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 پوشش نابازتابنده‌ی فروسرخ دارای پایداری بالا به همراه لایه‌ی محافظ کربن شبه الماسی

محمد جان‌نثاری، سید علیرضا فیروزی فر، حسین زابلیان، حمیده قانعی، سید غلامرضا رحیمی

دانشکده فیزیک دانشگاه اصفهان

چکیده - در این پژوهش طراحی و ساخت پوشش نابازتابنده‌ی ۱۲-۸ میکرون، دارای پایداری محیطی بالا بر بستره سولفید روی و برای زاویه‌ی عمود گزارش شده است. این مجموعه‌ی لایه نازک ۵ لایه‌ای، به کمک روش‌های باریکه الکترونی، بوته‌ی حرارتی و *PECVD* و نیز استفاده از ضخامت سنج کریستالی و اپتیکی در محفظه‌ی با خلأ پایه‌ی از مرتبه‌ی 10^{-6} میلی بار لایه‌نشانی شده است. در این مجموعه‌ی لایه نازک، از کربن شبه الماسی به عنوان پوشش محافظ بیرونی استفاده می‌گردد تا سختی مکانیکی و پایداری محیطی آن، ارتقا داده شود. طراحی این مجموعه به گونه‌ای انجام گرفت تا مطابق استانداردهای مربوطه از پایداری محیطی کافی برخوردار، و در مقابل سایش مقاوم باشد. متوسط بازتاب اپتیکی پوشش، در ناحیه‌ی طول موجی ۱۲-۸ میکرون به کمتر از ۱٫۵٪ رسیده است.

کلید واژه- پوشش نابازتابنده دارای پایداری بالا، لایه نشانی تبخیر فیزیکی، PECVD، کربن شبه الماسی, DLC

Design and fabrication of high durability infrared antireflection with diamond like carbon protective layer

Mohammad jannesari, seyed alireza firozifar, hossein zabolian, Hamideh ghanei, seyed gholamreza rahimi

Faculity of physics Isfahan University

Abstract- In this paper design and fabrication of an 8-12 micron antireflection coating on zinc sulfide substrate with good environmental durability is reported. This five layer is coated by e-gun, heating boat and PECVD methods using a quartz crystal to measuring the thickness. The chamber pressure order during the process was 10^{-6}mbar. In this coat, diamond like carbon is used as top protection layer in order to increase the mechanical hardness and environmental stability. This five layer passed the environmental tests and the abrasion test in agreement with related standards. The optical reflection of this coat in 8-12 micron wavelenght range, was less than 1.5%.

Keywords: high durability antireflection coating, physical vapor deposition, PECVD, diamond like carbon, DLC

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

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

مقدمه

پوشش‌های نابازتابنده‌ی لایه‌ی نازک پهن باند، از عناصر پایه در قطعات سامانه‌های اپتیکی به شمار می‌آیند. افزایش درصد عبور اپتیکی و حذف انعکاس‌های سطوح، باعث شده که ایجاد این پوشش‌ها بر سطح عدسی‌ها و پنجره‌های سامانه‌های اپتیکی ضروری باشد. مبنای عملکرد پوشش‌های نابازتابنده به پدیده‌ی تداخل امواج در لایه‌های نازک باز می‌گردد. با الهام از این پدیده و با طراحی و لایه‌نشانی مجموعه‌ی لایه‌های نازک با ضرایب شکست و ضخامت مناسب، می‌توان پوشش نابازتابنده را تولید نمود. پوشش‌های نابازتابنده برای بازه‌ی مشخص طول موجی و زاویه‌ی فرود معین طراحی و ساخته می‌شوند[۱].

با وجود پیشرفت‌های زیاد در ساخت سامانه‌های اپتیکی فروسرخ که در شرایط نامساعد محیطی کار می‌کنند، نیاز به پوشش‌های نابازتابنده که همزمان با عملکرد اپتیکی بالا، پایدار بوده و از استحکام مکانیکی مناسبی نیز برخوردار باشند، افزایش یافته است. در این پژوهش، طراحی و ساخت نابازتابنده‌ی پایدار بر بستره‌ی ZnS توصیف می‌شود. نشان داده خواهد شد که این مجموعه، علاوه بر عبور اپتیکی بالا، کلیه آزمون‌های پایداری محیطی را مطابق با استانداردهای مربوطه با موفقیت پشت سر می‌گذارد.

