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 پرتوشکاف مکعبی برای گستره‌ی مرئی و طول موج ۱۵۵۰ نانومتر

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

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

چکیده - در این پژوهش طراحی و ساخت پرتو شکاف مکعبی مرئی- لیزری گزارش شده است. پیش از لایه نشانی طراحی و شبیه سازی توسط نرم افزار انجام شد. لایه نشانی به روش تبخیر فیزیکی در خلا با استفاده از تفنگ الکترونی انجام شد و با لایه نشانی تک لایه ها بهترین شرایط انباشت و ضریب شکست مواد به دست آمد. مجموعه ی لایه نازک ۲۱ لایه ای بر وتر منشور لایه نشانی گردید و پس از چسباندن منشورها به یکدیگر با به کار بردن طیف سنج دو پرتویی از پرتوشکاف طیف سنجی شد. طیف عبور نهایی مقدار ٪۹۲ برای طول موج لیزری و ٪۳۰ را برای بازه ی طول موجی مرئی نشان داد.

کلید واژه- پرتو شکاف مکعبی، لایه نشانی، محفظه‌ی خلا.

Design and fabrication of cube beam splitter for visible range and 1550nm wavelength

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

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

Abstract- In this research Design and fabrication of cube beam splitter, has been reported. Designing and simulation performed with Essential Macleod software before deposition. Deposition was performed using physical vapor deposition with electron gun. Refractive indices and optimized deposition conditions of materials achieved with single layer deposition. 21 layers thin film stack deposited on hypotenuse of prism. Then prisms cemented to each other and transmission spectra of beam splitter measured using a dual-beam spectrophotometer. Finally transmission spectrum showed 92% for 1550 wavelength and 30% for visible wavelength rang.

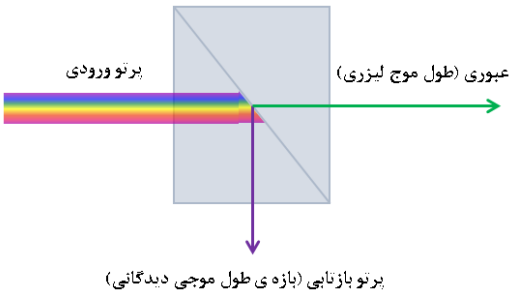
Keywords: Cube beam splitter, Deposition, Vacuum chamber.

[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

پرتوشکاف‌ها ابزارهای اپتیکی هستند که کاربردهای گسترده‌ای در ساخت انواع ابزارها و سامانه‌های اپتیکی و الکترواپتیکی دارند. این ابزارها می‌توانند به صورت تیغه‌ای یا مکعبی[۱] ساخته شوند که هر یک ویژگی‌های خاص خود را دارند[۱]. پرتو شکاف‌های مکعبی یکی از اجزای بسیار پرکاربرد در سامانه‌های اپتیکی می‌باشند. این پرتوشکاف‌ها از دو منشور متساوی‌الوجوه کاملاً مشابه ساخته می‌شوند که از سمت وتر به یکدیگر چسبانده می‌شوند بنابراین قطعه‌ی نهایی به شکل یک مکعب خواهد بود. پیش از آنکه منشورها به یکدیگر چسبانده شوند باید پوشش‌های لایه نازک مورد نیاز بر روی آنها لایه‌نشانی شود. پوشش پرتوشکاف که اصلی‌ترین پوشش در ساخت این قطعه است و در حقیقت کار اصلی را انجام می‌دهد بر روی وتر یکی از منشورها لایه-نشانی می‌شود و وتر منشور دوم بدون پوشش باقی می‌ماند. بسته به نوع سامانه‌ی مورد استفاده ممکن است هر دو ساق هر دو منشور (چهار وجه مکعب) با پوشش نابازتابنده‌ی خاصی لایه‌نشانی شود یا تنها دو یا سه وجه لایه‌نشانی گردند. در هر حال تمام لایه‌نشانی‌ها باید پیش از چسباندن دو منشور به یکدیگر انجام شوند. نمودار طرحوار پرتوشکاف مکعبی موردنظر این پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: نمودار طرحوار پرتوشکاف مکعبی.

