بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

طراحی و ساخت آینه‌ی تمام دی‌الکتریک دوگانه‌ی لیزری ۱۰۶۴ و ۵۳۲ نانومتر

محمد جان نثاری، حسین زابلیان، مهدی مردیها، علیرضا فیروزی‌فر و محمد محمود ورپایی

دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

چکیده - در این پژوهش طراحی و ساخت آینه‌ی دوگانه‌ی لیزری تمام دی‌الکتریک لایه‌ی نازک برای طول‌موج‌های ۱۰۶۴ و ۵۳۲ نانومتر در زاویه‌ی عمود و برای لیزرهای پالسی گزارش شده است. این آینه‌ی ۳۰ لایه‌ای بر بستره‌ی شیشه‌ی *BK7* طراحی و ساخته شده و به کمک پرتو الکترونی و استفاده از ضخامت‌سنج کریستالی در محفظه‌ی با خلأ پایه از مرتبه ی 10^{-6} میلی بار لایه‌نشانی شده است. طراحی این مجموعه به گونه‌ای انجام شده که توزیع میدان اکتریکی در سطوح بین لایه‌ای کمینه گردد و بنابراین آستانه آسیب لیزری آن نیز افزایش یابد. با انجام بهینه‌سازیهای مناسب، میزان عبور در طول موج ۱۰۶۴ و ۵۳۲ نانومتر در طیف نهایی به کمتر از ۰٫۳٪ کاهش یافته است.

کلید واژه- آینه دو گانه‌ی لیزری تمام دی الکتریک، آستانه آسیب لیزری، بستره‌ی BK7

Design and fabrication of dual wavelength all-dielectric laser mirror at 532 and 1064 nm

Hosein Zabolian, Mohammad Jannesari, Mehdi Mardiha, Alireza Firoozifar and Mohammad Mahmood Varpaei

Faculty of Physics, Isfahan University

Abstract. In this research we report design and fabrication of all dielectric thin film laser mirror at wavelengths 1064 and 532 nm for pulse lasers and for incident angle of 90 degree. This 30 layers mirror was deposited on BK7 substrate with base pressure in order 10^{-6} mbar by using Electron gun and crystal monitoring. This stack was designed to reduce electric field at first interface and therefore to increase laser induced damage threshold. By suitable refinement finally we found that transmission was reduced to less than %0.3 at wavelengths 1064 and 532 nm.

Keywords: thin film all dielectric mirror, laser induced damage threshold, BK7 Substrate

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

۱- مقدمه

آینه‌های تمام دی‌الکتریک لایه‌ی نازک، از عناصر پایه در سامانه‌های لیزری به شمار می‌آیند. سختی و پایداری محیطی مناسب و فقدان جذب در طول موج‌های لیزری باعث شده که از این آینه‌های مشدد، در لیزرهای پرتوان استفاده گردد. مبنای عملکرد آینه‌های تمام دی‌الکتریک به پدیده‌ی تداخل امواج در لایه‌های نازک باز می‌گردد. با الهام از این ویژگی‌ها و با لایه‌نشانی مجموعه‌ی لایه‌ی نازک با ضرایب شکست و ضخامت مناسب می‌توان ابزار بازتابنده‌ی کامل را تولید نمود. آینه‌های تمام دی‌الکتریک برای بازه‌ی مشخص طول موجی که می‌تواند از UV تا IR را دربر گیرد و برای زاویه‌ی فرود معین طراحی و استفاده می‌شوند[۱].

با وجود پیشرفت‌های زیاد در ساخت سامانه‌های لیزری، نیاز به آینه‌های تمام دی‌الکتریک با دو طول موج بازتاب افزایش یافته‌است. آینه‌های دوگانه، برای لیزرهایی که از یکی از هارمونیک‌های خود در مسیر پرتو یکسان استفاده می‌کند لازم می‌باشد. در این پژوهش، طراحی و ساخت بازتابنده‌ی تمام دی‌الکتریک بر بستره‌ی شیشه‌ی BK7 توصیف می‌شود. نشان داده خواهد شد که این مجموعه، در طول موج‌های ۵۳۲ و ۱۰۶۴ نانومتر انعکاس بسیار بالایی دارد.

