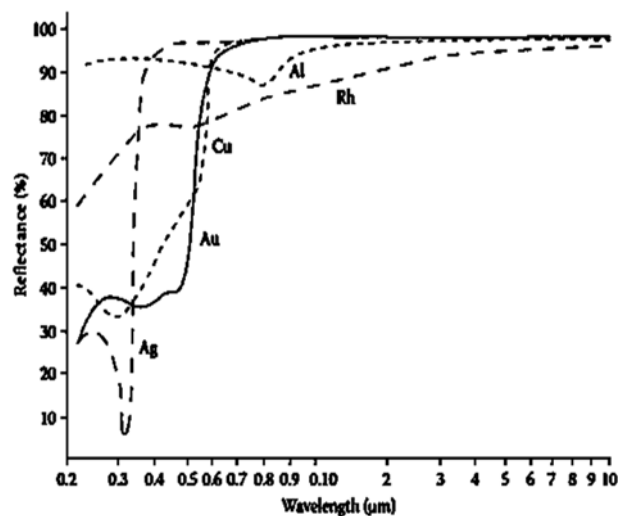
## مقدمه

استفاده از لایه‌های نازک و کاربردهای متفاوت آن در زمینه‌های اپتیکی، مکانیکی، تزیینی، الکترونیک و غیره توجه پژوهشگران زیادی را به خود جلب کرده است. سابقه دقیق علم لایه نازک دقیقاً مشخص نیست، اما اولین استفاده بشر درباره علم لایه نازک مربوط به خواص اپتیکی است. در واقع ابتدایی‌ترین نظریه‌پردازی‌ها توسط مارکوس مارسی (۱۶۴۸)، روبرت بویل (۱۶۶۳) گریمالدی (۱۶۶۵) و روبرت هوک (۱۶۶۵) مربوط به تحقیقات نظری مبهم در زمینه بازتاب و شکست نور و اثرات آن در تشکیل رنگ‌ها است؛ اما آنچه که بتوان آن را اپتیک لایه نازک نامید، اولین بار توسط روبرت بویل و هوک در زمان بررسی حلقه‌هایی به نام حلقه‌های نیوتن کشف شد. توسعه مفاهیم چند لایه‌ای‌ها و آنالیز آنها از قرن ۱۹ آغاز شد. در سال ۱۹۱۷ مقاله‌ای درباره چند لایه‌هایی که با ضرایب شکست بالا و پایین تهیه شده بودند توسط لرد رایلی منتشر شد. آغاز کاربردهای عملی لایه نازک تا دهه ۱۹۳۰ که تکنولوژی سیستم خلا و صنایع الکترونیک آن تکامل یافت، طول کشید. پس از آن شیوه‌های ضد بازتاب شکل گرفت. تولنسی در سال ۱۹۴۲ از قواعد جمع ابری برای آنالیز حلقه‌های فیزو استفاده کرد. از سال ۱۹۴۵، ساخت تجاری پالایه‌های فابری پرو شکل گرفت، روش‌های کنترل لایه نشانی، محاسبات مربوط به ثابت‌های اپتیکی، ساختار لایه‌ها، میزان چسبندگی و عوامل موثر بر آن توسعه یافت. اولین کنفرانس لایه نازک در دانشگاه مارسل در سال ۱۹۴۲ برگزار شد و یک سال بعد چهار کتاب در این زمینه انتشار یافت [۱-۳]. در صنایع اپتیکی نقش بسیار مهم لایه نازک در ساخت شکافنده‌های نوری، انواع پالایه‌ها، چند لایه‌ای‌های نابازتابنده قابل استفاده در عدسی دستگاه‌های اپتیکی و پنجره‌های دید، آینه‌های دی الکتریک بازتاب بالا و... انکارناپذیر است. در علوم مغناطیسی، لایه نازک جایگاه مهمی در فناوری ثبت اطلاعات روی نوارهای کاست و ویدیو، حافظه‌های رایانه‌ای، رمزنگاری و کلیدهای مغناطی‌اپتیکی، کاتالیزور در واکنش‌های فتوکاتالیزوری، حسگرهای نوری و جریان الکتریسیته در واکنش‌های الکتروشیمیایی ولتاژ پایین استفاده می‌شوند. فلزاتی مانند نقره، آلومینیوم، مس، طلا، تیتانیوم و رودیوم یکی از بهترین گزینه‌ها برای انتخاب بستره است. به طور کلی، یک لایه ۱۰۰ نانومتری از جنس

