بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

طراحی و ساخت فیلتر تداخلی تمام دی‌الکتریک نوارگذر باریک به کمک سیستم ضخامت‌سنج اپتیکی

جواد شاه‌محمدی، مهدی مردیها، محمد محمود ورپایی و علیرضا فیروزی‌فر

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

چکیده - در این پژوهش طراحی و ساخت فیلتر تداخلی نوارگذر باریک مبتنی بر روش فابری-پرو با ناحیه‌ی انسدادی وسیع در طول موج ۱۰۷۱ نانومتر گزارش شده است. لایه‌نشانی در محفظه‌ی خلا با فشاری از مرتبه‌ی 10^{-6} میلی بار و توسط تفنگ الکترونی صورت گرفت. ضخامت لایه‌ها به روش ضخامت‌سنجی اپتیکی پایش شد. به منظور ایجاد بخشی از ناحیه‌ی انسدادی بر روی سمت دیگر بستره نیز یک فیلتر تداخلی بلندگذر طراحی و لایه نشانی شد. طیف عبور پوشش‌ها به وسیله‌ی یک طیف‌سنج دوپرتویی اندازه‌گیری شد. در پایان یک فیلتر نوارگذر با قله‌ی عبوری ۹۵ درصد و پهنای نیم بیشینه‌ی ۲۲ نانومتر ساخته شد. فیلتر نهایی بعد از لایه‌نشانی تمامی آزمون‌های محیطی مورد نیاز را طبق استانداردهای مربوطه با موفقیت پشت سر گذاشت.

کلید واژه- فیلتر نوارگذر باریک، ضخامت سنج اپتیکی، لایه‌نشانی تبخیر فیزیکی

Design and fabrication of all-dielectric narrow band-pass interference filter using optical thickness monitoring system

Javad Shahmohammadi, Mehdi Mardiha, Hosein Zabolian, Mohammad Mahmood Varpaei and Alireza Firoozifar

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

Abstract- In this paper design and fabrication of narrow band-pass interference filter based on Fabry-Perot method with wide rejection zone at 1071 nm wavelength has been reported. Deposition was performed in vacuum chamber with pressure order of 10^{-6} mbar and using electron gun. Optical monitoring system was used to monitor the thickness of layers. On the other side of substrate a long-wave pass interference filter was designed and coated in order to making a part of rejection zone. Transmission spectra of coatings were measured using a dual-beam spectrophotometer. Finally a band-pass filter with 95 percent transmission peak and 22 nm in FWHM, was fabricated. Final filter after deposition passed all of required environmental tests according to related standards.

Keywords: narrow band-pass filter, optical thickness monitoring, physical vapor deposition

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

ساخت فیلترهای تداخلی نوارگذر باریک در زمره‌ی حساس-ترین و دشوارترین پوشش‌های اپتیکی می‌باشند. یکی از روش‌های پرکاربرد در طراحی و ساخت انواع فیلترهای نوارگذر، استفاده از روش مبتنی بر سنجه‌ی فابری-پروی لایه نازک است[۱]. این فیلترها کاربردهای فراوانی در انواع سامانه‌های اپتیکی از جمله فاصله‌یاب‌های لیزری کوتاه برد و بلند برد دارند.

فیلترهای نوارگذر عموماً از چهار بخش تشکیل شده‌اند. بخش اول یک آینه است که توسط مجموعه‌ای از لایه‌های با ضریب شکست بالا و پایین ایجاد می‌شود. هر کدام از لایه‌ها دارای ضخامت اپتیکی یک چارک موج در طول موج طراحی، که همان طول موج مرکزی فیلتر نوارگذر است، می‌باشند. بخش دوم یک لایه‌ی جداگر[۱] است که از یک یا چند جفت لایه با ضخامت اپتیکی چارک موج و با همان ضریب شکست تشکیل شده است. بنابراین این لایه دارای ضخامت اپتیکی نیم موج در طول موج نوار عبوری می‌باشد. بخش سوم نیز مشابه بخش اول یک آینه است. حال اگر ترکیب آینه، جداگر و آینه‌ی دوم را به عنوان یک حفره[۲] در نظر بگیریم، می‌توان دو یا چند حفره را به ترتیب در کنار هم قرار داد و یک فیلتر با شیب لبه‌ای بیشتر و ناحیه‌ی انسدادی وسیع‌تر در اطراف نوار عبوری ساخت. این حفره‌ها باید توسط یک لایه‌ی رابط[۳] از هم جدا شوند که این همان بخش چهارم است. این لایه نیز دارای ضخامت اپتیکی چارک موج است که باعث حفظ رابطه‌ی فازی صحیح بین حفره‌ها می‌شود[۲].