۲- طراحی

آینه‌ی تمام دی‌الکتریک، مجموعه‌ی چند لایه‌ای از دو ماده با ضرایب شکست بالا و پائین می‌باشد که یک در میان در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. در صورتی که حتی ضرایب انعکاس فرنل از مرز لایه‌ها کوچک باشد، تداخل سازنده‌ی پرتوهای منعکس شده از تعداد زیاد مرزها، انعکاس زیاد در طول موج طراحی را فراهم می‌آورد. در عمومی و ساده‌ترین طراحی، مقادیر ضخامت اپتیکی همه‌ی لایه‌ها برابر چارک-موجِ طول‌موج طراحی می‌باشد. این طرح، بیشترین انعکاس ممکن از تعداد لایه‌های معین برای دو ماده مشخص‌است. تعداد لایه‌های مجموعه‌ی بازتابنده، به انعکاس مورد نظر و اختلاف ضرایب شکست دو ماده بستگی دارد. پهنای ناحیه‌ی بازتاب نیز تابع اختلاف ضریب شکست دو ماده است. محاسبات نظری مربوط به طراحی چنین مجموعه‌هایی، در اغلب کتاب‌های اپتیک لایه‌ی نازک موجود می‌باشد[۲].

طراحی آینه‌ی دوگانه که در دو طول‌موج لیزری انعکاس بالا داشته باشد از طراحی‌های مشکل به شمار می‌آید. برای داشتن دو ناحیه‌ی انعکاس بالا، لازم است که دو مجموعه‌ی چارک موجی در کنار یکدیگر قرار گیرند. هر مجموعه، انعکاس بیشینه در یک طول موج را فراهم می‌آورد. در صورتی که چینش لایه‌ها مناسب نباشد، ریپل‌های غیر قابل کنترل در طرح ایجاد می‌شود. نسبت ضخامت‌های دو مجموعه باید از نسبت طول موج‌های هدف بیشتر باشد زیرا در طول‌موج‌های بلندتر، ضریب شکست لایه‌ها کاهش می‌یابد. در طراحی آینه باید این نکته لحاظ شود که برای جلوگیری از تنش‌های مضر در لایه‌ها، لازم است که مجموعه‌ها در یک پروسه و بر روی یکدیگر لایه‌نشانی شوند.

ویژگی‌های مجموعه لایه‌های دی‌الکتریک را می‌توان با نرم افزارهای شبیه‌سازی لایه‌های نازک بررسی نمود. این نرم افزارها بر روش ماتریسی که هر ماتریس ۲×۲ به یک لایه نسبت داده می‌شود بنا شده است. می‌توان ویژگی‌های عبور، انعکاس، توزیع میدان الکتریکی و ... مجموعه لایه‌ها را از ماتریس حاصلضرب همه‌ی ماتریس‌ها محاسبه و بهینه نمود نمود.

۲-۱ انتخاب مواد

مواد انتخابی باید در ناحیه‌ی مادون قرمز نزدیک و مرئی شفاف بوده، چسبندگی مناسبی به بستره و یکدیگر داشته باشند و در فرود انرژی‌های بالا و شرایط محیطی نامناسب از مقاومت قابل قبولی برخوردار بوده و بین ضرایب شکستشان اختلاف هر چه بیشتر وجود داشته باشد.

