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 مادون قرمز
با ترکیب آینه‌های فلزی و تمام دی الکتریک لایه نازک

محمد جان نثاری، حسین زابلیان، سید علیرضا فیروزی فر، مهدی مردیها و حمیده قانعی

دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

چکیده - در این پژوهش، طراحی و ساخت آینه‌ی مادون قرمز فلز – دی الکتریک لایه‌ی نازک برای بازه‌ی طول موجی ۵-۳ میکرومتر در زاویه‌ی عمود گزارش شده است. این آینه ۳ لایه‌ای بر بستره‌ی شیشه‌ی *BK7* طراحی و به کمک پرتو الکترونی و فیلمان گرمایی ساخته شده و با بهره گیری از ضخامت سنج کریستالی در محفظه با خلأ پایه 10^{-6} میلی بار لایه‌نشانی شده است. ویژگیهای ممتاز این آینه، پایداری محیطی، استحکام مکانیکی و قابلیت تمیزکاری آن می‌باشد. نتایج حاصل از طیف سنجی نشان می‌دهد که انعکاس این آینه در بازه‌ی ۵-۳ میکرون از طلا بیشتر می‌باشد.

کلید واژه- آینه‌ی انعکاس بالای مادون قرمز، لایه نشانی تبخیر فیزیکی.

Design and fabrication of infrared mirror by combination of thin film metal and all dielectric mirrors

Mohammad Jannesari[1], Hosein Zabolian[1], Mehdi Mardiha[1], Alireza Firoozifar[1] and

Hamideh Ghanei[1]

Faculty of Physics, Isfahan University

Abstract- In this research we report the design and fabrication of metal – all dielectric thin film mirror for 3-5 micron range and for normal incident angle. This 3 layer mirror was deposited on BK7 substrate in 10^{-6} mbar base pressure by Electron gun and thermal filament. Quartz crystal was used for thickness control. High advantages of this mirror are environment durability, mechanical hardness and clean ability. Spectrophotometery results show that the reflection of this mirror in 3-5 micron range is higher than gold.

Keywords: high reflection infrared mirror, physical vapor deposition

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

۱- مقدمه

در اغلب نواحی طول موجی، برای ساخت آینه‌ی اپتیکی لایه نازک از فلز آلومینیوم استفاده می‌شود. شرایط پوشش‌دهی آسان، ارزانی و چسبندگی مطلوب به شیشه‌ها و مواد لایه نشانی باعث شده تا از این فلز به طور وسیع‌تری نسبت به بقیه‌ی فلزات استفاده شود. این آینه به دلیل پایداری محیطی و استحکام مکانیکی اندک، نیازمند لایه‌نشانی پوشش محافظ می‌باشد. از طرف دیگر، اغلب پوشش‌های تک لایه‌ی محافظ، طیف انعکاسی آلومینیوم را مختل نموده و خواص مکانیکی و پایداری محیطی را نیز به میزان قابل قبول بهبود نمی‌دهند[۱].

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. تداخل سازنده‌ی پرتوهای منعکس شده از مرزها، انعکاس بالا در بازه‌ی طول‌موج طراحی را فراهم می‌آورد. به دلیل محدودیت‌های فراوان (مانند ضخامت بالا و در نتیجه تنش زیاد لایه‌ها)، استفاده از طرح‌های آینه‌ی غیر فلزی تمام دی الکتریک در ناحیه‌ی مادون قرمز به سختی امکان پذیر می‌باشد[۱].

در این پژوهش تلاش شده تا با تلفیق طرح‌های آینه‌ی فلزی و تمام دی‌الکتریک، علاوه بر افزایش استحکام و پایداری محیطی، انعکاس آلومینیوم نیز افزایش یابد. این آینه که با انباشت یک مجموعه‌ی تمام دی‌الکتریک بر لایه‌ی آلومینیوم برای ناحیه‌ی طول‌موجی ۵-۳ میکرون طراحی و ساخته شده، نسبت به طلا، انعکاس بالاتری دارد و استحکام مکانیکی، پایداری محیطی و قابلیت تمیز کاری مطلوبی را فراهم می‌آورد.

۲- طراحی

از ویژگی‌های لازم برای مواد مورد استفاده در مجموعه‌ی تمام دی‌الکتریک می‌توان به شفافیت در بازه‌ی ۵-۳ میکرون، استحکام مکانیکی و پایداری محیطی مطلوب اشاره نمود. میزان انعکاس، به اختلاف ضرایب شکست دو ماده بستگی دارد. هرچه تفاوت ضریب شکست بیشتر باشد، درصد انعکاس بالاتری در مجموعه فراهم می‌شود. پهنای ناحیه‌ی بازتاب نیز تابع اختلاف ضریب شکست دو ماده است. محاسبات نظری مربوط به طراحی چنین مجموعه‌هایی، در اغلب کتاب‌های اپتیک لایه‌های نازک موجود می‌باشد[۲]. با توجه به مطالب گفته شده، از دو ماده‌ی ژرمانیوم و دی‌اکسید سیلیکون استفاده گردید. در مقایسه با بقیه مواد اکسیدی، SiO_2 - با ضریب شکست ۱/۴ (در طول موج ۳ میکرون) و بازه‌ی شفافیت ۹ ~ ۰/۲ - از بهترین خواص مکانیکی و پایداری محیطی برخوردار می‌باشد[۳]. ژرمانیوم – با ضریب شکست ۴/۰ (در ۳ میکرومتر) و بازه‌ی شفافیت ۱۴~ ۲ میکرومتر - نیز دارای ویژگی‌های مکانیکی و پایداری محیطی مطلوبی می‌باشد[۴]. انعکاس آینه‌ی آلومینیوم در ناحیه طول‌موجی مادون قرمز میانی و دور در حدود ۹۷/۵ درصد گزارش شده است[۲].