(آلومینیوم، نقره، طلا) پوشش بسیار عالی برای انواع برنامه‌های کاربردی اپتیکی را فراهم می‌کند. پوشش آلومینیوم بازتابی در حدود ۹۰ درصد است که بسیاری از اشعه‌های ماوراء بنفش، مرئی، و مناطق طیفی نزدیک به مادون قرمز حمایت می‌کند. با وجود اینکه نقره دارای بازتابشی در حدود ۹۵ درصد در ناحیه مرئی و مادون قرمز است؛ ولی انعکاس آن به شدت در امواج ماوراء بنفش کاهش می‌یابد. فلزاتی مانند طلا نیز انعکاس ذاتی بالایی دارند؛ اما به دلایلی از جمله قیمت بالا و کمیابی، کمتر استفاده می‌شوند. مس تنها در طول موج بلند مادون قرمز مفید است؛ در حالی که می‌توان از رودیوم در سراسر طول موجها به طور کامل طیفی برای برنامه‌های غیر حساس استفاده کرد. از بین فلزات نام برده آلومینیوم بهترین انتخاب است. برتری‌های عنصر گرانبهای آلومینیوم نسبت به سایر عناصر و فلزات در انتخاب به عنوان بستره اصلی بسیار زیاد است که برخی از آنها مانند فراوانی در بین عناصر، وزن بسیار کم، نرخ رسوب زیاد، مقرون به صرفه بودن، نقطه ذوب نسبتاً پایین، مقاومت در برابر خوردگی، ضریب شکست بالا و انعکاس ذاتی خوب، استفاده از آن در ضخامت‌هایی در حد نانو و کنترل ضخامت در حدود آنگستروم هنگام لایه نشانی از ویژگی‌های مفید برای انتخاب آلومینیوم است. در ناحیه طول موج مرئی و فرو سرخ بهترین فلز برای انتخاب برای بستره، آلومینیوم است. به منظور فهم دقیق برای انتخاب سطح بستره به ضرایب شکست برخی فلزات که در ناحیه فرو سرخ در شکل ۱ آمده است توجه می‌کنیم. لایه‌های اپتیکی عموم آینه‌ها در تمامی طول موجها با هر بستره‌ای علاوه بر ویژگی مهم انعکاس، باید دارای قابلیت تمیزکاری و استحکام در برابر خش‌های احتمالی باشد. اگر همان چیدمان لایه نشانی که برای بستره شیشه‌ای استفاده می‌شود، برای فلز آلومینیوم به کار برده شود، سطوح لایه نشانی شده به راحتی آسیب دیده و از سطح جدا می‌شوند. در این مرحله استفاده از یک لایه واسط مناسب مانند یک لایه چسبناک که دو ماده با ویژگی‌های ملکولی و ضرایب انبساط کاملاً متفاوت را در کنار یکدیگر ثابت نگه دارد و روی ویژگی‌های اپتیکی لایه‌های نازک بعد اثری منفی نداشته باشد و تا حد امکان به افزایش ویژگی انعکاس بالا با تعداد لایه‌های کمتر کمک کند، لازم است.

## روش کار

برای ساخت یک آینه فلزی نخستین گام انتخاب بستره مناسب است که آلومینیوم بهترین گزینه انتخاب است؛ گام دوم استفاده از یک ماده واسط مناسب است که هم خاصیت چسبندگی بسیار خوبی داشته باشد و هم بر روند ساخت تاثیر مطلوب بگذارد؛ گام بعدی استفاده از تئوری‌های موجود در زمینه طراحی آینه‌های فلز - دی الکتریک و نیز نرم‌افزارهای مورد نیاز برای طراحی مجموعه است تا به کمک آنها به طراحی اولیه آینه اقدام کنیم.



شکل ۱. نمودار میزان انعکاس از سطح چند فلز بر حسب طول موج

ماده با ضریب شکست بالا و پایین استفاده کرد. ناحیه طول موجی، گستره شفافیت، ضریب شکست، تبخیر مناسب، پایداری و استحکام از جمله مشخصه‌های تاثیر گذار در انتخاب مواد است [۴-۶].

## تست کمی و مقایسه میزان چسبندگی مواد بر سطح بستره

برای مقایسه میزان چسبندگی مواد بر سطح بستره، آزمون میکرو خراش را برای هر بستره لایه نشانی شده با مواد لایه واسط به روش بخار فلزات به صورت مجزا انجام می‌دهیم. در این آزمون از وزنه‌هایی واحدی برای ایجاد فشار بر سطح بستره لایه نشانی شده استفاده می‌شود که وزن آنها از کمتر به حداکثر تحمل قابل استفاده است.

