بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

طراحی و ساخت پالایه‌ی تداخلی تمام دی الکتریک نوارگذر باریک با ناحیه جذب وسیع در طول موج ۹۰۵ نانومتر به روش ضخامت سنجی اپتیکی

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

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

چکیده – در این مقاله طراحی و ساخت پالایه‌ی نوارگذر باریک فابری– پرو در طول موج ۹۰۵ نانومتر گزارش شده است. لایه‌نشانی در محفظه‌ی خلا با فشار از مرتبه‌ی $۱۰^{-۵}$ میلی بار و توسط تفنگ الکترونی صورت گرفت. ضخامت لایه‌ها به روش ضخامت‌سنجی اپتیکی پایش شد. تراگسیل نمونه‌ها به وسیله‌ی یک طیف‌سنج دوپرتویی اندازه‌گیری شد. در پایان پالایه‌ی نوارگذر با بیشینه‌ی تراگسیل ۹۷ درصد و پهنای نصف بیشینه‌ی ۲۷ نانومتر ساخته شد.

کلید واژه- پالایه‌ی نوارگذر، فابری-پرو، لایه‌نشانی تبخیر فیزیکی، ضخامت‌سنجی اپتیکی

Design and fabrication of all-dielectric narrow band-pass interference filter with wide absorption region at ۹۰۵ nm wavelength using optical thickness monitoring method

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

Thin Films Research Group, Isfahan Optic Industry, Isfahan, Iran

Abstract- In this research Design and fabrication of narrow band pass Fabry-Perot filter in ۹۰۵ nm wavelength has been reported. Deposition was performed in vacuum chamber using electron gun deposition method. Optical monitoring system was used to monitor the thickness of thin films. Transmission spectra of coated samples were measured using a dual-beam spectrophotometer. Finally band pass filter with maximum transmission ۹۷ percent and ۲۷ nm in FWHM, was fabricated.

Keywords: band-pass Filter, Fabry-Perot, physical vapor deposition, optical thickness monitoring

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

پالایه‌ی نوارگذر[۱] پالایه‌ای است که نوار تراگسیل آن در گستره‌ی محدودی از طول موج باشد و این نوار از دو طرف با ناحیه‌های طرد (ناحیه بازتاب بالا) محدود شود. یکی از روش‌های پرکاربرد ساخت پالایه‌های نوارگذر باریک، بکار بردن پالایه‌ی فابری-پروی لایه نازک است. این پالایه‌ها به دو گونه‌ی فلز-دی‌الکتریک و تمام دی-الکتریک دسته‌بندی می‌شوند. این پالایه‌ها کاربردهای فراوانی در سامانه‌های اپتیکی از جمله در گیرنده‌ی انواع فاصله‌یاب‌های لیزری، سرعت‌سنج‌ها و رادارهای لیزری، تصویربرداری‌های لیزری و ... دارند. [۱].

