



طراحی و ساخت مجموعه نابازتابنده دوگانه با پوشش محافظ

کربن شبه الماسی بر بستری ZnSe

محمد جان نثاری^۱، امیر بهران‌وند^۲، مهدی داودی دراره^۲

^۱شرکت صنایع الکترواپتیک صایران

^۲دانشگاه 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 ۳-۵ و ۸-۱۲ میکرومتر در زاویه‌ی عمود گزارش شده است. این مجموعه بر بستری ZnSe طراحی و به کمک روش‌های پرتوی الکترونی و PECVD با استفاده از ضخامت‌سنج کریستالی و اپتیکی در محفظه‌های با خلأ 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 ۳-۵ و ۸-۱۲ 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 Jannesari¹, Amir Behranvand², Mahdi Davoudi Darareh²

¹Sa-Iran Electro-Optic Industries Company

²Department of Physics, Faculty of Science, Malek-Ashtar university of Technology

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.

۱- مقدمه

جو زمین در دو بازه‌ی طول موجی ۵-۳ و ۱۲-۸ میکرومتر، دارای بیشترین میزان عبور و کمترین مقدار جذب نسبت به بقیه نواحی مادون قرمز 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 ۳-۱۲ میکرومتر می‌باشند، می‌توان به Ge, KBr, ZnSe, GaAs اشاره نمود. در این میان، بستری 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 بستری 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 طول موجی 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 مادون قرمز، یک چالش فنی محسوب می‌شود [۴].

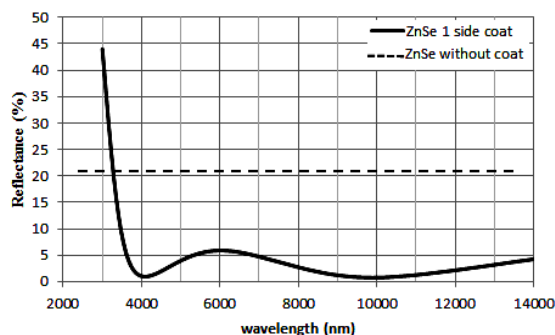
لایه‌ی DLC به عنوان لایه‌ی محافظ برای قطعاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در محیط‌هایی با میزان سایش بالا قرار دارند. DLC با ضریب شکست ۱/۹۳ (در طول موج ۱۰ میکرومتر) دارای ویژگی‌هایی از جمله استحکام مکانیکی و مدول یانگ بالا، ضریب اصطکاک پایین، عبوردهی بالا در ناحیه‌ی مادون قرمز، آب‌گریزی و مقاومت زیاد در مقابل مواد اسیدی و بازی با غلظت بالا است. با استفاده از این لایه (با توجه به شفافیت نوری در ناحیه‌ی مادون قرمز) 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 ضخامت‌های 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 ضد بازتاب نیز بیشتر می‌شود. در صورتی که چینش و ضخامت لایه‌ها مناسب نباشد، نوسانات مضر 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 نرم‌افزارها به روش ماتریسی بنا شده‌اند، با استفاده از این نرم‌افزارها 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 ایتربیوم باریم فلوراید با فرمول تجاری IR-F625 به عنوان ماده‌ی با ضریب شکست پایین (۱/۴) در طول موج ۱۰ میکرون) استفاده شد که هر دو دارای پایداری محیطی و مکانیکی خوبی هستند. به کمک نرم افزار طراحی لایه‌های نازک مکلنود 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 طرحواره‌ی آن در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۲. طیف عبور و بازتاب ساختار نابازتابنده به همراه پوشش محافظ کربن شبه الماسی بر روی فقط یک وجه از بستره ZnSe ، حاصل از نرم افزار شبیه سازی فیلم نازک در مقایسه با طیف بازتاب بستره خام ZnSe .

۳- فرآیند ساخت

لایه نشانی 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 لایه نشانی Y_2O_3 ، در فشار جزئی اکسیژن انجام پذیرفت. قبل از لایه نشانی، بستره با استون و به کمک امواج فراصوت تمیزکاری و بلافاصله قبل از لایه نشانی به منظور حذف کامل آلودگی‌ها، در محفظه‌ی خلاء در معرض تخلیه تابان قرار داده شد. خلاء پایه‌ی محفظه در حین لایه نشانی 9×10^{-6} میلی بار در نظر گرفته شده است. ضخامت و نرخ انباشت لایه‌ها توسط کریستال پیزوالکتریک و ضخامت سنج اپتیکی اندازه گیری شدند. لایه نشانی با انجام فرآیندهای تحقیقاتی و محاسبه پارامترهای بهینه لایه نشانی 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 شده است.