با توجه به این ملزومات، دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2) و دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) به ترتیب به عنوان مواد با ضریب شکست پایین و بالا و با گستره‌ی شفافیت به ترتیب ۹-۰٫۲ و ۱۲-۰٫۳۹ میکرومتر[۳] انتخاب شدند. این ترکیب در میان مواد اکسیدی مورد استفاده در کاربردهای لیزری بیشترین اختلاف ضریب شکست را دارا می‌باشد. SiO_2 بهترین ماده از نظر مقاومت لیزری شناخته می‌شود[۴]. برای شناخت دقیق ضرایب شکست و ضخامت فیزیکی چارک موج طول موج طراحی، به انباشت تک لایه‌های این دو ماده نیازمندیم. با انجام محاسبه‌ای که در قسمت ۳ خواهد آمد، ضرایب شکست SiO_2 و TiO_2 در طول موج ۵۳۲ نانومتر، به ترتیب ۱٫۴۹ و ۲٫۳۸ به دست آمد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

با طراحی و بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار طراحی لایه‌های نازک، طرح نهایی ۲۹ لایه، به دست آمد. ترتیب و ضخامت اپتیکی لایه‌ها به صورت زیر می‌باشد:

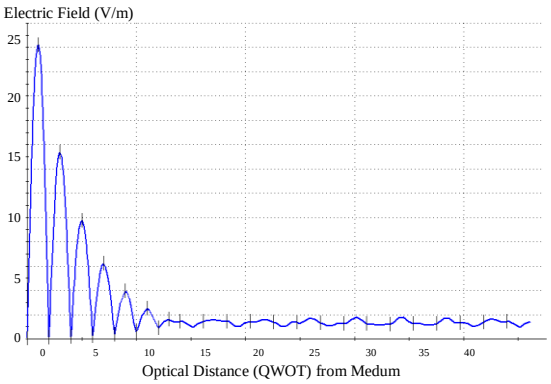
$$BK7/(2.14TiO_2/2.14\ SiO_2)^7/2.14TiO_2/(\ SiO_2/TiO_2)^7/Air$$

طول‌موج مرجع طراحی، ۵۳۲ نانومتر و زاویه‌ی تابش، عمود در نظر گرفته شده است. در این زاویه، انعکاس در طول موج‌های ۵۳۲ و ۱۰۶۴ نانومتر به ترتیب برابر ۹۹/۹ و ۹۹/۸ می باشد.

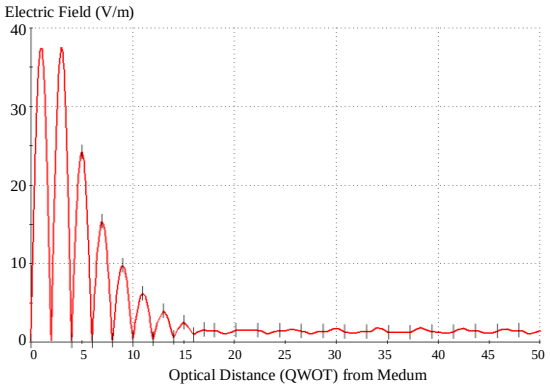
۲-۲ بررسی توزیع میدان الکتریکی

از عوامل مؤثر بر آستانه‌ی آسیب پذیری لیزری پوشش‌های لایه‌ی نازک، توزیع میدان الکتریکی در سطوح بین لایه‌ای می‌باشد[۵]. به دلیل انعکاسی بودن این مجموعه، تخریب لیزری به دامنه‌ی میدان در سطح مقطع لایه‌ی مجاور هوا بستگی بیشتر دارد[۵]. توزیع میدان الکتریکی مجموعه، در شکل ۱ آورده شده است. از این شکل واضح است که بیشینه میدان در طرح ۲۹ لایه، در اولین مرز TiO_2 و SiO_2 قرار دارد. با توجه به اینکه ناخالصی و در نتیجه بیشترین آسیب پذیری در این مرز می‌باشد، لازم است که بیشینه به گونه‌ای که ویژگی طیفی مجموعه نیز مختل نشود جابجا گردد. این کار با قرار دادن لایه‌ی SiO_2 در مجاورت هوا با ضخامت چهار برابر چارک موج طول‌موج طراحی انجام می‌شود بنابراین طرح نهایی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

