



## طراحی و لایه‌نشانی پالایه اپتیکی بلندگذر ۳/۷-۴/۸ میکرومتر با ویژگی انعکاس بالا در ناحیه ۷۵۰-۹۰۰ نانومتر و تک طول موج ۱۰۶۴ نانومتر

علیرضا فیروزی‌فر، محمد جان‌نثاری، حسین زابلیان، جواد شاه‌محمدی، محمود وریایی، مهدی مردیها

گروه پژوهشی لایه‌های نازک، صنایع الکترو اپتیک صایران، اصفهان، ایران

چکیده - در این مقاله طراحی و ساخت پالایه‌ی بلندگذر ۳/۷-۴/۸ میکرومتر با ویژگی بازتاب بالا در ناحیه ۱۰۶۴ و ۷۵۰-۹۰۰ نانومتر تحت زاویه ۴۵ درجه گزارش شده است. لایه‌نشانی در محفظه‌ی خلا توسط تفنگ الکترونی صورت گرفت. ضخامت لایه‌ها بوسیله ضخامت‌سنج کریستالی اندازه‌گیری شد. طیف تراگسیل و بازتاب نمونه‌ها به وسیله طیف‌سنج دوباریکه‌ای (UV-VIS) و نیز طیف سنج FTIR اندازه‌گیری شد. پالایه بدست‌آمده دارای کمینه بازتاب ۱/۷ درصد در ناحیه ۳/۷-۴/۸ میکرومتر و میانگین بازتاب ۹۸/۴ درصد در ناحیه ۷۵۰-۹۰۰ نانومتر و ۹۷/۸ درصد در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر می‌باشد.

کلید واژه- پالایه اپتیکی بلندگذر، طیف‌سنج دوباریکه‌ای، طیف سنج FTIR.

## Design and Fabrication of 3.7-4.8 Micrometer Long-wave Pass Filter with High Reflection on 1064 and 750-900 nm

A.R. Firoozifar, M. Jannesari, H. Zabolian, J. Shahmohammadi, M. Varpaei and M. Mardiha

Thin film research group, Sairan Electro Optic Industry, Isfahan, Iran

Abstract- In this research design and fabrication of 3.7-4.8 micrometer long-wave pass filter with high reflection on 1064 and 750-900 nm unther 45 degree has been reported. Deposition was performed in vacuum chamber using electron gun deposition method. Quartz crystal was used to monitor the thickness of thin films. Transmission spectra of coated samples were measured using a double-beam spectrophotometer and a FTIR spectrophotometer. Finally the optical long-wave pass filter with minimum reflection 3.8 percent and mean reflection of 98.4 percent in 750-900 nm range and 97.8 percent in 1064 nm was fabricated.

Keywords: long-wave pass Filter, double-beam spectrophotometer, FTIR spectrophotometer.

## ۱- مقدمه

برخوردار می‌باشد. سیلیکون با ضریب شکست  $3/4$  (در طول موج  $3$  میکرومتر) و بازه‌ی شفافیت  $9-1$  میکرومتر نیز دارای ویژگی‌های مکانیکی و پایداری محیطی مطلوبی می‌باشد [۳]. بسترها قبل از اجرای فرایند لایه‌نشانی به روش استاندارد تمیز شدند [۴]. اجرای پروسه‌ها توسط دستگاه لایه‌نشانی BAK-760 انجام شد. خلا شروع لایه‌نشانی  $5 \times 10^{-1}$  میلی بار و دمای لایه‌نشانی  $250$  درجه سانتیگراد انتخاب شد. نرخ انباشت برای  $Si$  و  $SiO_2$  به ترتیب  $0/5$  و  $0/4$  نانومتر بر ثانیه انتخاب شد. طیف‌سنج دوباریکه‌ای (UV-VIS) و نیز طیف‌سنج FTIR جهت طیف‌سنجی از نمونه‌ها استفاده شدند.