جدول ۱. پارامترهای لایه نشانی ساختار نابازتابنده

ماده	نرخ انباشت (nms^{-1})	فشار اکسیژن (mbar)	فشار محفظه (mbar)	دما ($^{\circ}\text{C}$)
Ge	۵	-	9×10^{-6}	۱۶۰
IR-F625	۸	-	9×10^{-6}	۱۶۰
Y_2O_3	۵	$1/5 \times 10^{-4}$	-	۱۶۰

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

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 لایه نشانی 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.

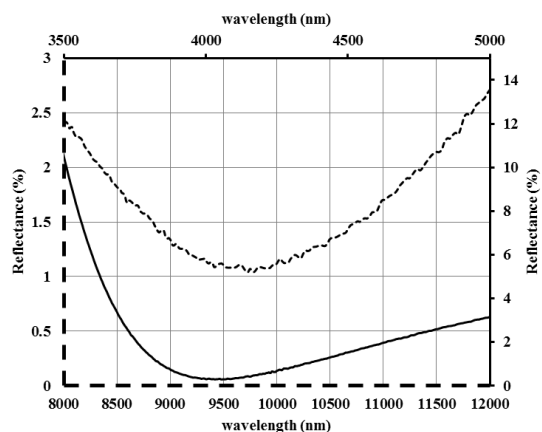
محاسبات نرم افزاری نشان می دهد که با لایه نشانی چنین مجموعه‌ای، طیف بازتابی از بستره ZnSe به صورت شکل ۲ خواهد بود. از اطلاعات آورده شده مشخص است که متوسط بازتاب ۱۷ درصدی بستره‌ی خام ZnSe ، پس از طراحی مجموعه‌ی نابازتابنده، به طور متوسط در ۵-۳ و ۱۲-۸ میکرومتر، به کمتر از ۳ درصد کاهش می یابد.

چسب، هیچ نشانی از کنده شدن پوشش، مشاهده نشده است.

جدول ۳. آزمون‌های مرتبط با پایداری محیطی قطعه‌ی اپتیکی.

آزمون	رطوبت	حلالیت		شوکی دمایی	سایش
		آب نمک	آب		
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 ۸-۱۲ میکرومتر (خط پر) و بازه‌ی ۳/۵-۵ میکرومتر (خط چین) نمایش داده شده است.

۴- نتیجه گیری

با لایه‌نشانی یک مجموعه‌ی نابازتابنده‌ی دو گانه به همراه DLC می‌توان، متوسط بازتاب را در دو بازه‌ی ۳/۵-۵ 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 شوکی دمایی، رطوبت، سایش، چسبندگی، مه نمکی، حلالیت در آب و در آب نمک را مطابق با استاندارد نظامی به خوبی گذرانده است.

مراجع

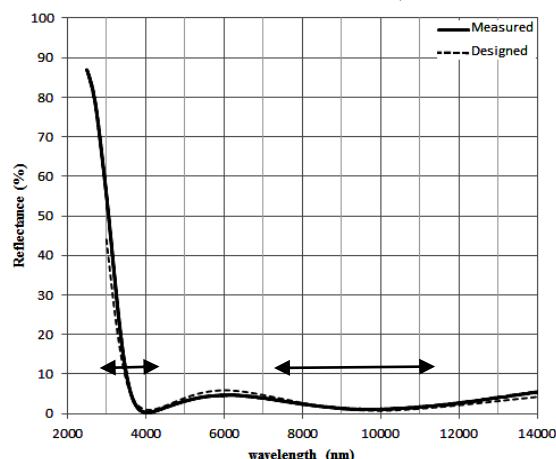
- [1] A. Thelen, *Design of optical interference coating*, p. 63, McGraw-Hill Press, 1989.
- [2] D. C. Harris, *Materials for Infrared Windows and Domes Properties and Performance*, SPIE Press Monograph Vol. PM70, USA, 1999.
- [3] C. R. Lin, D. H. Wei, C.K. Chang, W.H. Liao, *Optical Properties of Diamond-like 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.

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



شکل ۳. (خط پر) طیف بازتاب اندازه‌گیری 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 بازه‌ی ۳/۵-۵ و ۸-۱۲ 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)، شوکی 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