۲- طراحی مجموعه

پرتوشکاف‌های مکعبی تفاوت ویژه‌ای با دیگر لایه‌های نازک اپتیکی دارند و آن باعث می‌شود که کار طراحی و ساخت آنها دشوارتر گردد. این تفاوت به این دلیل است که برخلاف سایر پوشش‌های اپتیکی در این نوع پرتوشکاف‌ها مجموعه‌ی لایه نازک با هوا ارتباط ندارد. در حقیقت در پوشش‌های دیگر، لایه‌های نازک به ترتیب بر بستره لایه‌نشانی می‌شوند و در پایان آخرین لایه در معرض هوا خواهد بود. اما در پرتوشکاف‌های مکعبی منشورها به یکدیگر چسبانده می‌شوند و بنابراین هنگامی که قطعه‌ی نهایی مورد استفاده قرار می-گیرد پوشش پرتوشکاف محصور بین دو محیط با ضریب شکست مساوی است (در اینجا شیشه اپتیکیBAK4 با ضریب شکست ۱/۵۷) و از آنجا که کارکرد مجموعه‌ی لایه نازک به شدت به ضریب شکست بستره و محیط فرودی وابسته است، طراحی و ساخت این پرتوشکاف‌ها دشوار می-شود [۱و۴]. لازم به ذکر است که ضریب شکست چسب‌های مخصوص چسباندن قطعات اپتیکی پس از خشک شدن برابر شیشه‌های اپتیکی می‌باشد. بنابراین می‌توان با تقریب بسیار خوبی مجموعه‌ی لایه نازک را محصور بین دو محیط شیشه-ای در نظر گرفت.

۱-۲- گزینش مواد مناسب لایه نشانی

پیش از آنکه طراحی انجام شود باید مواد مناسب برای لایه-نشانی برگزیده شود تا بر اساس ثوابت اپتیکی آن طراحی مجموعه انجام شود. نخستین شرط برای گزینش مواد، شفافیت در طول موج‌های مرئی و طول موج لیزری ۱۵۵۰ نانومتر است. همچنین این مواد باید چسبندگی مناسبی به بستره و به یکدیگر داشته باشند و در شرایط محیطی مورد استفاده از مقاومت قابل قبولی برخوردار باشند. اختلاف ضریب شکست بین دو ماده پارامتر مهمی در تعیین پهنای ناحیه‌ی بازتاب بالا و میزان بازتاب در گستره‌ی مرئی و عبور در طول موج لیزری است[۱و۲].

با توجه به ملزومات ذکر شده مواد اکسید سیلیسیوم به عنوان ماده‌ی با ضریب شکست پایین و اکسید تیتانیوم به عنوان ماده‌ی با ضریب شکست بالا انتخاب شدند.

۲-۲- شبیه سازی نرم افزاری

نخستین گام برای ساخت هر پوشش اپتیکی یک طراحی دقیق و قابل اجرا می‌باشد که به نحو مناسبی شبیه سازی شده باشد. یک طراحی خوب هم نتیجه‌ی اجرایی خوبی دربر خواهد داشت و هم زمان و هزینه‌ی ساخت را کاهش می-دهد. در پوشش‌هایی مانند این نوع پرتوشکاف‌ها که تعداد لایه‌ها معمولاً زیاد است اهمیت هزینه و زمان بیشتر نمایان می‌شود چرا که طراحی نه چندان خوب، تعداد اجراهای

[۱] Cube beam splitter

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

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

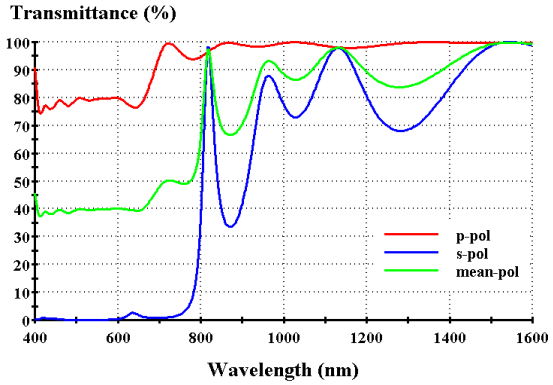
آزمایشی را تا رسیدن به نتیجه‌ی مطلوب زیاد می‌کند و این یعنی افزایش زمان و هزینه[۴].

نرم افزار مورد استفاده برای طراحی لایه‌های نازک اپتیکی، نرم‌افزار Essential Macleod است که در زمره‌ی نرم‌افزارهای کم نظیر طراحی می‌باشد.

هدف از این پژوهش طراحی و ساخت یک پرتوشکاف مکعبی مرئی- لیزری است بطوریکه بازه‌ی طول موجی مرئی را در پرتوی بازتابی و تک طول موج لیزری ۱۵۵۰ نانومتر را در پرتوی عبوری از یکدیگر جدا کند. میزان بازتابش بازه‌ی مرئی دست کم۷۰ درصد و عبور طول موج لیزری دست کم۹۰ درصد مورد نظر می‌باشد.