۲- طراحی پالایه

پالایه‌ی فابری-پرو از دو آینه که هرکدام از دو مجموعه‌ی لایه‌ی نازک ساخته می‌شوند و با یک لایه‌ی جداگر دی‌الکتریک از هم جدا شده‌اند، ساخته می‌شود. آینه‌ها می‌توانند فلزی یا تمام دی‌الکتریک باشند. در پالایه‌ی از نوع فلز- دی‌الکتریک به دلیل جذب و هدررفت انرژی در آینه‌ها در مقدار بیشینه‌ی تراگسیل محدودیت وجود دارد و بطور کلی در سامانه‌هایی که میزان بیشینه‌ی تراگسیلی پالایه اهمیت چندانی ندارد، این نوع پالایه بهترین گزینه است. اما در کاربردهایی نظیر فاصله‌یاب لیزری که آشکارسازی و پالایه کردن علامت برگشتی مد نظر است، کاهش قله‌ی تراگسیل باعث کاهش شدید در برد موثر سامانه می‌شود. لذا استفاده از پالایه‌ی تمام دی‌الکتریک چاره‌ساز خواهد بود. در این نوع پالایه‌ها از مجموعه‌ی لایه‌های نازک چارک موجی برای ایجاد ناحیه بازتاب بالا استفاده می‌شود. این مجموعه که شامل لایه‌های با ضریب شکست بالا (n_H) و پایین (n_L) است بصورت یک درمیان به نحوی قرار می‌گیرند که تعداد کل آنها فرد و لایه‌های بیرونی H باشند[۱و۲]. افزایش تعداد لایه‌ها مقدار بازتاب در ناحیه‌ی بازتاب بالا را به سرعت افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه، چارک موجی بودن لایه‌ها در یک طول موج است، بنابراین در طول موج‌های بلندتر یا کوتاه‌تر از طول موج مرجع (در اینجا ۹۰۵ نانومتر) شرط بازتاب بالا و تداخل‌های سازنده معتبر نخواهد بود و لذا پهنای ناحیه‌ی بازتاب بالا در گستره‌ی محدودی از طول موج قرار می‌گیرد. در حالت کلی لایه‌ی جداگر پالایه (حفره) می‌تواند لایه‌ی با ضریب شکست بالا و یا پایین باشد[۱]. محدودیت مشترک برای دو نوع پالایه‌ی معرفی شده شکل مثلثی نوار تراگسیل است که باعث می‌شود بخش قابل توجهی از انرژی خارج از پهنای نوار پالایه قرار بگیرد و لذا بهترین راه حل برای این مشکل، طراحی پالایه‌ای است که شکل نوار تراگسیل آن به مستطیل نزدیک‌تر باشد. با این دیدگاه و برای دست‌یابی به نوار تراگسیل مناسب و بهینه، می‌توان دو یا چند پالایه‌ی فابری-پرو را با هم ترکیب کرد که در این صورت پالایه را چند حفره‌ای یا چند نیم‌موجی می‌نامند. لایه‌ی L که وسط دو پالایه‌ی فابری-پرو قرار می‌گیرد نقش لایه‌ی انطباق دهنده را دارد[۳].

با توجه به مباحث فوق پالایه‌های مختلفی طراحی شد و پس از مقایسه‌ی بیشینه‌ی تراگسیل و پهنای نصف بیشینه‌ی آنها و بررسی امکان ساخت با توجه به تعداد لایه‌ها، در پایان یک طرح فابری–پروی دو حفره ای ۲۱ لایه با لایه های جداگر L و H برگزیده شد که ترتیب لایه های آن به صورت زیر می باشد.

$$\text{Sub.} / (HL)^{۲} H\ ۲L\ H\ (LH)^{۲} L\ (HL)^{۲}\ ۲H\ (LH)^{۲}/\text{Air}$$

که در آن حروف H و L به ترتیب نشان دهنده‌ی یک چارک موج از ماده‌ی با ضریب شکست بالا و ماده‌ی با ضریب شکست پایین در طول موج ۹۰۵ نانومتر است. به منظور افزایش ناحیه‌ی طرد فیلتر در طول موج‌های کوتاه از بستره‌ی RG۸۳۰ استفاده می‌گردد. این بستره یک فیلتر جذبی بلندگذر است که جذب شدیدی در بازه‌ی طول موجی ۲۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر دارد. شکل ۱ نمودار شبیه سازی شده‌ی طراحی فوق را بر روی بستره‌های BK۷ و RG۸۳۰ نشان می‌دهد.

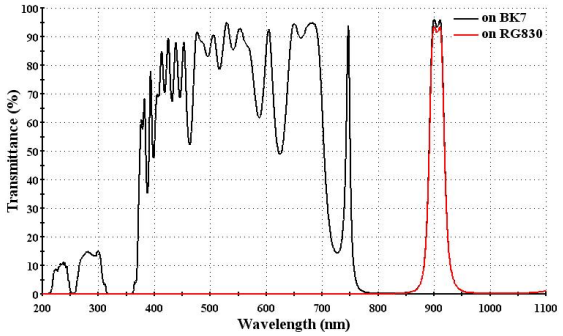
همانطور که می‌دانیم سطح دوم بستره که بدون پوشش است مقداری از نور فرودی را بازتابش می‌کند. این همان بازتابش سطح دوم یا Back Reflection می باشد. بنابراین برای بهبود کارآیی فیلتر می‌توان یک مجموعه لایه‌ی نابازتابنده بر روی سطح دوم لایه‌نشانی نمود تا تراگسیل کلی پالایه افزایش یابد. از آنجا که ضریب شکست هر دو بستره ی BK۷ و RG۸۳۰ برابر ۱/۵۲ است، بنابراین بازتابش سطح دوم طبق ضرایب فرنل برابر ۴/۲ درصد