در این آزمون، وزنه‌های وارد شده در دستگاه بر تیغه گوه (ایندنتر) فشار می‌آورند که این فشار باعث به وجود آمدن خراش‌های میکرومتری بر سطح لایه بستره می‌شود. عرض میانی خراش‌های به وجود آمده را اندازه‌گیری شده و فشار وزنه‌ها و میزان عرض خراش میانی برای هر ماده در جدول‌های ۱ تا ۳ آورده و تحلیل می‌شود.

جدول ۱. فشار بار و عرض خراش‌های وارد شده بر سطح ماده

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
عرض خوانش (μm)	فشار بار (mN)	شار بار (Pa)
۱۰/۶	۹۸/۱	۱۰
۱۱/۱	۱۴۷/۱	۱۵
۱۴	۲۵۴/۲	۲۵
۱۵/۹	۴۹۰/۳	۵۰
۱۷	۹۸۱	۱۰۰

جدول ۲. فشار بار و عرض خراش‌های وارد شده بر سطح ماده

NiCr		
عرض خوانش (μm) NiCr	فشار بار (mN)	شار بار (Pa)
۷/۹	۹۸/۱	۱۰
۹/۱	۱۴۷/۱	۱۵
۱۴/۱	۲۵۴/۲	۲۵
۱۴/۸	۴۹۰/۳	۵۰
۱۷	۹۸۱	۱۰۰

به دلیل عدم چسبندگی مناسب لایه‌های نازک اپتیکی بر سطح بستره فلزی آلومینیوم لازم است که از یک ماده به عنوان لایه واسط بر سطح بستره و لایه نازک استفاده کرد. در این باره علاوه بر توجه به میزان چسبندگی ماده واسط و سطح باید به عوامل دیگری از جمله نزدیک بودن خواص مکانیکی، عدم اختلاف زیاد در ضرایب انبساط حرارتی و حجمی ماده واسط و سطح بستره توجه کرد. موادی مانند Ni, TiN, NiCr, Ti, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> دارای این ویژگی‌ها است که این مواد را با استفاده از روش فیریکی بخار فلزات روی سطح بستره لایه نشانی می‌کنیم. قبل از هر طراحی باید ناحیه طیفی مورد نظر که در آن ناحیه فعالیت‌ها انجام می‌شود را در نظر گرفت. ناحیه طیفی مد نظر ما ناحیه فرورسرخ و مرئی است. در آینه‌های فلزی بهترین نوع طراحی آن است که از دو مجموعه متقارن، متشکل از دو

تا ۴ مشاهده کرد. طبق مشاهده و اندازه‌گیری شیب نمودارها به نتایج زیر می‌رسیم. ماده  $Al_2O_3$  دارای چسبندگی بیشتر و به ترتیب NiCr و Ti در رتبه‌های بعد قرار می‌گیرند. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت ماده علاوه بر چسبندگی خوب بر سطح Al دارای محاسنی از جمله پوشش طبیعی ماده بر سطح بستره، شفافیت ذاتی، ضریب شکست پایین و استحکام زیاد در برابر خش است [۷-۱۱].

### ساخت آینه

همان طور که می‌دانید آلومینیوم در بازه طول موجی (۳ تا ۵) میکرومتر دارای انعکاس ذاتی در حدود ۹۴/۵٪ و یک بازتاب دهنده مناسب است؛ اما بازتابی در حدود ۱۰۰٪ ایده‌آل است. فرض می‌شود در یک دستگاه اپتیکی، مجموعه‌ای ساده متشکل از ۱۰ آینه با انعکاس ۹۷٪ استفاده شود. در نگاه اول و سطحی میزان انعکاس آینه‌ها، مقداری خوب و قابل قبول است؛ اما اگر در این مجموعه نور ۱۰ بار با انعکاس ۹۷٪ بازتاب شود، کیفیت نور خروجی از این مجموعه اپتیکی با بازتاب ۱۰ آینه برابر با ۷۰٪ است که به هیچ عنوان مناسب نیست.

$$100\% - 97\% = 3\%$$

$$3\% \times 10 = 30\%$$

پس باید به دنبال طرح آینه‌ای با انعکاس حدود ۱۰۰٪ باشیم؛ از این رو در زیر مراحل طراحی و ساخت چند آینه کامل فرورسوخ توضیح داده می‌شود.