از آنجا که این پرتوشکاف در دو بازه‌ی طول موجی کار می‌کند طراحی آن قطعاً با لایه‌های غیرچارک موج خواهد بود و بهترین راه تعریف یک هدف[۲] و سپس بهینه‌سازی آن توسط الگوریتم‌های موجود در نرم افزار است.

برای طراحی چنین پرتوشکافی باید تعداد زیادی مجموعه‌ی لایه نازک طراحی و بهینه‌سازی نمود و پس از مقایسه‌ی آنها بهترین مورد را برگزید[۵]. آنچه که در نهایت به عنوان بهترین طراحی به آن دست پیدا کردیم یک مجموعه‌ی ۲۱ لایه‌ای است. طیف عبور این مجموعه که توسط نرم افزار ارائه شده، در شکل (۲) آورده شده است.



شکل ۲: طیف عبور مجموعه‌ی لایه نازک طراحی شده که توسط نرم-افزار شبیه سازی و ارائه شده است.

۳- ساخت مجموعه

در این پژوهش لایه‌نشانی به روش تبخیر فیزیکی در محفظه‌ی خلأ و در حضور فشار جزئی اکسیژن، توسط تفنگ الکترونی انجام پذیرفت. قبل از لایه‌نشانی، قطعات 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. فشار پایه‌ی محفظه‌ی لایه‌نشانی ۵×۱۰^{-۶} میلی‌بار در نظر گرفته شد. ضخامت و نرخ انباشت لایه‌ها با به کاربردن کریستال پیزوالکتریک اندازه‌گیری شدند.

۳-۱- لایه نشانی تک لایه‌ها

همانطور که می‌دانیم در لایه‌نشانی به روش فیزیکی شرایط لایه‌نشانی بر ثوابت اپتیکی و ویژگی‌های محیطی مجموعه لایه نازک نهایی بسیار موثر است. همچنین پارامترهای دیگری نظیر هندسه‌ی دستگاه لایه‌نشانی یا نوع مواد اولیه‌ی مورد استفاده نیز بر این موارد تاثیر دارند[۲]. بدین ترتیب، به منظور دست‌یابی به بهترین شرایط انباشت و مقدار ضریب شکست دقیق لایه‌ها پیش از آغاز به لایه‌نشانی مجموعه، تک لایه‌هایی از هر یک از مواد لایه‌نشانی شد. با چندین بار بهینه‌سازی و لایه‌نشانی مجدد تک لایه‌ها، بهترین شرایط انباشت به دست آمد که در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱: شرایط لایه‌نشانی بهینه شده برای هر یک از مواد بکار رفته در ساخت پرتوشکاف مکعبی.

ماده	نرخ رشد (nm/s)	فشار جزئی اکسیژن ($\times۱۰^{-۴}$ m bar)	دمای لایه نشانی(°C)
SiO_2	۰/۵	۱/۵	۲۳۰
TiO_2	۰/۳	۱/۱	۲۳۰

همچنین با تحلیل طیف بازتابی و با بکار بردن رابطه‌ی (۱) می‌توانیم ضریب شکست لایه‌ها را محاسبه نماییم[۱]. با استفاده از ضرایب شکست واقعی و بکارگیری آنها در طراحی اولیه و بهینه‌سازی مجدد آن، ضخامت‌های نهایی و دقیق برای لایه‌نشانی مشخص می‌شوند.

$$n_f = ((1+(R)^{1/2}) / (1-(R)^{1/2}))^{1/2}\ n_s^{1/2} \qquad (۱)$$

در رابطه‌ی (۱) n_f ضریب شکست تک لایه، n_s ضریب شکست بستره و R میزان بازتابش در نقطه‌ی اکسترمم است.

۳-۲- لایه‌نشانی مجموعه‌ی لایه نازک

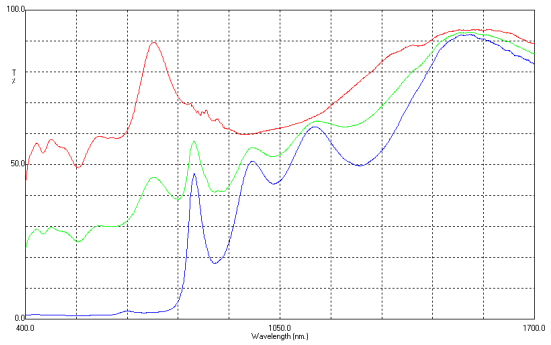
از آنجا که هدف این پژوهش ساخت پرتوشکاف برای استفاده در یک سامانه‌ی اپتیکی است می‌بایست وجوه آن نیز با لایه‌های نازک نابازتابنده لایه‌نشانی می‌شدند تا کارایی