[۱] Band-Pass Filter

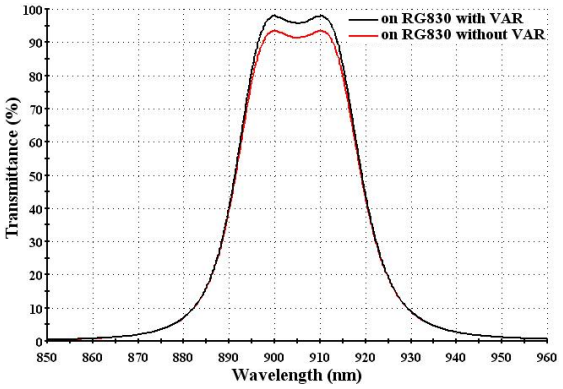
[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

خواهد بود. شکل ۲ نمودار شبیه‌سازی شده‌ی تراگسیل پالایه را با احتساب وجود یک مجموعه لایه‌ی نابازتابنده‌ی ایده‌آل بر روی سطح دوم و بر روی بستره RG۸۳۰ نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه طراحی و اجرای مجموعه لایه‌ی نابازتابنده هدف این پژوهش نمی‌باشد، از آوردن جزئیات آن پرهیز می‌نماییم. طراحی لایه‌های نابازتابنده در بسیاری از کتاب‌های طراحی لایه‌های نازک اپتیکی آمده است[۱].



شکل ۱: طیف تراگسیل شبیه سازی شده‌ی پالایه‌ی طراحی شده بر روی بستره های BK۷ و RG۸۳۰.



شکل ۲: مقایسه‌ی طیف تراگسیل شبیه سازی شده‌ی پالایه‌ی طراحی شده، بر روی بستره‌ی RG۸۳۰ برای دو حالت حضور و عدم حضور مجموعه‌ی نابازتابنده بر سطح دوم بستره به منظور حذف بازتابش سطح دوم پالایه.

۲-۱- گزینش مواد

نخستین شرط برای گزینش مواد، شفافیت در طول موج ۹۰۵ نانومتر است. همچنین این مواد باید چسبندگی مناسبی به بستره و به یکدیگر داشته باشند و در شرایط محیطی مورد استفاده از مقاومت قابل قبولی برخوردار باشند. اختلاف ضریب شکست بین دو ماده پارامتر مهمی در تعیین پهنای ناحیه‌ی طرد و پهنا در نیم بیشینه‌ی پالایه است که باید در گزینش مواد لحاظ گردد. هر چه این اختلاف بیشتر باشد، پهنای ناحیه‌ی طرد بیشتر و پهنای نیم بیشینه کمتر خواهد بود.

با توجه به ملزومات ذکر شده مواد اکسید سیلیسیوم به عنوان ماده‌ی با ضریب شکست پایین و اکسید تیتانیوم به عنوان ماده‌ی با ضریب شکست بالا انتخاب شدند. این دو ماده کاربردهای زیادی در لایه‌نشانی انواع پالایه‌های اپتیکی دارند[۴ و ۵].

۳- ساخت نمونه ها

پیش از لایه‌نشانی مجموعه‌ی چند لایه و به منظور به دست آوردن شرایط بهینه‌ی لایه‌نشانی، نخست تک‌لایه هایی از دو ماده با شرایط مختلف لایه‌نشانی گردیدند. با تحلیل طیف بازتابی این تک‌لایه‌ها و بهینه‌سازی پارامترها، بهترین شرایط لایه‌نشانی که منجر به بیشترین اختلاف ضریب شکست می‌گردید، انتخاب شدند.

لایه‌نشانی به روش تبخیر فیزیکی در محفظه‌ی خلأ و در حضور فشار جزئی اکسیژن، توسط تفنگ الکترونی انجام پذیرفت. پیش از لایه‌نشانی، بستره به کمک امواج فراصوت شسته شد و بلافاصله قبل از لایه‌نشانی به منظور حذف کامل آلودگی‌ها، در محفظه‌ی خلأ در برابر بمباران یونی قرار گرفت. فشار پایه‌ی محفظه در حین لایه‌نشانی ۱×۱۰^{-۵} میلی بار بود. نرخ انباشت لایه‌ها توسط کریستال پیزوالکتریک اندازه‌گیری شد و ضخامت‌سنجی به روش اپتیکی انجام گرفت. جدول ۱ شرایط لایه نشانی را برای هر یک از مواد نشان می‌دهد.