۲- طراحی و ساخت فیلتر

این پژوهش در ادامه‌ی کار قبلی [۳] و با چند هدف انجام شده است. کاهش پهنای نیم بیشینه‌ی فیلتر، افزایش ناحیه-ی انسدادی، افزایش تکرارپذیری فرآیند و بهبود ویژگی‌های پایداری محیطی فیلتر از جمله‌ی مهمترین اهداف بودند. هدف طراحی و ساخت یک فیلتر نوارگذر باریک در طول موج ۱۰۷۱ نانومتر، قله‌ی عبوری بیشینه، پهنای نیم بیشینه‌ی کمینه، ناحیه‌ی انسدادی ۳۰۰ تا ۱۳۰۰ نانومتر و بازتاب بالا در ناحیه‌ی انسدادی می‌باشد.

بعد از طراحی و بهینه‌سازی‌های مکرر نهایتاً فیلتر نوارگذر را بصورت دوحفره‌ای طراحی کردیم. برای افزایش ناحیه‌ی انسدادی و کاهش پهنای فیلتر، طراحی را بگونه‌ای انجام دادیم که یکی از حفره‌ها ماده‌ی با ضریب شکست بالا و دیگری ماده‌ی با ضریب شکست پایین باشد. علاوه بر این، تعداد لایه‌ها و همچنین تعداد چارک موج‌های یکی از حفره-ها را افزایش دادیم که منجر به کاهش هر چه بیشتر پهنا و وسیع‌تر شدن ناحیه‌ی انسدادی شد.

۱-۲- انتخاب مواد و بستره

برای طراحی مجموعه در گام اول نیاز به دو ماده‌ی با ضریب شکست بالا و پایین داشتیم. برای گزینش مواد باید به ویژگی‌هایی همچون وجود حداکثر اختلاف ضریب شکست بین دو ماده، شفافیت در طول موج ناحیه‌ی عبوری، چسبندگی مناسب دو ماده به یکدیگر و به بستره و داشتن شرایط پایداری محیطی قابل قبول توجه کرد. علاوه بر شرایط فوق، توجه به حساسیت مواد به شرایط انباشت و قابلیت تکرارپذیری آن نیز از نکاتی است که در مرحله‌ی ساخت بسیار مهم هستند. با احتساب این شرایط و با توجه به تجربیات و مقالات موجود که در این زمینه وجود داشت، از دو ماده‌ی سیلیکا و تیتانیا به ترتیب به عنوان مواد با ضریب شکست بالا و پایین استفاده کردیم.

گام بعدی در مرحله‌ی طراحی انتخاب بستره‌ی مناسب بود. در این مرحله با توجه به ناحیه‌ی انسدادی وسیعی که نیاز داشتم، بعد از بررسی‌هایی که انجام دادیم بستره‌ی جذبی RG850 شرکت Schott را انتخاب کردیم. این بستره گستره-ی طول موجی فرابنفش تا حدود ۸۰۰ نانومتر را جذب می-کند و طول موج‌های بلندتر از ۹۰۰ نانومتر را از خود عبور می‌دهد.

