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 مجموعه نابازتابنده دوگانه با پوشش محافظ کربن شبه الماسی بر بستره‌ی ZnSe

محمد جان‌نثاری[۱]، امیر بهران‌وند[۲]، مهدی داودی دراره[۲]

[۱]شرکت صنایع الکترواپتیک صاایران

[۲]دانشگاه صنعتی مالک اشتر – مجتمع علوم کاربردی، دانشکده فیزیک

چکیده- در این پژوهش، طراحی و ساخت مجموعه‌ی ۱۳ لایه‌ی نابازتابنده‌ی دوگانه با پوشش محافظ کربن شبه الماسی برای دو بازه‌ی ۵-۳ و ۱۲-۸ میکرومتر در زاویه‌ی عمود گزارش‌شده است. این مجموعه بر بستره‌ی *ZnSe* طراحی و به کمک روش‌های پرتوی الکترونی و *PECVD* با استفاده از ضخامت‌سنج کریستالی و اپتیکی در محفظه‌های با خلاء پایه‌ی از مرتبه‌ی 10^{-6} میلی‌بار و در دو مرحله لایه‌نشانی شده است. ویژگی ممتاز این مجموعه، پایداری محیطی و استحکام مکانیکی بالا (به علت پوشش محافظ کربن شبه الماسی) به همراه متوسط بازتاب ۲/۵ درصد در بازه‌های ۵-۳ و ۱۲-۸ میکرومتر می‌باشد. این مجموعه آزمون‌های چسبندگی، سایش، رطوبت، مه نمکی و حلالیت را به‌خوبی گذرانده است.

کلید واژه- نابازتابنده، دوگانه، کربن شبه الماسی ، لایه نشانی تبخیر فیزیکی، PECVD.

Design and fabrication of a dual band antireflection stack by DLC protective coating on ZnSe substrate

Mohammad Jannesari[1], Amir Behranvand[2], Mahdi Davoudi Darareh[2]

Sa-Iran Electro-Optic Industries Company[1]

Department of Physics, Factuality of Science, Malek-Ashtar university of Technology[2]

Abstract- In this research, we have reported the design and fabrication of a dual band antireflection 13 layers stack by DLC protective coating for 3-5 and 8-12 μm and for incident angle. This stack has deposited on ZnSe substrate in two stages at a pressure about 10^{-6} mbar by using Electron gun and PECVD methods. Optical and crystal monitoring have been used to control the thickness of the layers. High advantages of this stack are high environment durability, mechanical hardness (for DLC protective coating) and 2.5% mean reflection in the ranges of 3-5 and 8-12 μm. Adhesion, abrasion, humidity, salt fog and solubility of this stack were studied. The final stack has successfully passed the mentioned tests.

Keywords: antireflection, dual band, Diamond Like Carbon, PVD, PECVD.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

۱- مقدمه

جو زمین در دو بازه‌ی طول‌موجی ۵-۳ و ۱۲-۸ میکرومتر، دارای بیشترین میزان عبور و کمترین مقدار جذب نسبت به بقیه نواحی مادون‌قرمز است. بنابراین سامانه‌های اپتیکی با قابلیت عبوردهی دو طیف، توانایی آشکار سازی و بازده اپتیکی بالاتری را نسبت به سامانه‌های اپتیکی تک طیفی دارند. قطعات اپتیکی دو طیفی در ساخت سامانه‌های عکس برداری در دو ناحیه‌ی طیفی، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. از جمله موادی که دارای عبوردهی خوبی در ناحیه‌ی ۱۲-۳ میکرومتر می‌باشند، می‌توان به ZnSe، KBr، Ge، GaAs اشاره نمود. در این میان، بستره‌ی خام ZnSe به علت عبوردهی ۷۲٪ در بازه‌ی ۱۲-۳ میکرومتر (بازتاب ۱۷٪ نور فرودی از یک سطح) و ضریب شکست ۲/۴ (در ۱۰ میکرومتر)، به عنوان زیرلایه انتخاب شد [۲]. یکی از مشکلات اساسی بستره‌ی ZnSe، نداشتن استحکام مکانیکی در برابر سایش می‌باشد. همچنین بازتاب پرتوی نور فرودی از سطح آن، منجر به کاهش بازده قطعه و در نتیجه سامانه اپتیکی می‌شود [۳]. راهکار مناسب، استفاده از مجموعه‌ی لایه نازک است که علاوه بر افزایش استحکام مکانیکی سطح، در دو بازه‌ی طول‌موجی ۵-۳ و ۱۲-۸ میکرومتر شفاف بوده و یک ساختار نابازتابنده را ایجاد نماید.