[۲] Target

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

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

پرتوشکاف بیشتر گردد. بدین منظور پیش از لایه‌نشانی پوشش پرتو شکاف بر وتر منشور، ساق‌های هر دو منشور با پوشش نابازتابنده‌ی دو باندی لایه‌نشانی شدند که نحوه‌ی ساخت آن در این نوشتار نمی‌گنجد. پس از لایه‌نشانی مجموعه‌ی لایه نازک و بعد از اینکه دمای بستره به دمای محیط رسید نمونه از دستگاه خارج شد و با چسب مخصوص چسباندن قطعات اپتیکی به منشور دوم چسبانده شد. آخرین مرحله خشک شدن چسب با تابش پرتوهای فرابنفش است و پس از آن پرتو شکاف مکعبی آماده است. طیف عبور نمونه توسط دستگاه طیف‌سنج دو پرتویی اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه پرتوی نور با زاویه‌ی ۴۵ درجه به پوشش پرتو شکاف برخورد می‌کند، طیف‌سنجی باید بطور جداگانه برای هر دو قطبش انجام شود و سپس میانگین قطبش‌ها محاسبه گردد. شکل (۳) نمودار به دست آمده از طیف‌سنجی پرتو شکاف را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود میزان عبور در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر بیش از ٪۹۲ و در بازه‌ی طول موجی مرئی حدود ٪۳۰ می‌باشد که بیانگر بازتابش حدود ٪۷۰ در این بازه است. این طیف پس از چندین بار لایه‌نشانی و بهینه‌سازی مجدد به دست آمده است و همانطور که نمودار نشان می‌دهد با دقت نسبتاً خوبی بر نمودار طراحی منطبق است. وجود افت و خیز در بازه‌ی طول موجی مرئی اندکی انحراف از طراحی را نشان می‌دهد. با توجه به بررسی‌های انجام شده این امر دلایل مختلفی دارد که مهمترین آن خطای ضخامت لایه‌ها در فرآیند لایه‌نشانی و همچنین نایکنواختی ضریب شکست لایه‌ها می‌باشد که معمولاً در لایه‌نشانی با دستگاه‌های معمولی و به روش تبخیر با تفنگ الکترونی وجود دارد و در مجموعه‌های با تعداد لایه-ی زیاد بیشتر نمایان می‌شود [۳].



شکل۳: طیف عبور اندازه‌گیری شده‌ی پرتوشکاف ساخته شده. نمودارهای قرمز و آبی به ترتیب قطبش‌های P و S و نمودار سبز قطبش میانگین می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

می‌توان با لایه‌نشانی یک مجموعه‌ی چندلایه از مواد دی-الکتریک با ضرایب شکست بالا و پایین و نیز از طریق کنترل شرایط انباشت، پرتو شکاف مکعبی مرئی – لیزری ساخت. ضخامت لایه‌ها و یکنواختی آنها تاثیر زیادی در کاهش افت و خیزها دارد و در صورتی که بتوان با بکار بردن تجهیزات پیشرفته دقت این موارد را افزایش داد نمونه‌های با کیفیت بهتری می‌توان لایه‌نشانی کرد. اختلاف ضریب شکست بین دو ماده پارامتر مهمی در افزایش میزان عبور در گستره‌ی عبوری و پهنای گستره‌ی بازتابی است که باید با بهینه‌سازی شرایط انباشت به آن دست یافت.

مراجع

[1] Macleod H. A., *Thin Film Optical Filter*, p. 192, CRC Press, New York 2010.

[2] Willey R. R., *Practical design and production of optical thin films*, p. 277-9, Marcel Dekker, INC., 2002.

[3] Donald M. Mattox., *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*, p. 324, Noyes publication, Westwood, New Jersey, 1998.

[4] M Shokooh-Saremi, M Nourian, M.M Mirsalehi, S.H Keshmiri., *Design of multilayer polarizing beam splitters using genetic algorithm Original Research Article* , Optics Communications., Volume 233, Issues 1–3, 15 March 2004, Pages 57-65.

[5] Jerzy Ciosek, J. A. Dobrowolski, Glenn A. Clarke, and George Laframboise., *Design and manufacture of all-dielectric nonpolarizing beam splitters*, Applied Optics Vol. 38, Issue 7, pp. 1244-1250 (1999).

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

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