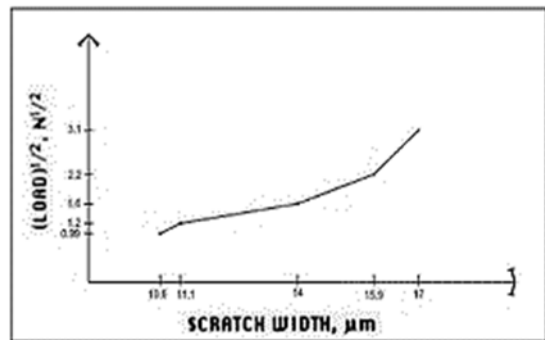
### طراحی آینه اول

در این طرح، Al به عنوان بستره و چهار لایه نازک بر سطح آن استفاده شده است. لایه نشانی ماده  $Al_2O_3$  به عنوان لایه واسط چسبنده ما عمل می‌کند. در لایه‌های بعد، دو نوع ماده با ضرایب شکست بالا و پایین (Low - High)، استفاده می‌شود [۱۲].

ابتدا قطعه آلومینیوم با لایه ۲۵۰ نانومتری  $Al_2O_3$  به روش بخار فیزیکی فلزات لایه نشانی شده است. بعد از لایه نشانی لایه واسط  $Al_2O_3$  میزان انعکاس ذاتی از سطح Al بسیار کاهش می‌یابد؛ سپس به منظور افزایش میزان انعکاس به مقدار قبل، یک لایه از جنس Al به ضخامت ۱۵۰ نانومتر نیز لایه نشانی شده است. سپس با انجام آزمایشات و تست‌های متعدد، به منظور افزایش شدت انعکاس از دو ماده دی‌اکتتریک  $SiO_2$  و Ge با

جدول ۳. فشار بار و عرض خراش‌های وارد شده بر سطح ماده Ti

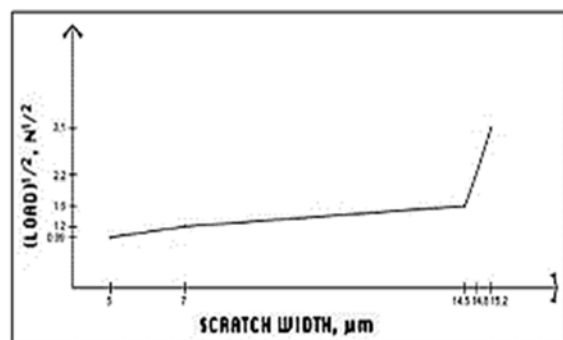
عرض خراش Ti ( $\mu m$ )	فشار بار (mN)	شار بار (Pa)
۵	۹۸/۱	۱۰
۷	۱۴۷/۱	۱۵
۱۴/۵	۲۵۴/۲	۲۵
۱۴/۸	۴۹۰/۳	۵۰
۱۵/۲	۹۸۱	۱۰۰



شکل ۲. آزمون خراش در پوشش  $Al_2O_3$



شکل ۳. آزمون خراش در پوشش NiCr



شکل ۴. آزمون خراش در پوشش Ti

شیب نمودار در قسمت میانی اشکال، نماینده میزان چسبندگی و استحکام لایه برای هر بستره است. هر چه این شیب کمتر، میزان چسبندگی ماده لایه نشانی بر سطح بستره بیشتر است و این بدین معنی است که ماده لایه نشانی شده یاد شده دارای استحکام بیشتری است. مقدار شیب نمودار را برای سه ماده واسط می‌توان در شکل‌های ۲

### طراحی آینه دوم

در این طراحی سعی شده است که آینه فروسرخ کاملی طراحی شود که بدون استفاده از یک لایه ۱۵۰ نانومتری فلز آلومینیوم، انعکاسی بسیار بالاتر از طلا داشته باشد. (انعکاس فلز طلا در حالت تجربی بالا و ۱۰۰٪ در نظر گرفته می شود) به همین منظور با بررسی در این زمینه به طراحی آینه‌ای زیر دست یافتیم. لازم است یادآوری کنیم که، این طراحی آینه در دو مرحله و با طراحی دو لایه و چهار لایه انجام شده است.