## ۳- طراحی

ویژگی‌های اپتیک لایه‌های نازک در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار طراحی لایه‌های نازک مکلنود<sup>۱</sup> طراحی و بهینه‌سازی شد. در این نرم‌افزار با تعریف مواد با ضریب شکست‌های کاملاً کنترل شده و نیز با تعریف محدوده‌های طیفی که مورد انتظار ما می‌باشد می‌توان ضخامت‌های بهینه هر یک از لایه‌ها را با دقت یک دهم نانومتر تعیین نمود. سپس ضخامت‌ها به دستگاه لایه‌نشانی شناسانده شده و پارامترهای دیگر همچون دما، آهنگ لایه‌نشانی، زمان عملیات گلو<sup>۲</sup> و دیگر پارامترها بر اساس تجربه‌های موجود اجرا می‌شوند. طرح پالایه مورد نظر که توسط نرم‌افزار مکلنود بدست آمده است در جدول شماره ۱ مشاهده می‌گردد. طیف بازتاب مربوط به طراحی انجام شده که توسط نرم‌افزار مکلنود تحت زاویه فرودی  $45$  درجه ترسیم شده است نیز در شکل شماره ۱ مشاهده می‌گردد. طیف ارائه شده در شکل ۱ میانگین طیف‌هایی با قطبش‌های  $s$  و  $p$  می‌باشد که بصورت طیف میانگین ترسیم شده است. در این طراحی میانگین بازتاب در بازه  $3/7$  تا  $4/8$  میکرومتر برابر  $0/5$  درصد و برای بازه  $750$  تا  $900$  نانومتر برابر  $98/9$  درصد و در تک طول موج  $1064$  نانومتر برابر با  $97$  درصد می‌باشد. شایان ذکر است که این پالایه دارای بازتاب بالا در ناحیه  $750$  تا  $900$  نانومتر و تک طول موج  $1064$  می‌باشد اما در بازه  $3/7$  تا  $4/8$

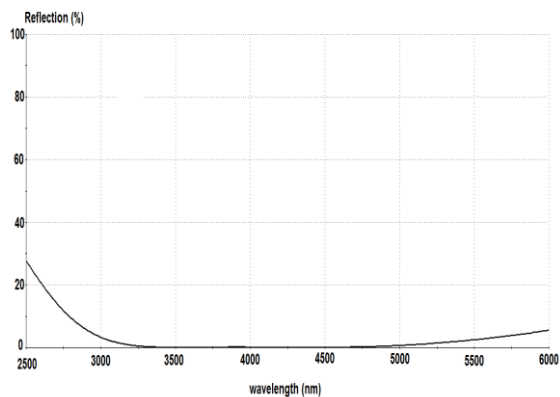
پالایه‌های بلندگذر اپتیک در ناحیه‌ی فروسرخ مجموعه‌ی چندلایه‌ای از دو ماده با ضرایب شکست بالا و پائین می‌باشند که یک در میان در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. تداخل سازنده‌ی باریکه‌های بازتاب شده از مرزها، بازتاب و تراگیل در بازه‌ی طول‌موج طراحی‌شده را فراهم می‌آورد. لایه‌نشانی پالایه‌های دی‌الکتریک در ناحیه‌ی فروسرخ می‌بایست با توجه به بازه‌ی شفافیت و ضریب شکست مواد و بستره در آن ناحیه خاص صورت پذیرد. [۱]

در این پژوهش تلاش شده تا با انباشت یک مجموعه‌ی تمام دی‌الکتریک بر سطح بستره سیلیکون اپتیک که برای ناحیه طول موجی  $3/7$  تا  $4/8$  میکرومتر طراحی و ساخته شده، بازتاب پائین در این ناحیه طول موجی و نیز بازتاب بالا در ناحیه طول موجی  $750$  تا  $900$  نانومتر و طول‌موج  $1064$  نانومتر تحت زاویه فرودی  $45$  درجه حاصل شود. این پالایه جهت جداسازی باریکه‌ی نور فرودی به یک دوربین که در دو ناحیه  $3/7$  تا  $4/8$  میکرومتر و  $750$  تا  $900$  نانومتر همراه با یک فاصله‌سنج که در طول‌موج  $1064$  نانومتر کار می‌کند استفاده می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