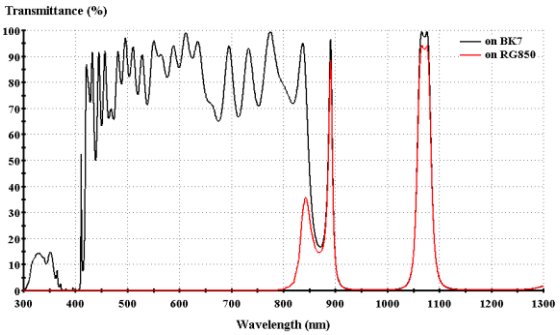
شکل ۱ نمودار حاصل از طراحی فیلتر نوارگذر باریک را بر روی دو بستره‌ی BK7 و RG850 نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است به کمک بستره‌ی جذبی توانسته‌ایم عبور فیلتر تا طول موج ۸۰۰ نانومتر را حذف کنیم. علت افت قله‌ی عبوری فیلتر بر روی بستره‌ی RG850 این است که بستره-های جذبی در ناحیه‌ی عبوری خود نیز دارای کمی جذب هستند.

---

۱ Spacer
۲ Cavity
۳ Coupler

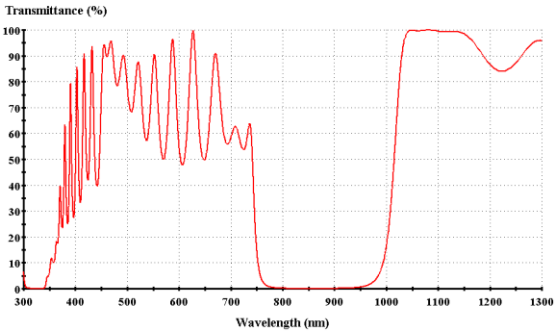
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

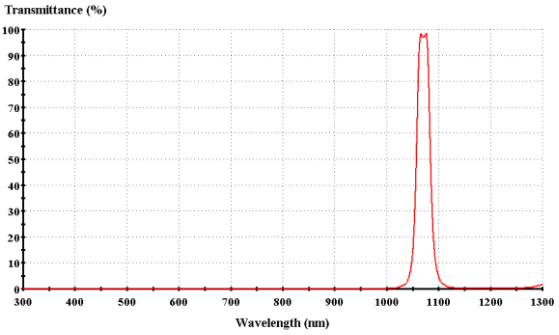


شکل ۱: طیف عبور حاصل از طراحی فیلتر نوارگذر باریک بر روی دو بسترهی BK7 و RG850.

واضح است با طراحی بر روی بسترهی جذبی، هنوز هم در بازهی ۸۰۰ تا ۹۲۰ نانومتر دارای عبور هستیم. برای حذف این ناحیه ما نیاز به طراحی یک فیلتر بلندگذر داریم که در ناحیهی ۸۰۰ تا ۹۲۰ نانومتر دارای عبور کمینه و در ناحیهی نوار عبوری فیلتر نوارگذر دارای عبور بیشینه باشد. از آنجا که طراحی و ساخت فیلتر بلندگذر موضوع این پژوهش نمیباشد، از بیان جزئیات پرهیز میکنیم. این فیلتر باید بر روی سمت دوم بسترهی جذبی لایهنشانی شود. برای نمایش بهتر، طیف حاصل از طراحی فیلتر بلندگذر بر روی BK7 و نتیجهی نهایی حاصل از طراحی دو فیلتر نوارگذر و بلندگذر بر روی بسترهی جذبی به ترتیب در شکلهای ۲ و ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۲: طیف عبور حاصل از طراحی فیلتر بلندگذر بر روی بسترهی BK7.



شکل ۳: طیف نهایی حاصل از طراحی دو فیلتر نوارگذر و بلندگذر بر روی دو سمت بسترهی جذبی RG850.

