بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ 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 پرتوشکاف چند لایه در نواحی طول موجی ۵-۳٫۵ و ۱۲-۸ میکرومتر

محدثه آکوچکیان[۱*]، محمد جان نثاری[۲]، حسین احمدوند[۱]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

[۲]گروه پژوهشی لایه‌های نازک، صنایع اپتیک اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده – در این پژوهش، طراحی و ساخت نمونه‌ای از پوشش پرتوشکاف تیغه‌ای چند لایه که قابلیت تفکیک دو ناحیه‌ی طول موجی با بیشینه‌ی بازتاب در ۵-۳٫۵ میکرومتر و بیشینه‌ی عبور در ۱۲-۸ میکرومتر را دارد، گزارش شده است. این پرتوشکاف تیغه‌ای بر بستره‌ی *Ge* و با استفاده از مواد اولیه‌ی *Ge* و *IR-F625* به روش لایه‌نشانی تبخیر فیزیکی (*PVD*) در محفظه‌ی خلاء توسط روش پرتو الکترونی و با بهره‌گیری از روش ضخامت‌سنجی کریستالی ساخته شده است. در نهایت نمونه‌ی ساخته شده دارای میانگین بازتاب ۹۳٫۶ درصد در محدوده‌ی طول موجی ۵-۳٫۵ میکرومتر و میانگین عبور ۹۶٫۱ درصد در محدوده‌ی طول موجی ۱۲-۸ میکرومتر است.

کلید واژه- پوشش پرتوشکاف چند لایه، لایه‌نشانی تبخیر فیزیکی.

Design and fabrication of multi-layer beamsplitter coating in 3.5-5 µm & 8-12 µm wavelength regions

Mohadeseh Akouchakiyan[1*], Mohammad Jannesari[2], Hossein Ahmadvand[1]

[1] Department Of Physics, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

[2]Thin Films Research Group, Isfahan Optic Industry, Isfahan, Iran

Abstract- In this research we report the design and fabrication of multi-layers beamsplitter coating in 3.5-5µm & 8-12µm wavelength regions. These multi-layer coated optics can be used to separate 3.5-5µm (in reflection channel) and 8-12µm (in transmission channel) wavelength regions .The coating material combination used on Ge substrate was Ge as high index material and IR-F625 as high index material . Deposition was performed by physical vapor deposition (PVD) technique in a vacuum chamber by using electron gun and thermal boat. Quartz crystal was used for thickness control .Result achieve was 93.6% average reflection in 3.5-5µm region and 96.1% average transmission in 8-12 µm.

Keywords: multi-layer beamsplitter coating, physical vapor deposition (PVD)

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

۱- مقدمه

قطعات پرتوشکاف تیغه‌ای لایه نازک، از عناصر مهم و پایه در سامانه‌های تصویربرداری دو طیفی به شمار می‌آیند. این پرتوشکاف‌ها در جداسازی دو یا چند ناحیه‌ی طول موجی نقشی اساسی ایفا می‌کنند. ویژگی این پرتوشکاف‌ها، عملکرد اپتیکی بالا در جداسازی نواحی طول موجی، وزن و هزینه‌ی ساخت کمتر (درمقایسه با پرتوشکاف‌های مکعبی)، پایداری محیطی بالا و ... می‌باشد[۱].

مبنای عملکرد این پرتوشکاف‌ها به پدیده‌ی تداخل امواج در لایه‌های نازک باز می‌گردد. با الهام از این پدیده و با لایه‌نشانی مجموعه‌ی لایه‌ی نازک چند لایه با ضرایب شکست و ضخامت مناسب می‌توان ابزار پرتوشکاف تولید نمود. پوشش‌های پرتوشکاف برای بازه‌ی مشخص طول موجی که می‌تواند از UV تا IR را در برگیرد و برای زاویه‌ی فرود معین غیرعمود طراحی و ساخته می‌شوند[۱].