### طراحی با دو لایه نازک

در این طرح Al به عنوان بستره و از دو لایه نازک بر سطح آن استفاده شده است. لایه نشانی ماده  $Al_2O_3$  به عنوان لایه واسط چسبنده عمل می کند؛ اما نکته بسیار جالب این طراحی بدین صورت است که،  $Al_2O_3$  در این آینه علاوه بر این که به عنوان لایه واسط چسبنده است، با داشتن ضریب شکست ۱٫۶۵ نقش یک لایه نازک با ضریب شکست پایین (Low) را بر عهده دارد که ما در این طراحی جدید از ماده  $SiO_2$  به عنوان دی الکتریک با ضریب شکست پایین دیگر استفاده نکرده ایم که از لحاظ صرف هزینه و دقت لایه نشانی بسیار مهم است. در لایه بعد، ماده Ge به عنوان یک ماده با ضریب شکست بالا (High)، استفاده می شود [۱۳-۱۸]. این طراحی پس از چندین مرحله انجام آزمون و خطا در بهینه ترین حالت به دست آمده است. پارامترهای مفید لایه نشانی را در جدول ۵ و پارامترهای طراحی آینه فروسرخ توسط نرم افزار مکتود را در جدول ۶ مشاهده می کنیم. همچنین می توان نمایشی از طیف انعکاسی به دست آمده در طول موج ۳-۵ میکرومتر توسط نرم افزار طراحی مکتود را در شکل ۶ مشاهده کرد.

جدول ۵. پارامترهای مفید لایه نشانی در طراحی دوم آینه فروسرخ

با دو لایه  $Al_2O_3$  و Ge

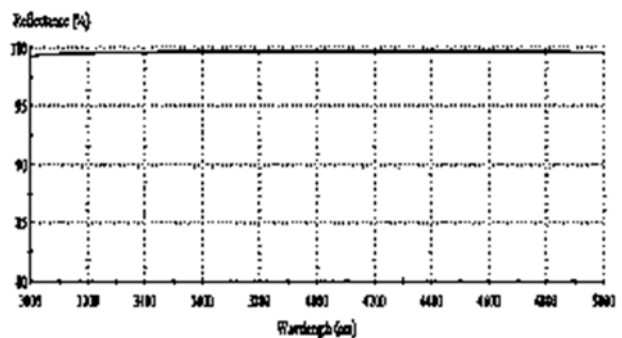
ماده	جرم مولی (mbar)	فشار نسبی خلا (mbar)	فشار جزئی اکسیژن (mbar)	دمای بستره (C)	سرعت انباشت (nm/s)
$Al_2O_3$	۴	$1 \times 10^{-5}$	$10^{-4}$	۲۵۰	۰/۳۵
Ge	۵/۴	$1 \times 10^{-5}$	.....	۲۵۰	۰/۸

ضخامت های بهینه ای به ترتیب ۶۰۷ و ۲۶۰ نانومتر پوشانیده می شود [۱۵-۱۳].

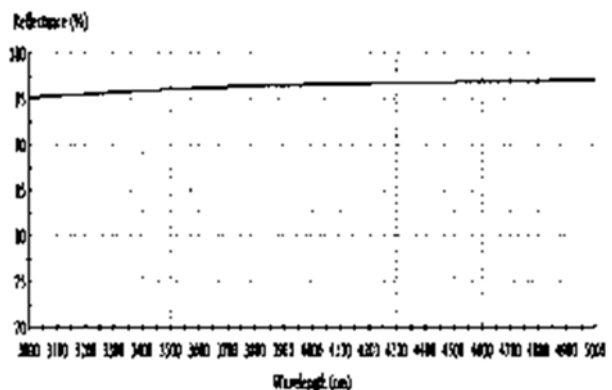
پارامترهای مفید لایه نشانی در جدول ۵ مشاهده می شود؛ همچنین می توان نمایشی از طیف های انعکاسی به دست آمده در طول موج ۳-۵ میکرومتر توسط نرم افزار طراحی مکتود را در شکل های ۴ تا ۵ مشاهده کرد که شامل، طیف انعکاسی فلز آلومینیوم خالص، آلومینیوم لایه نشانی شده با ضخامت ۲۵۰ نانومتر از ماده واسط اکسید آلومینیوم  $Al_2O_3$  و طیف طراحی آینه فروسرخ اول است [۱۸-۱۶].

جدول ۴. پارامترهای مفید لایه نشانی در طراحی آینه اول فروسرخ

ماده	جرم مولی (mbar)	فشار نسبی خلا (mbar)	فشار جزئی اکسیژن (mbar)	دمای بستره (C)	سرعت انباشت (nm/s)
$Al_2O_3$	۴	$1 \times 10^{-5}$	$10^{-4}$	۲۵۰	۰/۳۵
Al	۶	$1 \times 10^{-5}$	.....	۲۵۰	۰
$SiO_2$	۲/۲	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	۲۵۰	۰/۶۵
Ge	۵/۴	$1 \times 10^{-5}$	.....	۲۵۰	۰/۸