۲-۲- پیادهسازی و شبیهسازی طرح

پس از نهایی کردن طرح و بهینهسازیهای مکرر، گام بعدی پیادهسازی و شبیهسازی طیفی فیلتر نوارگذر بر روی نرم افزار سیستم پایشگر اپتیکی است. این مرحله یکی از حساسترین مراحل است. چرا که تعیین صحیح الگوریتم قطع لایهها، تخصیص پارامترهای بهینه برای پایش لایهها، افزایش حداکثری نسبت سیگنال به نویز و کمینه کردن خطاها برای دستیابی به بهترین نتیجه بسیار حیاتی میباشد. با استفاده از این نرم افزار و تنظیم پارامترهای ورودی این امکان وجود دارد که فرآیند اصلی را قبل از اجرای واقعی بارها شبیهسازی کرده و خطای موجود در هر لایه و تاثیر مجموع این خطاها را بر روی کل فرآیند، مشاهده کنیم. به بیان دیگر ما میتوانیم تاثیر این پارامترها را بر روی طیف شبیهسازی شده مشاهده کنیم و بهینهسازی را تا جایی ادامه میدهیم که بیشترین تطابق بین طیف طراحی و شبیهسازی برقرار شود.

بکارگیری سیستم پایشگر اپتیکی در فرآیند لایهنشانی، دقت و تکرار پذیری ساخت فیلتر را بسیار افزایش میدهد و به کاربر این امکان را میدهد تا خطاهای اتفاقی را تا حدود زیادی در لایههای بعدی جبران نماید. لازم به ذکر است که بسیاری از بهینهسازیها پس از اجرای واقعی فرآیند نیاز میشود.

۲-۳- نتایج تجربی

بعد از اتمام مراحل طراحی و شبیهسازی، گام اول برای لایه-نشانی هر مجموعه لایه نازک اپتیکی، لایه نشانی تک لایه-هایی از همان مواد میباشد. این مرحله از کار به منظور استخراج و بهینهسازی شرایط انباشت مواد همچون دما، فشار جزئی اکسیژن و نرخ لایهنشانی و همچنین بررسی پارامترهایی نظیر چسبندگی، تنش و جذب اپتیکی ضروری میباشد.

بعد از این مرحله لایه نشانی طرح اصلی را آغاز کردیم. لایه-نشانی 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 محفظهی لایهنشانی ۵×۱۰^{-۶} میلی بار بود. نرخ

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

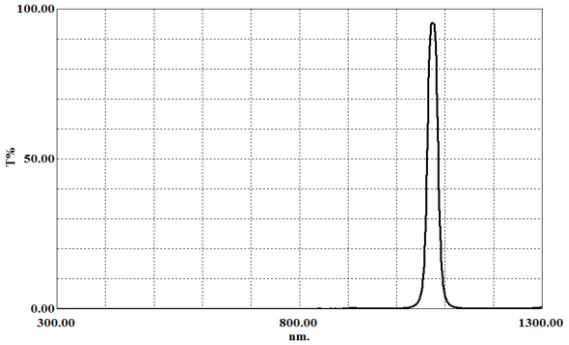
انباشت لایه‌ها توسط کریستال پیزوالکتریک اندازه‌گیری شد و ضخامت‌سنجی به روش اپتیکی انجام گرفت. جدول ۱ شرایط لایه نشانی را برای هر یک از مواد نشان می‌دهد.

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

ماده	نرخ رشد (nm/s)	فشارجزئی اکسیژن ($\times^{-4}$۱۰mbar)	دمای لایه نشانی ($^{\circ}$C)
SiO_2	۰/۶	۱/۷	۲۶۰
TiO_2	۰/۴	۱/۳	۲۶۰

در نهایت موفق شدیم فیلتر تداخلی نوارگذر باریک با ناحیه‌ی انسدادی وسیع در طول موج مرکزی ۱۰۷۱ نانومتر را لایه نشانی کنیم. چالشی که در راه ساخت اینگونه فیلترها معمولاً قرار دارد یکی کاهش پهنای فیلتر و دیگری تکرارپذیر کردن فرآیند لایه‌نشانی می‌باشد که از لحاظ اقتصادی بسیار حائز اهمیت است. ما با تغییراتی که در شیوه‌ی طراحی و پایش فیلتر دادیم توانستیم علاوه بر کاهش پهنای نیم بیشینه‌ی فیلتر، به تکرارپذیری بسیار بالایی نیز برسیم. علاوه بر این با اصلاح پارامترهای انباشت موفق به بهبود ویژگی محیطی نیز شدیم.