با وجود پیشرفت‌های زیاد در ساخت سامانه‌های تصویربرداری دو طیفی که در خدمات شهری گوناگون (ایمنی آتش، جنگل-بانی)، پزشکی، صنعت و بخش دفاعی کاربرد دارند[۲]، نیاز به قطعات پرتوشکاف که نواحی طول موجی ۵-۳٫۵ و ۱۲-۸ میکرومتر را از یکدیگر تفکیک نماید، افزایش یافته است. در این پژوهش، طراحی و ساخت پوشش پرتوشکاف تیغه‌ای بر بستره‌ی ژرمانیوم توصیف می‌شود. نشان داده خواهد شد که این مجموعه، توان بالایی در جداسازی بازه‌های طول موجی ۵-۳٫۵ و ۱۲-۸ میکرومتر دارا می‌باشد.

۲- طراحی

نخستین گام در طراحی یک مجموعه‌ی پرتوشکاف تیغه‌ای انتخاب بستره و مواد مورد استفاده است. درواقع یک مجموعه‌ی چند لایه شامل مواد با ضرایب شکست بالا و پایین که در محدوده‌ی طول موجی ۵-۳٫۵ و ۱۲-۸ میکرومتر شفاف و در دسترس بوده و دارای جذب اپتیکی اندک و چسبندگی مناسب با یکدیگر و با بستره باشند. این مواد باید دارای ضرایب انبساط خطی و ثابت‌های شبکه نزدیک به هم نیز باشند و در فرود انرژی‌های بالا و شرایط محیطی نامناسب از مقاومت قابل قبولی برخوردار باشند، به گونه‌ای که مجموعه لایه‌نشانی شده از تنش باقیمانده پایین‌تر برخوردار باشد[۳]. اختلاف ضریب شکست بین دو ماده پارامتر مهمی است که در گزینش مواد باید لحاظ شود. هرچه اختلاف ضرایب شکست بین لایه‌ها بیشتر باشد، ضخامت مجموعه لایه‌نشانی شده کمتر می‌شود و توان پرتوشکاف در تفکیک نواحی طول موجی، پهنای نواحی عبور و بازتاب و میزان عبور و بازتاب نواحی بیشتر می‌شود. محاسبات نظری مربوط به طراحی چنین مجموعه‌هایی در اغلب کتاب‌های اپتیک لایه‌های نازک موجود می‌باشد[۴].

با توجه به این ملزومات، ژرمانیوم و IR-F625 به ترتیب به عنوان مواد با ضریب شکست بالا و پایین انتخاب شدند و بر اساس عملکرد اپتیکی بهینه و سطح تنش پسماند پایین، ژرمانیوم به عنوان بستره انتخاب شد. ماده‌ی IR-F625 به صورت ترکیب YF_3/BaF_2 و در فرم دانه‌دانه است. این ماده با ضریب شکست ۱٫۳ در ۱۲-۳٫۵ میکرومتر و بازه‌ی شفافیت ۱۲~۰٫۱۹ میکرومتر از خواص مکانیکی و پایداری محیطی مطلوبی برخوردار است[۵]. ژرمانیوم نیز با ضریب شکست ۴ در ۱۲-۳٫۵ میکرومتر و بازه‌ی شفافیت ۱۴~۲ میکرومتر نیز دارای ویژگی‌های مکانیکی و پایداری محیطی مطلوبی می‌باشد[۶].

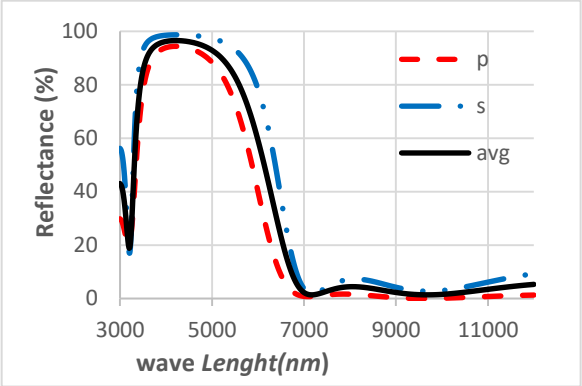
طراحی پوشش پرتوشکاف که در یک ناحیه‌ی طول موج، عبور و در ناحیه‌ای دیگر بازتاب بالایی داشته باشد، از طراحی‌هایی است که به ضخامت زیاد لایه‌ها نیازمند می‌باشد. ویژگی‌های مجموعه لایه‌های نازک را می‌توان با نرم‌افزارهای شبیه‌سازی لایه‌های نازک بررسی نمود. این نرم‌افزارها بر روش ماتریسی که هر ماتریس ۲×۲ به یک لایه نسبت داده می‌شود، بنا شده‌اند. می‌توان ویژگی‌های عبور و بازتاب مجموعه‌ی لایه‌ها را از ماتریس حاصلضرب همه‌ی ماتریس‌ها محاسبه و بهینه نمود[۷]. با طراحی و بهینه سازی این مجموعه لایه‌نشانی با استفاده از نرم-افزار طراحی لایه‌های نازک[۸]، یک طرح شش لایه به دست آمد که ترتیب و ضخامت فیزیکی لایه‌های آن به صورت زیراست:

Ge/L(230)/H(380)/L(560)/H(250)/L(1220)/H(70)/Air

که L و H به ترتیب نشان دهنده‌ی یک چارک موج از مواد انتخابی با ضریب شکست بالا / پایین در طول موج مرجع طراحی (۴۲۵۰ نانومتر) و زاویه‌ی تابش ۴۵ درجه است. در صورتی که چنین طرحی بر بستره‌ی ژرمانیوم لایه‌نشانی گردد، طیف عبوری بر طبق محاسبات نرم‌افزار طراحی لایه‌های نازک به صورت زیر فراهم می‌شود:

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]



شکل ۱: طیف‌های بالا مربوط به پوشش پرتوشکاف بر طبق محاسبات نرم افزار طراحی می‌باشد. این طیف‌ها مربوط به قطبش s، قطبش p و متوسط قطبش s و p در زاویه‌ی ۴۵ درجه است.

نمودار افقی این طیف، برحسب طول موج و نمودار عمودی، درصد بازتاب را نشان می دهد. این طیف ها مربوط به اثرات سطح اول قطعه است که طراحی پرتوشکاف بر روی آن انجام شده است. به عبارت دیگر این طیف‌ها، اثرات سطح دوم را نمایش نمی‌دهند (برسطح دوم قطعه‌ی پرتوشکاف، در بازه‌ای که برای عبور بالا طراحی شده است (۸-۱۲ میکرومتر)، پوشش نابازتابنده لایه‌نشانی می‌گردد). همان‌گونه که از طرح مشخص است انتظار می‌رود که پرتو نور در برخورد به پرتوشکاف تحت زاویه‌ی ۴۵ درجه، در بازه‌ی ۵-۳٫۵ میکرومتر، دارای میانگین بازتاب ۹۳٫۳ درصد (با فرض جذب اندک) و در بازه‌ی۱۲-۸ میکرومتر دارای میانگین عبور ۹۷٫۷ درصد (با فرض جذب اندک) باشد.

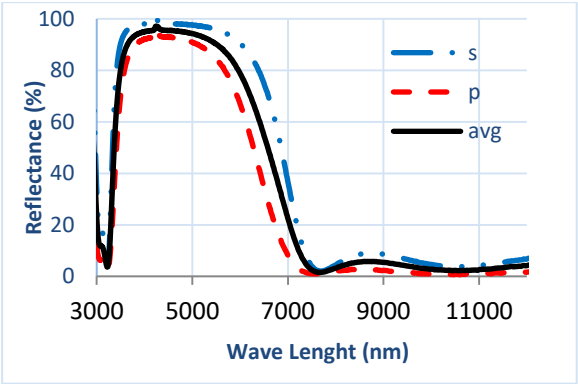
۳- نتایج تجربی

لایه‌نشانی به روش تبخیر فیزیکی در محفظه‌ی خلاء و توسط تفنگ الکترونی انجام پذیرفت. شستشو بستره نقشی اساسی در پایداری پوشش ساخته شده اجرا می‌کند. بنابراین قبل از لایه نشانی، بستره ژرمانیوم به کمک مواد شیمیایی و در حضور امواج فراصوت شسته شده و بلافاصله پیش از لایه‌نشانی به منظور حذف کامل آلودگی‌ها، در محفظه‌ی خلاء در برابر بمباران یونی قرار گرفتند. فشار پایه‌ی محفظه در حین لایه نشانی ۴×۱۰^{-۶} میلی بار در نظر گرفته شد. نرخ انباشت لایه‌ها و ضخامت توسط کریستال پیزوالکتریک اندازه‌گیری شدند. بررسی‌های انجام شده با اجرای چند آزمایش تحقیقاتی نشان داد که جهت استحکام و پایداری پوشش و چسبندگی لایه‌ها به هم و بستره و کاهش تنش، از یک لایه‌ی واسط اکسیدایتریوم (Y_2O_3) با ضخامت نانومتری در میان لایه‌ها استفاده شود. همچنین در حین انباشت Y_2O_3 ، گاز اکسیژن به منظور جلوگیری از نقض استوکیومتری در هنگام رشد آن به درون چمبره تزریق می شود. لایه نشانی با انجام پروسه‌های تحقیقاتی و محاسبه پارامترهای بهینه‌ی بدست آمده انجام پذیرفت. خلاصه‌ای از پارامترهای بهینه در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱) پارامترهای انباشت لایه‌ها