طراحی و انتخاب مواد

در یک تقسیم بندی کلی، پوشش‌های نابازتابنده به دو دسته پوشش‌های چند لایه و تک لایه تقسیم می‌شوند. مجموعه‌ی نابازتابنده چند لایه، از مواد با ضرایب شکست بالا و پائین که یک در میان در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. تداخل باریکه‌های منعکس شده از مرزها، انعکاس کمینه در بازه مورد نظر را فراهم می‌آورد. تعداد لایه‌ها، به ضریب انعکاس مورد نظر، اختلاف ضرایب شکست لایه‌ها و پهنای ناحیه نابازتابنده بستگی دارد.

متداولترین و ساده‌ترین طرح، نابازتابنده تک لایه می‌باشد. ضریب شکست ایده‌ال و ضخامت اپتیکی این پوشش، به ترتیب، مجذور ضریب شکست بستره و چارک موجِ طول موج طراحی است. این طرح، کمینه انعکاس را در طول موج طراحی فراهم می‌آورد ولی بازه‌ی اطراف آن را نیز پوشش می‌دهد. پهنای مفید ناحیه‌ی نابازتابندگی، تابع اختلاف ضریب شکست لایه و بستره است. محاسبات نظری مربوط به طراحی چنین مجموعه‌هایی، در اغلب کتاب‌های اپتیک لایه‌ی نازک موجود می‌باشد[۲].

طراحی مجموعه‌ی نابازتابنده که عبور اپتیکی و پایداری محیطی بالا را همزمان فراهم آورد، از طراحی‌های مشکل به شمار می‌آید. برای ایجاد پایداری بالا، لازم است که بر سطح رویی، پوشش لایه‌ی نازک سخت و پایدار لایه‌نشانی گردد. ضخامت بهینه پوشش سخت، ایجاد چسبندگی میان این لایه و بقیه‌ی لایه‌ها و بهینه‌سازی عبور، از جمله چالش‌های طراحی و ساخت این مجموعه می‌باشد. به منظور ایجاد چسبندگی، از لایه‌ی واسط چسبنده با ضخامت بهینه استفاده می‌گردد. چینش و ضخامت لایه‌ها باید به گونه‌ای باشد که وجود لایه‌ی محافظ و لایه‌ی واسط، عبور نابازتابنده را کاهش ندهد و از طرفی هم به اندازه‌ای باشد که سختی و پایداری افزایش یابد.

از آنجا که روش‌های لایه‌نشانی لایه سخت و نابازتابنده متفاوت است، لایه‌نشانی در دو مرحله انجام می‌شود.

ویژگی‌های اپتیکی و تحلیل تنش مجموعه‌ی لایه‌ی نازک نابازتابنده که ترکیب مواد دی الکتریک و سخت است را می‌توان با نرم افزارهای شبیه‌سازی لایه‌های نازک بررسی نمود. این نرم‌افزارها براساس استفاده از ماتریس‌های انتقال که هر ماتریس ۲×۲ به یک لایه نسبت داده می‌شود بنا شده است.

طراحی مجموعه لایه نازک این پژوهش از طرح تک لایه آغاز می‌شود. ماده انتخابی باید در بازه طول‌موجی ۱۲-۸ میکرون شفاف بوده، چسبندگی مناسبی داشته باشد و ضریب شکست آن به مقدار ایده‌ال نزدیک باشد. با توجه به این ملزومات، YbF_3 با بازه‌ی شفافیت ۱۲-۰٫۲ میکرون و ضریب شکست حدود ۱٫۴۱ (در طول‌موج $\mu 10m$) انتخاب شد. بازه‌ی شفافیت وسیع، خوش رفتار بودن در فرایند تبخیر و سطح تنش متوسط باعث شده است که این ماده گزینه مناسب برای این لایه‌نشانی باشد[۳].