از ویژگی‌های لازم برای مواد مورد استفاده در مجموعه‌ی پالایه‌ی تمام دی‌الکتریک فوق می‌توان به شفافیت و عدم وجود جذب اپتیک در بازه‌ی  $5-3$  میکرومتر و فروسرخ نزدیک، استحکام مکانیکی و نیز پایداری محیطی مطلوب اشاره نمود. میزان بازتاب در هر ناحیه به اختلاف ضرایب شکست دو ماده بستگی دارد. هرچه تفاوت ضریب شکست بیشتر باشد، دستیابی به هدف اپتیک مورد نظر در مجموعه بیشتر فراهم می‌شود. پهنای ناحیه‌ی بازتاب نیز تابع اختلاف ضریب شکست دو ماده است. محاسبات نظری مربوط به طراحی چنین مجموعه‌هایی، در اغلب کتاب‌های اپتیک لایه-های نازک موجود می‌باشد [۲]. با توجه به مطالب گفته شده، از دو ماده‌ی سیلیکون و دی‌اکسید سیلیکون ساخت شرکت Umicore با خلوص  $99/999$  درصد به عنوان مواد لایه‌نشانی و از سیلیکون به عنوان بستره استفاده گردید. در مقایسه با بقیه مواد اکسیدی،  $SiO_2$  با ضریب شکست  $1/4$  (در طول‌موج  $3$  میکرومتر) و بازه‌ی طول‌موجی شفافیت  $9-2$  میکرومتر از بهترین خواص مکانیکی و پایداری محیطی

<sup>۱</sup> Essential Macleod<sup>۲</sup> Glow discharge proces



شکل ۲: طیف بازتاب ترسیم شده مربوط به لایه‌نشانی پهن باند ضد بازتاب توسط نرم‌افزار مکلنود تحت زاویه ۴۵ درجه.

طیف بازتاب مربوط به طراحی انجام شده که توسط نرم‌افزار مکلنود تحت زاویه فرودی ۴۵ درجه ترسیم شده است در شکل شماره ۲ مشاهده می‌گردد.

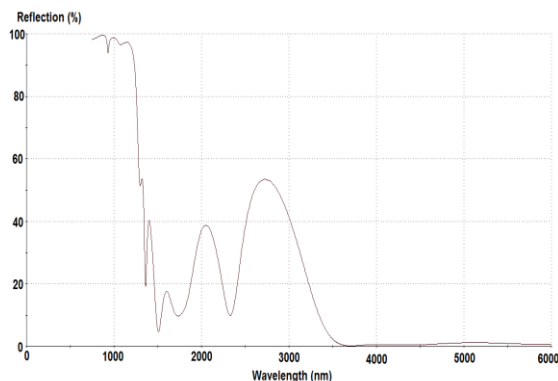
#### ۴- نتایج و بحث

پس از بدست آوردن ضریب تبدیل<sup>۳</sup> ضخامت برای هر یک از لایه‌های Si و SiO<sub>2</sub> برای دستگاه، مبادرت به اجرای فرایند لایه‌نشانی کردیم. ضریب تبدیل از تقسیم ضخامت واقعی لایه، بر ضخامت نمایش داده شده توسط کریستال دستگاه بدست می‌آید. در ابتدا یک سمت بستره با پوشش پهن‌باند ضدبازتاب لایه‌نشانی شد که طیف بازتاب آن در محدوده ۲۵۰۰ تا ۲۵۰۰۰ نانومتر تحت زاویه ۴۵ درجه با استفاده از قطبنده ZnSe که توسط طیف‌سنج FTIR اندازه‌گیری شد، در شکل شماره ۳ مشاهده می‌گردد. میانگین بازتاب در بازه ۳/۷ تا ۴/۸ میکرومتر برابر ۰/۴ درصد بدست آمد که قابل قبول است. سپس سمت دیگر قطعه با پوشش ۱۱ لایه مربوط به پالایه طراحی شده لایه‌نشانی گردید. طیف‌سنجی بازتابی FTIR با شرایط قبل، از سمتی که لایه‌نشانی پالایه انجام شده بود، صورت گرفت. میانگین بازتاب در بازه ۳/۷ تا ۴/۸ میکرومتر تحت زاویه ۴۵ درجه برابر ۱/۷ درصد بدست آمد که قابل قبول است. اختلاف این مقدار با مجموع مقادیر بازتاب طراحی مربوط به هر دو پوشش که برابر با ۰/۸ درصد بود، ناشی از عواملی همچون خطا در طیف‌سنجی، خطا در کنترل دقیق استکیومتری مواد و در نتیجه خطا در ضریب