استحکام مکانیکی و شفافیت اپتیکی مواد، در ناحیه‌ی مادون قرمز با یکدیگر در تعارض هستند. برای داشتن استحکام مکانیکی، نیاز به اتم‌هایی با وزن اتمی کم و پیوندهای اتمی و مولکولی قوی وجود دارد در صورتی که برای ایجاد شفافیت اپتیکی در این ناحیه، نیازمند جرم اتمی بسیار کم و پیوندهای اتمی و مولکولی ضعیف هستیم. بنابراین دستیابی به لایه‌ی نوری با استحکام مکانیکی و شفافیت نوری بالا در ناحیه‌ی مادون‌قرمز، یک چالش فنی محسوب می‌شود [۴].

لایه‌ی DLC به‌عنوان لایه‌ی محافظ برای قطعاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در محیط‌هایی با میزان سایش بالا قرار دارند. DLC با ضریب شکست ۱/۹۳ (در طول‌موج ۱۰ میکرومتر) دارای ویژگی‌هایی از جمله استحکام مکانیکی و مدول یانگ بالا، ضریب اصطکاک پایین، عبوردهی بالا در ناحیه‌ی مادون‌قرمز، آب‌گریزی و مقاومت زیاد در مقابل مواد اسیدی و بازی با غلظت بالا است. با استفاده از این لایه (با توجه به شفافیت نوری در ناحیه‌ی مادون‌قرمز) به عنوان یکی از لایه‌های مجموعه‌ی فیلم نازک، می‌توان یک ساختار محافظ و ضد بازتاب ایجاد نمود [۶].

۲- طراحی

با طراحی یک مجموعه‌ی چندلایه‌ای از دو ماده با ضریب شکست بالا و پایین که به صورت یک در میان با ضخامت-های متفاوت بر بستره قرار می‌گیرند می‌توان انعکاس کمینه را در دو گستره‌ی موردنظر فراهم نمود و یک ساختار نابازتابنده ایجاد کرد [۴]. تعداد لایه‌های مجموعه‌ی نابازتابنده، به میزان عبور مورد نظر و اختلاف ضرایب شکست دو ماده بستگی دارد. هر چه اختلاف ضریب شکست دو ماده بیشتر باشد، پهنای ناحیه‌ی ضدبازتاب نیز بیشتر می‌شود. در صورتی که چینش و ضخامت لایه‌ها مناسب نباشد، نوسانات مضری در طرح ایجاد می‌شود. برای جلوگیری از ایجاد تنش‌های باقیمانده در لایه‌ها، لازم است که لایه‌ها (به غیر از DLC)، در یک فرآیند بر روی یکدیگر لایه‌نشانی شوند. ویژگی‌های مجموعه‌ی نابازتابنده را می‌توان با نرم‌افزارهای شبیه‌سازی لایه‌ی نازک بررسی نمود. این نرم-افزارها به روش ماتریسی بنا شده‌اند، با استفاده از این نرم-افزارها می‌توان ویژگی‌های عبور، انعکاس و غیره را از ماتریس حاصل ضرب همه‌ی ماتریس‌ها محاسبه و با تغییر ضخامت هر لایه ویژگی مورد نظر را بهینه نمود.