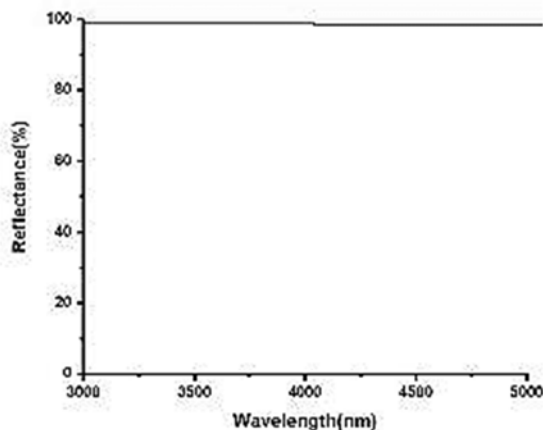
شکل ۵. طیف انعکاسی طراحی آینه فروسرخ اول، توسط نرم افزار طراحی مکتود



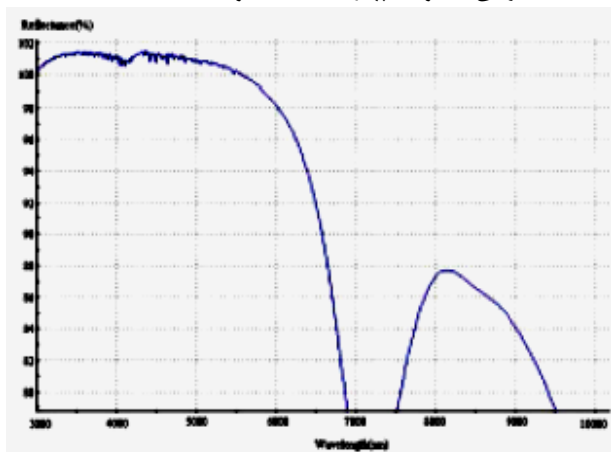
شکل ۶. طیف انعکاسی آلومینیوم لایه نشانی شده با ضخامت ۲۵۰ نانومتر از ماده واسط اکسید آلومینیوم، توسط نرم افزار طراحی مکتود

جدول ۶. پارامترهای مهم طراحی آینهٔ دوم فرورسرخ با دو لایه  $Ge$  و  $Al_2O_3$

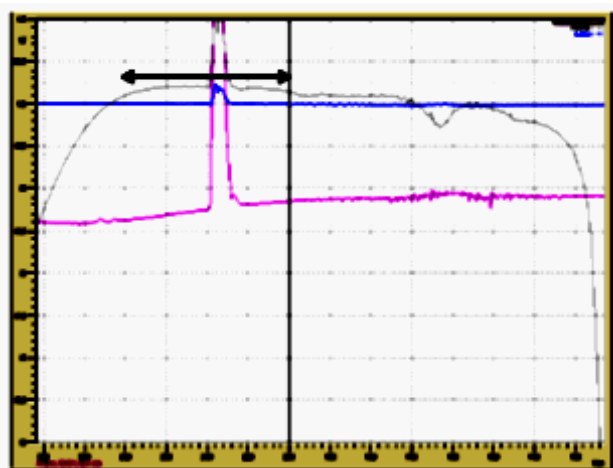
لایه	مواد	ضرب شکست	ضرب خاموشی	مختصات فیزیکی (nm)
حرفظ	Air	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	-----
۱	Ge	۴/۳۵۰	۰/۰۰۰	۲۲۹/۷
۲	$Al_2O_3$	۱/۶۵۰	۰/۰۰۰	۵۶۸/۶
بستر	Al	۶/۱۰۰	۳۰/۴۰	-----



شکل ۷. طیف انعکاسی طراحی آینهٔ فرورسرخ دوم توسط نرم‌افزار طراحی مکتود با چهار لایه  $Ge$  و  $Al_2O_3$



شکل ۸. طیف انعکاسی طراحی آینهٔ فرورسرخ دوم با چهار لایه  $Ge$  و  $Al_2O_3$  توسط دستگاه FT-IR



شکل ۹. مقایسه طیف انعکاسی توسط دستگاه FTIR نمودار بنفش، مربوط به انعکاس بستره خام و نمودار نقره‌ای، انعکاس مجموعهٔ لایه نشانی شده را نمایش می‌دهد. نمودار آبی رنگ نیز انعکاس نسبی طلا را که حدود ۱۰۰٪ است نشان می‌دهد