جدول ۱: لایه‌ها و ضخامت‌های نرم‌افزار مکلنود برای طراحی پالایه

شماره لایه	بستره (Si)	ضخامت (نانومتر)
۱	SiO <sub>2</sub>	۴۹/۷
۲	Si	۳۴۷/۱
۳	SiO <sub>2</sub>	۱۰۰/۳
۴	Si	۲۸۴/۸
۵	SiO <sub>2</sub>	۱۴۱/۳
۶	Si	۷۵/۹
۷	SiO <sub>2</sub>	۱۴۵/۶
۸	Si	۶۶/۵
۹	SiO <sub>2</sub>	۱۸۱/۵
۱۰	Si	۵۱/۸
۱۱	SiO <sub>2</sub>	۱۰۶۵/۱

میکرومتر بطور عبوری عمل می‌کند. از این رو سمت دیگر این پالایه می‌بایست با لایه‌نشانی پهن باند ضد بازتاب در بازه ۳/۷ تا ۴/۸ لایه‌نشانی گردد. طرح لایه‌نشانی پهن باند ضد بازتاب مورد نظر که توسط نرم‌افزار مکلنود بدست آمده است در جدول شماره ۲ مشاهده می‌گردد. در این طراحی میانگین بازتاب در بازه‌ی ۳/۷ تا ۴/۸ میکرومتر برابر ۰/۳ درصد می‌باشد.

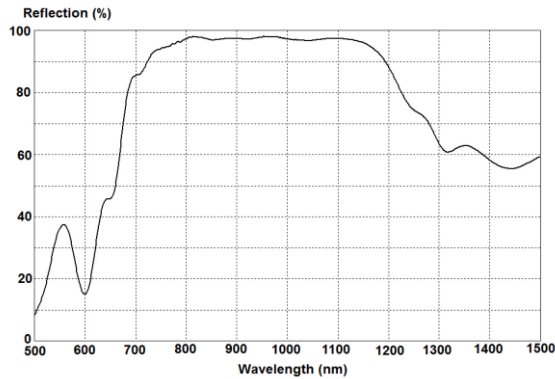


شکل ۱: طیف بازتاب مربوط به پالایه توسط نرم‌افزار مکلنود تحت زاویه ۴۵ درجه.

جدول ۲: لایه‌ها و ضخامت‌های نرم‌افزار مکلنود برای طراحی لایه‌نشانی پهن باند ضد بازتاب.

بستره (Si)	ضخامت (نانومتر)
SiO <sub>2</sub>	۱۳۴/۴
Si	۱۱۵/۰
SiO <sub>2</sub>	۷۷۳/۳

<sup>۳</sup> Tooling factor



شکل ۵: طیف بازتاب میانگین دو قطبش S و p اندازه‌گیری شده از قطعه تحت زاویه ۴۵ درجه اندازه‌گیری شده توسط طیف سنج UV-VIS.

### ۵- نتیجه‌گیری

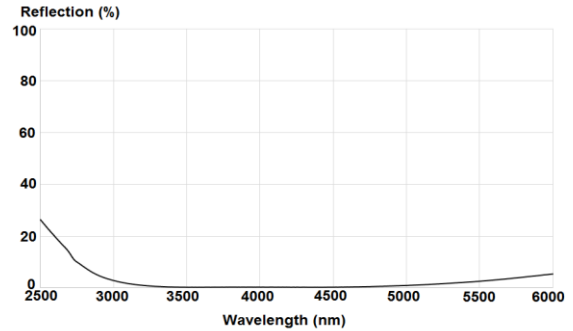
می‌توان با لایه‌نشانی یک مجموعه‌ی چندلایه‌ای از مواد دی-الکترونیک با ضرایب شکست بالا و پایین و نیز از طریق کنترل شرایط انباشت، پالایه بلندگدر با کمینه بازتاب در بازه ۳/۷ تا ۴/۸ میکرومتر و بیشینه بازتاب در ناحیه ۷۵۰ تا ۹۰۰ نانومتر و تک طول موج ۱۰۶۴ تحت زاویه ۴۵ درجه بر بستره سیلیکون تولید کرد. بکارگیری سامانه‌ی ضخامت-سنجی کریستالی با دقت بالا در فرآیند لایه‌نشانی، دقت و تکرارپذیری ساخت پالایه را بسیار افزایش می‌دهد.