ماده	نرخ انباشت (A^o/s)	فشارجزئی اکسیژن (mbar)	دما (c^o)
Ge	۱۰	۴×۱۰^{-۶}	۱۸۰
IR-F625	۱۵	۴×۱۰^{-۶}	۱۸۰

طیف بازتاب پوشش با طیف سنج تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) اندازه‌گیری شد. وجه دوم پوشش ساخته شده به جهت امکان مقایسه‌ی اطلاعات تئوری شکل ۱ و نتایج تجربی اندازه-گیری، ناصاف گردید و سطح صیقل آن از بین برده شد. شکل ۲ منحنی بازتاب نسبی مجموعه‌ی ساخته شده نسبت به طلا در زاویه ۴۵ درجه در محدوده‌ی طول‌موج‌های مورد نظر را نشان می‌دهد.



شکل۲: طیف‌های بالا مربوط به اندازه‌گیری پوشش پرتوشکاف ساخته شده نهایی می‌باشد. این طیف‌های بازتاب نسبی، مربوط به قطبش s، قطبش p و متوسط قطبش s و p می‌باشد و در دستگاه FTIR و نسبت به طلا در زاویه ۴۵ درجه گرفته شده است.

این نتایج پس از لایه نشانی تک لایه‌ها و استخراج پارامترهای بهینه‌ی آن، چندین مرحله بهینه‌سازی و مهندسی معکوس طیف و حذف خطاهای متقارن و غیرمتقارن حین انباشت به دست آمد. با توجه به طیف‌سنجی‌های انجام گرفته، مشخص شد که نور با برخورد تحت زاویه ۴۵ درجه، با میانگین ۹۳٫۶

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

درصد در بازه‌ی ۵-۳/۵ میکرومتر بازتاب می‌شود و با میانگین ۹۶/۱ درصد در ۱۲-۸ میکرومتر عبور می‌کند و به این ترتیب این دو ناحیه‌ی طول موجی از یکدیگر تفکیک می‌شوند.

۴- نتیجه گیری

می‌توان با لایه‌نشانی یک مجموعه چندلایه از مواد با ضرایب شکست بالا و پایین و کنترل شرایط انباشت، یک پوشش پرتوشکاف تیغه‌ای در محدوده‌ی فروسرخ میانی با میانگین بازتاب ۹۳/۶ در ۵-۳/۵ میکرومتر و میانگین عبور ۹۶/۱ در ۱۲-۸ میکرومتر تولید کرد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقادیر به دست آمده با نتایج بهتری نسبت به پژوهش‌های قبلی حاصل شده است.

مراجع

[1] Al-Azzawi, A., *Photonics: Principles and Practices*. 2006: CRC Press. p.233

[2] J .A .Savage ,*Infrared Optical Materials and Antireflection Coating*, *Adam* Hilger Ltd., Briston and Boston Publication,1985.

[3] Harris, D.C., *Materials for infrared windows and domes properties and performance*. 1999, SPIE: Bellingham, Wash. (1000 20th St. Bellingham WA 98225-6705 USA) :. p. 205

[4] Macleod H. A. ,*Thin Film Optical Filters*,p 209,CRC Press,New York (2010)

[5] http://www.thinfilmproducts.umicore.com

[6] Daniel C. Harris, *Materials for infrared windows and domes-properties and performance*, SPIE – Inst.Soc.Opt.Eng.(1999).ISBN 0-8194-3482-5.

[7] Ronald R. Willy, *practical Design and Production of Optical Thin Film* , Secound Edition,p.382,Marcel Dekker Press,2002

[8] A. Macleod and C. Clark, *optical Coating Design with the Essential Macleod*: Thin Film Center, Incorporated,2012

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

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