از آنجا که میان استحکام مکانیکی و بازه‌ی شفافیت مواد، ارتباط معکوسی وجود دارد، اغلب مواد لایه‌نشانی که تا ۱۲-۸ میکرون شفاف هستند دارای سختی و پایداری محیطی اندکی بوده و خش پذیر هستند. در این میان، استثناء الماس هم وجود دارد که با داشتن بازه شفافیت گسترده، بالاترین استحکام مکانیکی را دارد. با توجه به اینکه لایه‌نشانی الماس مصنوعی به دما و فشار ویژه‌ای نیازمند است و اغلب قطعات اپتیکی در چنین شرایطی تخریب می‌شوند، پوشش‌های کربن شبیه الماس پیشنهاد می‌شود. سختی و مقاومت سایشی بالا، مورفولوژی سطح یکنواخت، ضریب اصطکاک

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

پایین، مقاومت شیمیایی بالا، شفافیت اپتیکی در ناحیه‌ی فروسرخ و ... از جمله ویژگی‌های کربن شبه الماسی یا DLC است. لایه‌نشانی این پوشش به عنوان لایه‌ی محافظ پوشش-های نابازتابنده‌ی چند لایه، علاوه بر افزایش پایداری محیطی، به افزایش مقاومت به سایش پوشش نیز کمک می-کند.

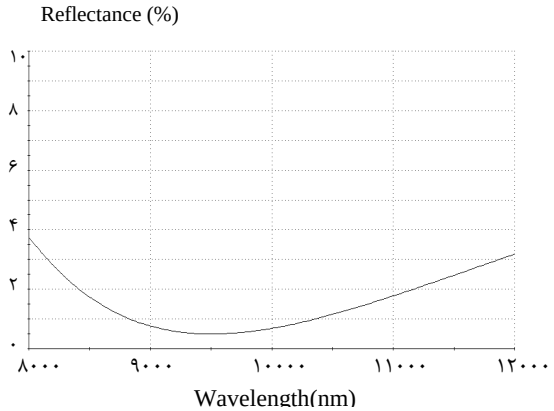
به منظور ایجاد چسبندگی مناسب میان DLC و YbF_3، از لایه‌ی نازک ژرمانیوم استفاده می‌گردد. Ge با ضریب شکست ۴/۰ (در طول موج ۳ میکرومتر) و بازه‌ی شفافیت ۱۴~ ۲ میکرومتر دارای ویژگی‌های مکانیکی و پایداری محیطی مطلوبی است[۴].

به منظور افزایش چسبندگی لایه‌ها و نیز کمینه نمودن تنش باقیمانده مجموعه، از پوشش بسیار نازک Y_2O_3 به عنوان لایه واسط بهره گرفته می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار طراحی لایه‌های نازک مکلئود و ابزارهای مختلف آن، طراحی نابازتابنده دارای پایداری بالا در بازه‌ی طول‌موجی ۱۲-۸ میکرون به صورت زیر انجام شد. طول موج مرجع طراحی، ۱۰ میکرون و زاویه تابش، عمود می‌باشد. ضخامت و چینش دو لایه رویی بر اساس الزامات پایداری محیطی، تعیین و ثابت نگاه داشته شده است.

جدول ۱: طرح نابازتابنده ۱۲ - ۸ میکرون.

ضخامت (نانومتر)	ماده	لایه
---	هوا	محیط
۲۵۰	DLC	۵
۵۰	Ge	۴
۱۰	Y_2O_3	۳
۹۵۶	YbF_3	۲
۱۰	Y_2O_3	۱
---	ZnS	زیرلایه

در صورتی که چنین طرحی بر بستره سولفید روی لایه نشانی گردد، طیف انعکاسی آن مطابق با محاسبات نرم افزار طراحی به صورت زیر می‌باشد. نمودار افقی، برحسب طول موج و نمودار عمودی، درصد انعکاس را نشان می‌دهد. مشخص است که چنین طرحی در بازه‌ی ۱۲-۸ میکرون، کمینه‌ی انعکاس را فراهم می‌آورد.