### طرح دوم با دو لایهٔ نازک

این طرح بسیار شبیه به طراحی قبل است و از دو ماده  $Ge$  و  $Al_2O_3$  با ضریب شکست‌های بالا و پایین استفاده می‌شود. تنها تفاوت این طراحی اضافه کردن دو لایه دیگر از مواد لایه نازک  $Al_2O_3$  و  $Ge$  (چهار لایه نازک) است که به ترتیب با ضرایب شکست بالا و پایین یک در میان قرار می‌گیرند. انعکاس طرح دو لایه‌ای بخش قبل حدود ۹۹٪/۲ است که با اضافه شدن دو لایهٔ دیگر از مواد  $Al_2O_3$  و  $Ge$  انعکاسی در حدود ۹۹٪/۹۸ خواهیم داشت که، یک موفقیت بسیار بزرگ در امر طراحی و ساخت آینهٔ کامل در بازدهی طول موجی ۳ تا ۵ میکرومتر است. پارامترهای مفید لایه نشانی این طرح همانند پارامترهای آینه با دو لایه است. پارامترهای طراحی آینهٔ دوم فرورسرخ توسط نرم‌افزار مکتود را می‌توان در جدول ۷ مشاهده کرد. همچنین می‌توان نمایشی از طیف انعکاسی به دست آمده در طول موج ۳-۵ میکرومتر توسط نرم‌افزار طراحی مکتود را در شکل ۷ مشاهده کرد.

جدول ۷. پارامترهای مهم طراحی آینهٔ دوم فرورسرخ با چهار لایه  $Ge$  و  $Al_2O_3$

لایه	مواد	ضرب شکست	ضرب خاموشی	مختصات فیزیکی (nm)
حرفظ	Air	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	-----
۱	Ge	۴/۳۵۰	۰/۰۰۰	۲۲۹/۷
۲	$Al_2O_3$	۱/۶۵۰	۰/۰۰۰	۵۶۸/۶
۳	Ge	۴/۳۵۰	۰/۰۰۰	۲۲۹/۷
۴	$Al_2O_3$	۱/۶۵۰	۰/۰۰۰	۵۶۸/۶
بستر	Al	۶/۱۰۰	۳۰/۴۰	-----

این آینه به عنوان یک بازتاب کننده امواج بسیار قوی در محدوده فرسرخ استفاده می‌شود. طراحی آینه‌های فرسرخ شامل یک بستره آلومینیومی و یک لایه واسط از جنس اکسید آلومینیوم که، وظیفه لایه چسبنده مابین بستره و لایه‌های نازک نانومتری بعد را بر عهده دارد. طراحی توسط نرم‌افزار پیشرفته طراحی لایه‌های نازک انجام شد. در این طراحی زاویه تابش نزدیک به عمود گزارش شده است. پارامترهای مختلفی از جمله نوع و ویژگی‌های مواد دی‌الکتریک، تعداد لایه‌ها و بازه طول موجی در کارایی آینه‌های لایه نازک فلز- دی الکتریک موثر است. نمونه‌ها به روش تبخیر فیزیکی در محفظه خلاء و توسط بوتۀ مقاومت گرمایی و پرتو الکترونی، لایه نشانی و ساخته شد. بعد از چندین طراحی و اجرا و بهینه‌سازی پارامترها، در نهایت آینه فرسرخ نهایی طراحی و ساخته شد. طیف انعکاسی آینه‌ها توسط طیف سنج اندازه‌گیری شد. میزان انعکاس برای آینه‌های ساخته شده بالاتر از ۹۹٪ است.

طبق شکل ۸ و ۹، طیف انعکاسی گرفته شده توسط دستگاه FT-IR و مقایسه بین دو سطح قبل از لایه نشانی و بعد از آن که سطح آینه لایه نشانی شده با ۴ لایه نازک  $Al_2O_3$  و Ge که یکی در میان روی سطح بستره آلومینیوم قرار گرفته است. نمودار بنفش رنگ، مربوط به انعکاس بستره خام آلومینیوم و نمودار قرمز، انعکاس مجموعه آینه لایه‌نشانی شده را نمایش می‌دهد. نمودار آبی رنگ نیز انعکاس نسبی طلا را که حدود ۱۰٪ است نشان می‌دهد. پس با توجه به نمودار می‌توان مشاهده کرد که لایه نشانی بستره آلومینیوم بار چهار لایه دی الکتریک با ضریب شکست بالا و پایین به ما انعکاسی بالاتر از طلا می‌دهد [۱۹-۲۴].

### بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش آینه‌ای فلز- دی الکتریک با بستره فلزی آلومینیوم در طول موج ۳ تا ۵ میکرومتر طراحی و ساخته شد.