اولین مرحله در طراحی و ساخت یک مجموعه‌ی نابازتابنده، انتخاب دو ماده با ضرایب شکست بالا و پایین می‌باشد که باید در دو ناحیه‌ی مورد نظر شفاف بوده و از نظر سطح تنش و ضریب انبساط حرارتی در وضعیت مناسب باشند. از سوی دیگر، مواردی مانند نرخ انباشت، دمای لایه نشانی، فشار اولیه‌ی خلاء، فشار اکسیژن و تمیزکاری بستره، نقش کلیدی در بهبود شرایط لایه‌نشانی ایفا می‌کنند. با توجه به مطالب گفته شده، از دو ماده ژرمانیوم به عنوان ماده‌ی ضریب شکست بالا (۴/۴-۰/۳ در بازه ۱۶-۲ میکرون) و ایتریوم باریوم فلوراید با فرمول تجاری IR-F625 به‌عنوان ماده‌ی با ضریب شکست پایین (۱/۴ در طول‌موج ۱۰ میکرون) استفاده شد که هر دو دارای پایداری محیطی و مکانیکی خوبی هستند. به کمک نرم افزار طراحی لایه‌های نازک مکلئود و ابزارهای مختلف آن، طراحی و بهینه‌سازی لازم انجام شد. این پوشش نابازتابنده به صورت شش لایه از مواد ژرمانیوم و IR-F625 به دست آمد که طرحواره‌ای از آن در شکل ۱ نمایش داده شده است.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

DLC (70 nm)
Ge (25 nm)
IR-F625 (857 nm)
Ge (70 nm)
IR-F625 (550 nm)
Ge (80 nm)
IR-F625 (190 nm)
ZnSe

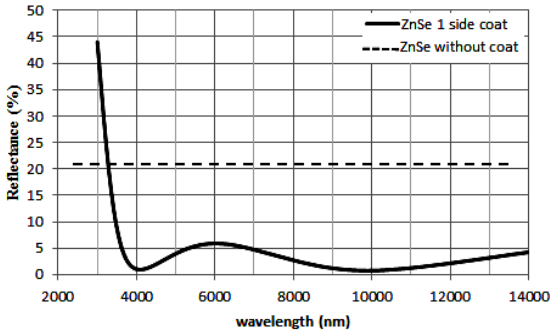
شکل ۱. طرحواره‌ای از قطعه‌ی اپتیکی طراحی شده.

به منظور افزایش چسبندگی و کاهش تنش مجموعه‌ی لایه نازک، از لایه‌ی واسط Y_2O_3 استفاده شده است. این ماده در سطح مقطع میان همه‌ی لایه‌ها (به جز میان لایه‌های DLC و ژرمانیوم) و نیز لایه و بستره، به میزان پنج نانومتر لایه-نشانی شده است.

برای بهبود سختی و پایداری پوشش، لایه‌ی محافظ DLC بر روی ساختار نابازتابنده، طراحی شده است. ضخامت این لایه، به گونه‌ای است که علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، باعث کاهش عبور نشود. برای این منظور، در حین طراحی ضخامت لایه‌ی DLC را در مقدار ۷۰ nm ثابت نگه داشته و ضخامت بقیه‌ی لایه‌ها را بهینه شد.

DLC دارای مشکل چسبندگی کم به اغلب لایه‌ها است [۵]. به منظور افزایش چسبندگی به ساختار نابازتابنده، باید از لایه‌ی میانی و چسبنده استفاده نمود. پارامترهای موثر در چسبندگی لایه‌ها شامل ساختار شبکه‌ای، تطابق در ثابت-های شبکه، انرژی آزاد سطح، روش لایه‌نشانی و غیره می-باشد. همچنین لایه میانی مورد نظر باید در ۵-۳ و ۱۲-۸ میکرومتر شفاف باشد. با توجه به مطالب گفته شده، لایه‌ی واسط ژرمانیوم به ضخامت ۲۵ nm بر روی ساختار نابازتابنده لایه نشانی شده است.

محاسبات نرم‌افزاری نشان می‌دهد که با لایه‌نشانی چنین مجموعه‌ای، طیف بازتابی از بستره ZnSe به صورت شکل ۲ خواهد بود. از اطلاعات آورده شده مشخص است که متوسط بازتاب ۱۷ درصدی بستره‌ی خام ZnSe، پس از طراحی مجموعه‌ی نابازتابنده، به طور متوسط در ۵-۳٫۵ و ۱۲-۸ میکرومتر، به کمتر از ۳ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۲. طیف عبور و بازتاب ساختار نابازتابنده به همراه پوشش محافظ کربن شبه الماسی بر روی فقط یک وجه از بسترهی ZnSe، حاصل از نرم‌افزار شبیه‌سازی فیلم نازک در مقایسه با طیف بازتاب بسترهی خام ZnSe.