شکل۱: منحنی بازتاب طرح نابازتابنده دارای پایداری بالا در ۱۲-۸ میکرومتر. طراحی و شبیه‌سازی توسط نرم افزار طراحی لایه‌های نازک انجام شد. طراحی برای زاویه عمود بر سطح می‌باشد. نابازتابندگی این پوشش، تا زاویه ۲۰ درجه را نیز شامل می‌شود.

نتایج تجربی:

لایه نشانی در دو مرحله انجام پذیرفت. در مرحله اول، لایه-های ۱ تا ۴، به روش تبخیر فیزیکی در محفظه خلأ لایه-نشانی شدند. لایه‌نشانی Y_2O_3 در حضور فشار جزئی اکسیژن، توسط تفنگ الکترونی انجام می‌شود. قبل از لایه-نشانی، بستره‌ها به کمک امواج فراصوت شستشو شدند و بلافاصله قبل از لایه‌نشانی، به منظور حذف کامل آلودگی‌ها، در محفظه‌ی خلأ در معرض بمباران یونی قرار گرفتند. خلأ پایه محفظه، ۵×۱۰^{-۶} میلی بار در نظر گرفته شد. ضخامت لایه‌ها و نرخ انباشت به روش کریستالی اندازه‌گیری شدند. لایه‌نشانی با انجام فرایندهای تحقیقاتی شامل استخراج مؤلفه‌های انباشت هر لایه (جهت محاسبه استخراج ضریب شکل دهی)، کمینه سازی تنش باقیمانده، محاسبه مؤلفه-های بهینه انباشت، بهینه‌سازی پایداری محیطی و ... انجام پذیرفت. خلاصه‌ای از مؤلفه‌های به دست آمده، در جدول ۲ آورده شده است. فرآیند لایه‌نشانی با ضخامت‌های جدول ۱ انجام و مؤلفه‌های جدول ۲ برای هر ماده، دقیقاً لحاظ گردیدند.

جدول۲: پارامترهای انباشت لایه‌ها.

ماده	نرخ انباشت (nm/s)	فشار جزئی اکسیژن (mbar)	دما (C°)
Y_2O_3	۰/۷۵	۲×۱۰^{-۴}	۲۵۰
Ge	۰/۹	---	۲۵۰
YbF_3	۱/۲	---	۲۵۰

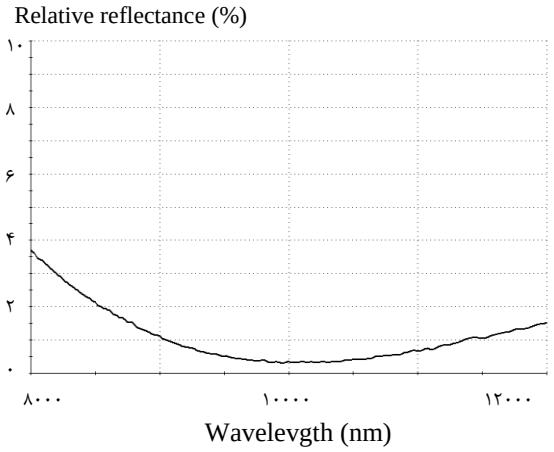
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

در مرحله دوم، لایه نشانی DLC به روش PECVD انجام پذیرفت. در این روش، از گاز پیش ماده‌ی متان به عنوان چشمه‌ی کربن استفاده گردید. ضخامت سنجی به روش اپتیکی و در تک طول موج ۰٫۸ میکرون انجام پذیرفت. خلاصه‌ای از پارامترهای لایه‌نشانی، در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۳: پارامترهای لایه‌نشانی DLC

توان فرکانس (w)	نسبت دبی متان به آرگون (sccm)	فشار محفظه (Torr)	دما (C°)
۱۰۰	۷٫۳	۰٫۱	۲۵



شکل۲: طیف بالا مربوط به نابازتابنده ۱۲ - ۸ میکرومتر ساخته شده نهایی می‌باشد. محور افقی برحسب طول موج و محور عمودی، درصد انعکاس نسبی را نمایش می‌دهد. این طیف انعکاس نسبی، با استفاده از دستگاه FTIR و نسبت به طلا در زاویه ۱۲ درجه گرفته شده است.