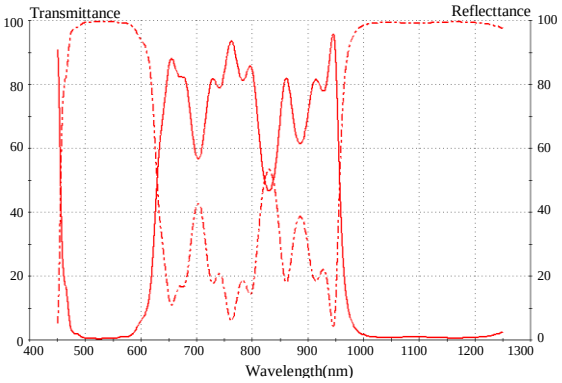
$$BK7/(2.14TiO_2/2.14\ SiO_2)^7/2.14TiO_2/(\ SiO_2/TiO_2)^7/4SiO_2/Air$$



شکل۱) تغییرات میدان الکتریکی در مجموعه‌ی ۲۹ لایه با افزایش ضخامت اپتیکی. خطوط عمود، مرز لایه‌ها هستند. بیشینه‌ی میدان الکتریکی، در اولین مرز لایه‌ی SiO_2 و TiO_2 می‌باشد. این منحنی به کمک نرم افزار طراحی لایه‌های نازک تهیه شده است.



شکل۲) تغییرات میدان الکتریکی در مجموعه ۳۰ لایه نسبت ضخامت اپتیکی. خطوط عمود، مرز لایه‌ها را معین می‌کنند.



شکل۳) منحنی‌های خط‌چین و پیوسته به ترتیب، بازتاب و تراگسیل از مجموعه‌ی ۳۰ لایه بر بستره BK7، با لحاظ اثرات سطح دوم را نمایش می‌دهد. کلیه‌ی طراحی و شبیه‌سازی‌ها توسط نرم افزار طراحی لایه‌های نازک انجام شده است.

چنانچه در شکل ۲ مشاهده می‌شود با افزودن لایه‌ی SiO_2، شدت میدان الکتریکی در اولین مرز TiO_2 و SiO_2 کمینه شده و به مقدار صفر رسیده است. این پدیده منجر به بهبود توزیع میدان الکتریکی به نفع افزایش آستانه‌ی آسیب خواهد شد.

محاسبات نرم‌افزاری نشان می‌دهد که با لایه‌نشانی مجموعه‌ی ۳۰ لایه، طیف بازیاب و تراگسیل با لحاظ اثر بازتاب سطح دوم بستره‌ی BK7، به صورت شکل ۳ خواهد بود.

۳- فرآیند ساخت

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 مواد شیمیایی و

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

در حضور امواج فراصوت شستشو داده شده و بلافاصله قبل از لایه‌نشانی به منظور حذف کامل آلودگی‌ها، در محفظه‌ی خلأ در معرض بمباران یونی قرار گرفتند. خلأ پایه‌ی محفظه در حین لایه‌نشانی، ۳×۱۰^{-۶} میلی‌بار در نظر گرفته شد. ضخامت و نرخ انباشت لایه‌ها توسط کریستال پیزوالکتریک اندازه‌گیری شدند.

گام نخست در ساخت یک پوشش اپتیکی، ساخت تک‌لایه‌ها می‌باشد. پارامترهای انباشت تک لایه‌های SiO_2 و TiO_2 در جدول ۱ آورده شده است. با بهینه‌سازی ضخامت و اصلاح فرایند لایه‌نشانی به کمک نرم افزار طراحی، ضخامت‌های چارک‌موج در طول موج ۵۳۲ نانومتر به دست آمد. این ضخامت برای SiO_2 و TiO_2 به ترتیب ۹۳٫۸ و ۵۵٫۱ نانومتر می‌باشد. با استفاده از رابطه‌ی ۱ [۵] می‌توان ضریب شکست لایه‌ی نازک را در طول موج بیشینه و یا کمینه‌ی طیف به دست آورد:

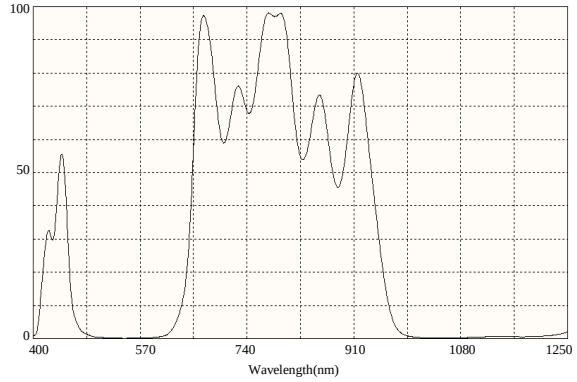
$$n_f=((1+(R)^{1/2})/(1-(R)^{1/2}))^{1/2}n_s^{1/2} \qquad (۱)$$

که در آن، n_s و n_f به ترتیب ضرایب شکست بستره و لایه نازک و R درصد بازتاب در بیشینه یا کمینه هستند.

با لحاظ ضخامت اپتیکی هر لایه و نیز ضخامت چارک‌موج مواد، ضخامت فیزیکی هر لایه در مجموعه‌ی ۳۰ لایه به دست آمد و فرآیند لایه‌نشانی با این ضخامت‌ها انجام پذیرفت. در انجام این پروسه، پارامترهای جدول ۱ برای هر ماده دقیقاً لحاظ گردیدند. پس از لایه‌نشانی، طیف عبور توسط یک طیف‌سنج دو پرتویی اندازه‌گیری شد. شکل ۴ منحنی عبور پوشش ساخته شده را نشان می‌دهد. این طیف که بیانگر انعکاس کامل در طول موج‌های ۵۳۲ و ۱۰۶۴ نانومتر است پس از چندین مرحله بهینه سازی و حذف خطاهای متقارن و غیر متقارن حین انباشت به دست آمد.

جدول ۱) پارامترهای انباشت تک‌لایه‌ها.

ماده	نرخ انباشت (nm/s)	فشار جزئی اکسیژن (mbar)	دما (C°)
SiO_2	۰٫۷۵	۲×۱۰^{-۴}	۲۵۰
TiO_2	۰٫۲۵	$۱٫۵\times۱۰^{-۴}$	۲۵۰



شکل۴) طیف عبور اندازه‌گیری شده از نمونه توسط طیف سنج دو پرتویی. عبور در طول موج‌های ۵۳۲ و ۱۰۶۴ نانومتر نزدیک به صفر می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

می‌توان با لایه‌نشانی یک مجموعه‌ی چند لایه از مواد که یکی از آن‌ها ضریب شکست بالا و دیگری ضریب شکست پایین داشته باشند و کنترل شرایط انباشت، انعکاس کامل در طول موج‌های ۵۳۲ و ۱۰۶۴ نانومتر را فراهم آورد. با افزودن یک لایه با ضخامت چهار برابر چارک موج طول موج طراحی، می‌توان توزیع میدان الکتریکی در لایه‌ی مجاور هوا را به نفع افزایش آستانه‌ی آسیب لیزری مجموعه‌ی لایه‌ی نازک افزایش داد. در صورت اجرای پروسه در شرایط یکسان، پروسه تکرار پذیری مناسبی دارد.

مراجع

[1] Alfered Thelen, *Design of optical interference coatings*, p. 87, McGRAW-HILL Press, New York 1989

[2] H.Angus Macleod, J., *Thin Film Optical Filter*, p 209, CRC Press, New York (2010).

[3] Palik, E. D., *Handbook of Optical Constants in Solids*, Academic Press (1985

[4] J.Kogler, *Laser Damage In Thin Film Optical Coatings*, Published by GACIAC IIT Reasech Institutee, Chicagi, 1992,

[5] H. A. Macleod, *Thin film optical filters*, p. 74, (IOP publishing, 2002).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]