۳- فرآیند ساخت

لایه‌نشانی مجموعه نابازتابنده به روش تبخیر فیزیکی (PVD) و لایه DLC به روش PECVD انجام شده است. لایه نشانی PVD، در محفظه‌ی خلاء توسط تفنگ الکترونی و لایه‌نشانی Y_2O_3، در فشار جزئی اکسیژن انجام پذیرفت. قبل از لایه‌نشانی، بستره با استون و به کمک امواج فراصوت تمیزکاری و بلافاصله قبل از لایه‌نشانی به منظور حذف کامل آلودگی‌ها، در محفظه‌ی خلاء در معرض تخلیه تابان قرار داده شد. خلاء پایه‌ی محفظه در حین لایه‌نشانی ۹×۱۰^{-۶} میلی‌بار در نظر گرفته شده است. ضخامت و نرخ انباشت لایه‌ها توسط کریستال پیزوالکتریک و ضخامت‌سنج اپتیکی اندازه‌گیری شدند. لایه‌نشانی با انجام فرآیندهای تحقیقاتی و محاسبه پارامترهای بهینه لایه‌نشانی انجام پذیرفت. خلاصه-ای از پارامترهای بهینه، در جدول ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است که فاکتور تصحیح در پارامترهای ارائه شده در نظر گرفته شده‌است.

جدول ۱. پارامترهای لایه‌نشانی ساختار نابازتابنده

ماده	نرخ‌انباشت (nms^{-1})	فشار اکسیژن (mbar)	فشارمحفظه (mbar)	دما ($^{\circ}C$)
Ge	۵	-	۹×۱۰^{-۶}	۱۶۰
IR-F625	۸	-	۹×۱۰^{-۶}	۱۶۰
Y_2O_3	۵	$۱/۵\times۱۰^{-۴}$	-	۱۶۰

پس از اتمام فرآیند لایه نشانی ساختار نابازتابنده، لایه‌ی DLC به روش PECVD و با گاز اولیه‌ی متان و پلاسمای آرگون و با پارامترهای موجود در جدول ۲ لایه نشانی شد. فرآیند ساخت، پس از بهینه‌سازی تکرار شده و همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌کنید، در نهایت مقدار متوسط بازتاب

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

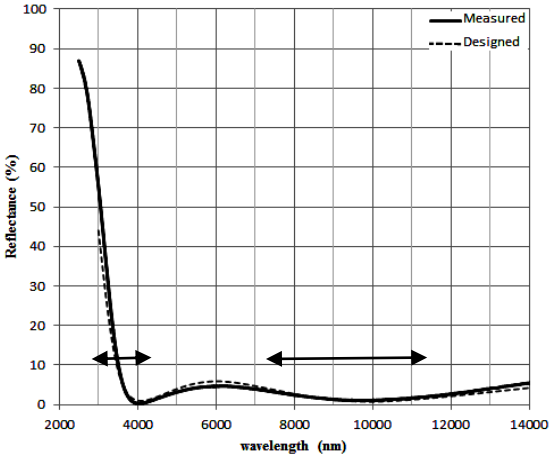
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

در بازه‌های ۵-۳٫۵ و ۱۲-۸ میکرومتر، از ۲۱ درصد به ۲٫۵ درصد رسانده شده است.

جدول ۲. پارامترهای لایه‌نشانی DLC.

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

در شکل ۴، طیف بازتاب قطعه‌ی اپتیکی ساخته شده در دو بازه‌ی ۵-۳٫۵ و ۱۲-۸ میکرومتر به طور مجزا نمایش داده شده‌است. پوشش نابازتابنده و DLC فقط در یک وجه بستره لایه‌نشانی شده است و برای اندازه‌گیری طیف بازتاب قطعه‌ی اپتیکی ساخته شده، وجه دوم بستره را ناهموار نموده تا امکان مقایسه طیف اندازه‌گیری شده با نتایج حاصل از شبیه‌سازی فراهم شود.