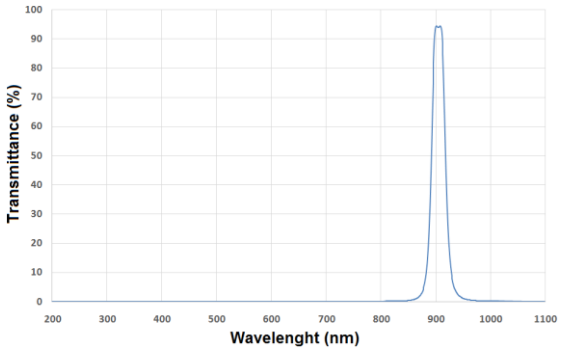
جدول ۱: شرایط لایه‌نشانی هر یک از مواد بکار رفته در ساخت پالایه.

ماده	نرخ رشد (nm/s)	فشارجزئی اکسیژن ($\times۱۰^{-۴}$m bar)	دمای لایه نشانی(°C)
$SiO_۲$	۰/۵	۱/۵	۲۳۰
$TiO_۲$	۰/۳	۱/۱	۲۳۰

پس از لایه‌نشانی طیف تراگسیل توسط طیف‌سنج دو پرتویی اندازه‌گیری شد. شکل ۳ منحنی تراگسیل نمونه‌ی

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

لایه‌نشانی شده را نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار پیداست ماکزیمم تراگسیل فیلتر در طول موج ۹۰۵ نانومتر قرار دارد و مقدار آن برار ۹۴/۵ درصد است. این نمودار پس از چندین بار لایه‌نشانی، بهینه‌سازی و حذف شیفت طول موجی به دست آمده است. همانطور که در بخش ۲ اشاره شد در صورتی که سطح دوم نمونه با لایه‌ی نابازتابنده لایه‌نشانی گردد بیشینه‌ی پیک تراگسیلی به حدود ۹۷ درصد خواهد رسید.



شکل ۳: طیف تراگسیل اندازه‌گیری شده‌ی نمونه نهایی پالایه‌ی نوارگذر ساخته شده پیش از لایه نشانی لایه‌ی نابازتابنده.

با توجه به طیف سنجی‌های انجام گرفته پالایه‌ی ساخته شده مشخصه‌یابی گردید. نتایج به دست آمده در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: جدول مشخصه یابی پالایه‌ی ساخته شده.

پهنای ناحیه‌ی طرد (نانومتر)	حداکثر بازتاب در ناحیه‌ی طرد	پهنای نصف بیشینه (نانومتر)	تراگسیل در قله
۲۰۰-۱۱۰۰	۰/۱ درصد	۲۷	۹۷ درصد

۴- نتیجه‌گیری

می‌توان با لایه‌نشانی یک مجموعه‌ی چند لایه از مواد دی‌الکتریک با ضرایب شکست بالا و پایین و نیز از طریق کنترل شرایط انباشت، پالایه‌های نوارگذر باریک با بیشینه‌ی تراگسیل بالا تولید کرد. بکارگیری ضخامت‌های چارک موج و نیم موج در طراحی پالایه به ما این امکان را می‌دهد تا پالایه‌ی فابری-پرو را با لایه‌نشانی، پیاده‌سازی نماییم.

بکارگیری سامانه‌ی ضخامت‌سنجی اپتیکی در فرآیند لایه‌نشانی، دقت و تکرار پذیری ساخت پالایه را بسیار افزایش می‌دهد و به کاربر این امکان را می‌دهد تا خطاهای اتفاقی را تا حدود زیادی در لایه‌های بعدی جبران نماید.

مراجع

[۱] Macleod H. A., *Thin Film Optical Filter*, p. ۴۳۰, CRC Press, New York ۲۰۱۰.

[۲] Willey R. R., *Practical design and production of optical thin films*, p. ۲۷۷-۹, Marcel Dekker, INC., ۲۰۰۲.

[۳] Thelen A., *Design of optical interference coatings*, p. ۱۵۵, McGRAW-HILL Press, New York, ۱۹۸۹.

[۴] Willey R. R., *Monitoring of thin films of the fence post design and its advantages for narrow band pass filters*, **Appl. Opt.**, ۴۷ (۲۰۰۸) ۱۴۷-۱۵۰.

[۵] Willey R. R., *Design and monitoring of narrow band pass filters composed of non-quarter-wave thicknesses*, **SPIE**, ۷۱ (۲۰۰۸) ۷۱۰۱۱۹-۱ to -۱۲.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]