شکل ۲ منحنی انعکاس نسبی مجموعه ساخته شده (نسبت به آینه طلا در زاویه ۱۲ درجه) را نشان می‌دهد. این نتیجه پس از چندین مرحله بهینه سازی و حذف خطاهای حین انباشت به دست آمد. از این شکل واضح است که ناحیه‌ی نابازتابندگی، محدوده ۱۲-۸ میکرون را پوشش می‌دهد و انعکاس آن کمتر از ۱٫۵٪ می‌باشد. از آنجا که طیف اندازه-گیری، به طیف طراحی بسیار نزدیک است، می‌توان گفت که ترکیب و ساختار مواد لایه‌نشانی به ترکیب و ساختار طراحی بسیار نزدیک می‌باشد و تغییر قابل ملاحظه‌ای رخ نداده است. همچنین انجام لایه‌نشانی در خلأ، مانع از واکنش‌های انحرافی می‌شود.

این پوشش علاوه بر دارا بودن طیف مناسب بازتابی، از پایداری محیطی نیز برخوردار می باشد. بر این اساس، آزمون‌های محیطی مورد نیاز، مطابق با کیفیت اشاره شده در جدول ۴ انجام پذیرفت و پس از انجام این آزمون‌ها، قطعه شاهد مورد بررسی بصری قرار گرفت و مشخص گردید که هیچ گونه تغییری (مانند تَرَک، پوست انداختن، تاول، تغییر رنگ، خش و ...) در کیفیت ظاهری نمونه‌ها ایجاد نشده است.

جدول۴: کیفیت آزمون‌های محیطی

آزمون	کیفیت آزمون
رطوبت	قطعه دارای پوشش، در چمبره با رطوبت ۹۹٪ و دمای ۷۰C° قرار داده می‌شود.
چسبندگی	چسب نواری به سطح قطعه دارای پوشش چسبانده شده و در جهت عمود و سریع کنده می‌شود.
دما	قطعه دارای پوشش، ۲ ساعت در دماهای ۶۲±۱- و ۷۱±۱ نگاه داشته می‌شود.
سایش	قطعه دارای پوشش، بوسیله پاک کن استاندارد، ۲۰ بار تحت سایش قرار می‌گیرد.
حلالیت	قطعه لایه‌نشانی شده، ۲۴ ساعت در محلول آب مقطر و نمک با غلظت ۴۴٫۷ gr/lit (در دمای اتاق) فرو برده می‌شود.
مه نمکی	قطعه پوشش دار، ۲۴ ساعت، در مه نمکی منطبق با ASTM B117-73 قرار می‌گیرد.

این آزمون‌ها در آزمایشگاه محیطی شرکت الکترواپتیک اصفهان مطابق با استانداردهای مربوطه انجام شده است.

نتیجه‌گیری

می‌توان با لایه نشانی پوشش لایه‌ی نازک DLC بر سطح یک نابازتابنده تک لایه و استفاده از لایه واسط، پوشش نابازتابنده و پایدار ساخت که علاوه بر ایجاد خاصیت نابازتابندگی، پایداری محیطی بالایی نیز داشته باشد و کلیه-ی آزمون‌های محیطی را پاس نماید.

مراجع

[1] H. A. Macleod, *Thin Film Optical Filters*, Fourth Edition, p. 105, Thin Film Center Inc, Tucson, Arizona, USA, 2010.

[2] J. A. Polo, A. Lakhtakia "Tilt-modulated chiral sculptured thin films: an alternative to quarter-wave stacks", Optics Communications, Vol. 242, pp. 13-21, 2004.

[3] G. Wang, X. Ling, X. Liu, Z. Fan "Effects of deposition temperature on characterization and laser-induced damage threshold of YbF_3 fims", Optics & Laser Technology, Vol. 49, pp. 274-274, 2013.

[4] L. Hang, Y. Yin, J. Xu, "Optimisation of diamond-like carbon films by unbalanced magnetron sputtering for infrared transmission enhancement", Thin Solid Films, Vol. 515, pp. 357-361, 2006

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]