### References

- [1] H. A. Macleod, "Thin film optical filters", IOP publishing. 2002.
- [2] P.M. Martin, Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings: Science, Applications and Technology; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2009.
- [3] K. Müller, C.Schönweitz, H.C Langowski, Thin Laminate Films for Barrier Packaging Application-Influence of Down Gauging and Substrate Surface Properties on the Permeation Properties. Packag. Technol.Sci., 25(2012) 137-148.
- [4] A. Piegari. "Metal - dielectric coatings for variable transmission filters with wide rejection bands".2004.
- [5] Y. Wang, M. Nastasi, Handbook Modern Ion Beam Materials Analysis, 2nd edition, Cambridge University Press, 2010.
- [6] H. M. Chen, C. F. Hsin, R.S. Liu, S.F. Hu, C.Y. Huang, Controlling Optical Properties of Aluminum Oxide Using Electrochemical Deposition, *J. Electrochem. Soc.*, 154, (2007) K11-K14.
- [7] M. Alvisi, G. De Nunzio, M. Di Giulio, M. C. Ferrara, M. R. Perrone, L. Protopapa, and L. Vasanelli. "Deposition of  $SiO_2$  films with high laser damage thresholds by Ion-Assisted electron-beam evaporation". *Applied optics*, 38, 1999
- [8] R. M. Wood, "Laser -induced damage of optical materials", Institute of physics publishing, Bristol, 2003.
- [9] P. Gu, X. Liu, and J. Tang, "Damage thresholds of  $ZrO_2 - Y_2O_3 / SiO_2$  reflectors used for XeCl lasers". *Applied optics*, 32, 1993.
- [10] H. Frey, H.R. Khan, Handbook of Thin Film Technology; Springer: Berlin, Germany, 2010.
- [11] Mc.Clure, D.J. N. Copeland, Evaporated Aluminium on Polyester: Optical, Electrical, and Barrier Properties as a Function of Thickness and Time (Part II). (accessed on 29 December 2016).

- [12] M. Lindner and M. Schmid, Thickness Measurement Methods for Physical Vapor Deposited Aluminum Coatings in Packaging Applications: A Review, *Coatings* 7(2017) 9.
- [13] N. Selvakumar, H.C. Barshilia, Review of physical vapor deposited (PVD) spectrally selective coatings for mid- and high-temperature solar thermal applications, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 98 (2012) 1–23.
- [14] E. Bugnicourt, T. Kehoe, M. Latorre, C. Serrano, S. Philippe, and M. Schmid, Recent Prospects in the Inline Monitoring of Nanocomposites and Nanocoatings by Optical Technologies. *Nanomaterials* 6, (2016)150.
- [15] D.M. Mattox, Physical vapor deposition (PVD) processes, *Metal Finish*. 99(2001) 409–423.
- [16] F. Ashrafi zadeh, "Adhesion evaluation of PVD coatings to aluminium substrate", *Elsevier Science S.A* .130( 2000).
- [17] D. Yuquan, O. Northwood, "PVD NiCr intermetallic coatings: microstructure and mechanical properties", Department of Mechanical and Materials Engineering, University of Windsor, Windsor, 1997.
- [18] A. Phillips, J. Miller, W. Brown, D. Hilyard, B. Dupraw, V. Wallace, Dave Cowley, "Progress toward high-performance reflective and anti-reflection coatings for astronomical optics", *Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes Eli Atad*. 2008.
- [19] J. Jung, H. Kyung, R. Shaginyan, G. Han, " Deposition of Ti thin film using the magnetron sputtering method", *Thin Solid Films*. 435( 2003).
- [20] L. Zhang, L.Q. Shi, B. Zhang, Y. Wang, " Deposition of dense and smooth Ti films using ECR plasma-assisted magnetron sputtering", *Surface and Coatings Technology*, 203(2009).
- [21] M. Aggerbeck, S. Canulescu, K. Dirschlerl, V. Johansen, S. Engberg, J. Schou, R. Ambat Appearance of anodised aluminium: Effect of alloy composition and prior surface finish *Surface and Coatings. Technology* 254(2014) 28-41.
- [22] M. Aggerbeck, A. Junker-Holst, D. Nielsen, V. Gudla, R. Ambat Anodisation of sputter deposited aluminium-titanium coatings: Effect of microstructure on optical characteristics *Surface and Coatings. Technology* 254 (2014) 138-144.
- [23] I. H. Pérez, Multilayer solar selective coatings for high temperature solar applications: From concept to design, Ph.D. thesis, Sevilla, junio 2016.
- [24] M. Aggerbeck, Tailored Aluminium based Coatings for Optical Appearance and Corrosion Resistance Technical Ph.D. thesis, University of Denmark Department of Mechanical Engineering, (2014).