پس از لایه‌نشانی طیف عبور فیلتر توسط طیف‌سنج دو-پرتویی اندازه‌گیری شد. شکل ۴ منحنی عبور نمونه‌ی لایه-نشانی شده را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این طیف پس از چندین بار لایه‌نشانی بدست آمده است. چرا که دستیابی به پارامترهای بهینه‌ی انباشت مجموعه، شناسایی و کنترل خطاهای کاتوره‌ای و سازمند در حین انباشت و اصلاح پارامترهای ورودی نرم‌افزار ضخامت‌سنج اپتیکی به منظور تعیین دقیق نقاط اکسترمم سیگنال اپتیکی که همان نقاط قطع لایه هستند[۴]، مستلزم تکرار فرآیند می‌باشد.



شکل ۴: طیف عبور اندازه‌گیری شده حاصل از لایه‌نشانی نمونه نهایی فیلتر نوارگذر باریک.

مشخصه‌یابی فیلتر نهایی با پوشش لایه‌نشانی شده بر روی دو سمت بسترهی جذبی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: جدول مشخصه‌یابی فیلتر لایه‌نشانی شده.

پهنای ناحیه‌ی انسدادی (nm)	عبور در ناحیه انسدادی (درصد)	پهنای نیم بیشینه (nm)	بیشینه‌ی عبور در قله
۱۳۰۰-۳۰۰	کمتر از ۰/۱	۲۰	۹۵ درصد

۴-۲- آزمون‌های پایداری محیطی

فیلتر نهایی لایه نشانی شده علاوه بر طیف اپتیکی مناسب از پایداری محیطی نیز باید برخوردار باشد. شرایط عملکردی فیلتر، تعیین کننده آزمون‌های محیطی مورد نیاز می‌باشد. با توجه به این امر فیلتر لایه نشانی شده تحت آزمون‌های چسبندگی، سایش ملایم، دما و رطوبت تمامی این آزمون‌ها در آزمایشگاه‌های موجود در صنایع اپتیک اصفهان و مطابق با استاندارد MIL-F-48616 و زیر نظر کارشناس آزمایشگاه انجام شده است.

فیلتر بعد از هر آزمون از لحاظ ظاهری کنترل می‌شود که نشانه‌ای از کنده شدن پوشش، ترک، تیرگی و یا خراش در آن نباشد. لازم به ذکر است که برای اطمینان از نتیجه‌ی کار، فیلتر لایه نشانی شده بعد از هر آزمون مورد طیف سنجی مجدد قرار گرفت که تغییری مشاهده نشد.

۳- نتیجه‌گیری

می‌توان با لایه‌نشانی یک مجموعه‌ی چارک موجی از مواد با ضرایب شکست بالا و پایین، پایش لایه‌ها به کمک سیستم ضخامت‌سنج اپتیکی، کنترل و کمینه کردن خطاها و بهینه-سازی شرایط انباشت، پالایه‌ی نوارگذر باریک با پایداری محیطی خوب و تکرارپذیری بالا، ساخت.

مراجع

[1] H. A. Macleod, *Thin Film Optical Filters*, CRC Press, New York, p. 299, 2010.

[2] R. R. Willey, "Achieving narrow band-pass filters which meet the requirements for DWDM", Thin Solid Films, Vol. 398, pp. 1-9, 2001.

[۳] جواد شاه‌محمدی و همکاران، "طراحی و ساخت پالایه تداخلی تمام دی‌الکتریک نوارگذر باریک با ناحیه جذب وسیع در طول موج ۹۰۵ نانومتر به روش ضخامت‌سنجی اپتیکی"، ۲۱-امین کنفرانس اپتیک و فوتونیک، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۳.

[4] A. Zoeller, M. Boos, H. Hagedorn, B. Romanov, "Computer simulation of coating processes with monochromatic monitoring", SPIE Vol. 7101-16, 2008.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]