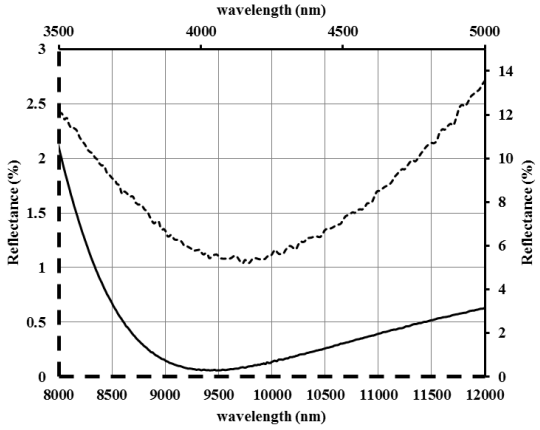
شکل ۳. (خط پر) طیف بازتاب اندازه گیری شده با دستگاه FTIR و به روش انعکاس نسبی (نسبت به لایه نشانی طلا) در مقایسه با طیف بازتاب حاصل از نرم‌افزار شبیه‌سازی فیلم نازک (خط چین).

این پوشش علاوه بر داشتن طیف بازتابی مناسب در دو بازه-ی ۵-۳٫۵ و ۱۲-۸ میکرومتر، از پایداری محیطی خوبی برخوردار بوده و آزمون‌های رطوبت (قرار دادن قطعه در چمبره‌ی با رطوبت ۹۹٪ و دمای ۷۰ °C)، حلالیت در آب و در آب نمک (قرار دادن قطعه به مدت ۲۴ ساعت در محلول آب مقطر و نمک)، شوک دمایی (قرار دادن قطعه در هر یک از دماهای ۶۲- و ۷۱ درجه‌ی سانتیگراد به مدت ۲ ساعت و سپس در دمای محیط) و سایش را با موفقیت گذرانده و اثری از ترک، خراش و پوست انداختن مشاهده نشده است، خلاصه‌ای از آزمون‌های انجام شده در جدول ۳ نمایش داده شده است. همچنین این پوشش از چسبندگی بسیار خوبی برخوردار است به گونه‌ای که با چسباندن و کندن سریع چسب، هیچ نشانی از کنده شدن پوشش، مشاهده نشده است.

جدول ۳. آزمون‌های مرتبط با پایداری محیطی قطعه‌ی اپتیکی.

آزمون	رطوبت	حلالیت		شوک دمایی	سایش
		آب	آب نمک		
نتیجه	✓	✓	✓	✓	✓

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



شکل ۴. طیف بازتاب قطعه‌ی اپتیکی ساخته شده که به طور مجزا در بازه‌ی ۱۲-۸ میکرومتر (خط پر) و بازه‌ی ۵-۳٫۵ میکرومتر (خط‌چین) نمایش داده شده‌است.

۴- نتیجه گیری

با لایه‌نشانی یک مجموعه‌ی نابازتابنده‌ی دو گانه به همراه DLC می‌توان، متوسط بازتاب را در دو بازه‌ی ۵-۳٫۵ و ۱۲-۸ میکرومتر به مقدار ۲٫۵ درصد کاهش و مقاومت مکانیکی یک قطعه‌ی اپتیکی مانند ZnSe را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. این پوشش آزمون‌های شوک دمایی، رطوبت، سایش، چسبندگی، مه نمکی، حلالیت در آب و در آب نمک را مطابق با استاندارد نظامی به خوبی گذرانده است.

مراجع

[1] A. Thelen, *Design of optical interference coating*, p. 63, Mcgraw-Hill Press, 1989.
[2] D. C. Harris, *Materials for Infrared Windows and Domes Properties and Performance*, SPIE Press Monograph Vol. PM70, USA, 1999.
[3] C. R. Lin, D. H. Wei, C.K. Chang, W.H. Liao, *Optical Properties of Diamond-like Carbon Films for Antireflection Coating by RF Magnetron Sputtering Method*, Physics Procedia, 2011.
[4] F. C. Sulzbach, *Method Of Forming Durable Wind-band Anti-Reflection Coating For Infrared Windows*, United States Patent, 1996.
[5] C. Donnet, A. Erdemir, *Tribology of Diamond-Like Carbon Films Fundamentals and Applications*, Springer Science.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]