### سپاسگزاری

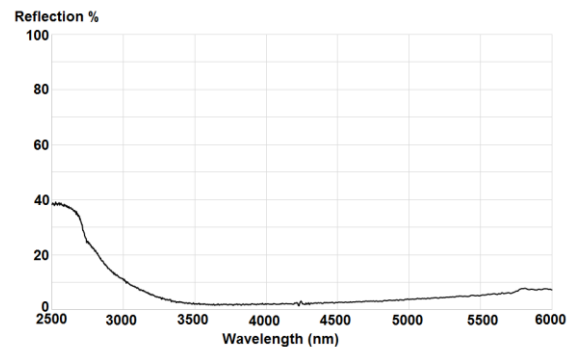
از آقای مهندس محمود ورپایی جهت همکاری‌های صمیمانه در راستای بکارگیری هرچه بهتر دستگاه لایه‌نشانی تشکر می‌نمایم.

### مراجع

- [1] H. A. Macleod, *Thin Film Optical Filters*, Fourth Edition, Chapter 6, Thin Film Center Inc, Tucson, Arizona, USA, 2010.
- [2] H. A. Pulker, *Coating On Glass*, Second Edition, p. 441, Basic Research Laboratory, Balzers AG, Liechtenstein, ELSEVIER, 1999.
- [3] Palik, E. D., *Handbook of Optical Constants in Solids*, Academic Press, 1985.
- [4] S.A.R. Firoozifar, A. Behjat, E. Kadivar, S.M.B. Ghorashi, M. Borhani Zarandi, "A study of the optical properties and adhesion of zinc sulfide anti-reflection thinfilm coated on a germanium substrate", *Journal of Applied Surface Science*, Vol. 258, pp. 818 – 821, 2011.



شکل ۳: طیف بازتاب اندازه‌گیری شده پوشش پهن باند ضد بازتاب تحت زاویه ۴۵ درجه اندازه‌گیری شده توسط طیف سنج FTIR.



شکل ۴: طیف بازتاب اندازه‌گیری شده از سمت پوشش پالایه تحت زاویه ۴۵ درجه اندازه‌گیری شده توسط طیف سنج FTIR.

شکست شکست مواد و نیز به علت خطا در بدست آوردن ضریب تبدیل جهت ضخامت‌سنجی مواد می‌باشد. طیف‌سنجی بازتابی UV-VIS در محدوده ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر تحت زاویه ۴۵ درجه با استفاده از قطبنده دستگاه از سمتی که لایه‌نشانی پالایه انجام شده بود صورت گرفت که در شکل شماره ۵ مشاهده می‌گردد. میانگین بازتاب در بازه ۷۵۰ تا ۹۰۰ نانومتر برابر ۹۸/۴ درصد بدست آمد که قابل قبول است. همچنین بازتاب در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر برابر ۹۷/۸ درصد آمد که قابل قبول می‌باشد. قطعه تولید شده پس از انجام آزمون طیف‌سنجی، مورد تست چسبندگی و سایش ملایم مطابق با استاندارد MIL-F-48616 در آزمایشگاه لایه‌نشانی شرکت صنایع الکترواپتیک صایران که دارای استاندارد ISO/IEC 17025:2005 می‌باشد قرار گرفت که هر دو آزمون را با موفقیت پشت سر گذاشت. همچنین این قطعه در آزمایشگاه شرایط محیطی مورد آزمون رطوبت و حرارت و بروودت و مه نمکی مطابق با استاندارد MIL-F-48616 قرار گرفت که این آزمون‌ها را با موفقیت پشت سر گذاشت.