ویژگی‌های مجموعه لایه‌های نازک 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 شده‌اند[۵]. با استفاده از نرم‌افزار طراحی لایه‌های نازک مکلئود و ابزارهای مختلف آن، طراحی و بهینه سازی‌های لازم انجام پذیرفت. طرح آینه‌ی کامل ۵-۳ میکرون به صورت زیر می‌باشد:

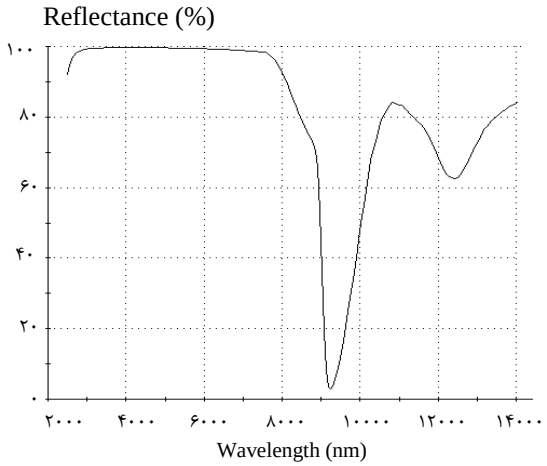
جدول ۱: طرح آینه کامل ۵-۳ میکرون.

لایه	ماده	ضخامت (نانومتر)
محیط	هوا	---
۳	Ge	۲۶۳/۵
۲	SiO_2	۶۰۷
۱	Al	۱۳۴
زیرلایه	شیشه	---

این طرح به صورت سه لایه و از مواد آلومینیوم، ژرمانیوم و سیلیکا می‌باشد. ضخامت و چینش دو ماده رویی به گونه‌ای برگزیده شده که علاوه بر محافظت از لایه‌ی آلومینیوم، انعکاس آن را نیز افزایش دهد. در صورتی که چنین طرحی بر یک شیشه لایه نشانی گردد، طیف

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

انعکاسی بر طبق محاسبات نرم افزار طراحی لایه‌های نازک به صورت زیر فراهم می‌گردد:



شکل۱: منحنی بازتاب آینه‌ی کامل ۵-۳ میکرومتر. افت شدید انعکاس در بازه‌ی طول موجی ۹۰۰۰ نانومتر به اثرات جذبی SiO_2 مربوط می‌باشد. طراحی و شبیه‌سازی توسط نرم افزار طراحی لایه‌های نازک انجام شد.

نمودار افقی این طیف، برحسب طول موج و نمودار عمودی، درصد انعکاس را نشان می‌دهد. مشخص است که چنین طرحی در بازه‌ی ۵-۳ میکرون، بیشینه انعکاس را فراهم می‌آورد.

۲-۱- نتایج تجربی:

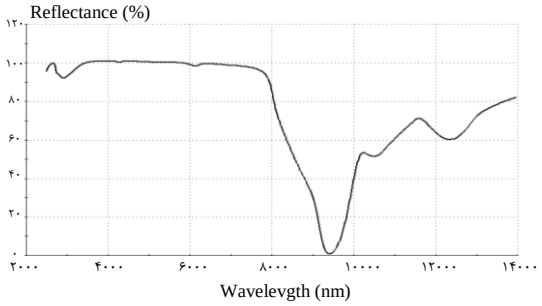
لایه‌نشانی به روش تبخیر فیزیکی در محفظه‌ی خلأ و در حضور فشار جزئی اکسیژن (برای لایه نشانی SiO2)، توسط تفنگ الکترونی انجام پذیرفت.

جدول۲) پارامترهای انباشت لایه‌ها.

ماده	نرخ انباشت (nm/s)	فشار جزئی اکسیژن (mbar)	دما (C°)
SiO_2	۰/۷۵	۲×۱۰^{-۴}	۲۵۰
Ge	۰/۵	----	۲۵۰

قبل از لایه‌نشانی، شیشه‌ها 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. خلأ پایه‌ی محفظه در حین لایه‌نشانی ۶-۱۰×۵ میلی‌بار در نظر گرفته شد. ضخامت و نرخ انباشت لایه‌ها توسط کریستال پیزوالکتریک اندازه‌گیری شدند.

لایه‌نشانی با انجام پروسه‌های تحقیقاتی و محاسبه پارامترهای بهینه لایه‌نشانی انجام پذیرفت. خلاصه‌ای از پارامترهای به دست آمده، در جدول ۲ آورده شده است. فرآیند لایه‌نشانی با ضخامت‌های جدول ۱ انجام پذیرفت. در انجام این پروسه، پارامترهای جدول ۲ برای هر ماده دقیقاً لحاظ گردیدند. شکل ۲ منحنی انعکاس نسبی مجموعه ساخته شده (نسبت به آینه طلا در زاویه ۱۲ درجه) را نشان می‌دهد. این نتیجه پس از چندین مرحله بهینه سازی و حذف خطاهای متقارن و غیر متقارن حین انباشت به دست آمد. از این شکل واضح است که ناحیه‌ی انعکاس کامل، محدوده‌ی وسیعی را پوشش می‌دهد و درصد انعکاس آن بیشتر از ۱۰۰ درصد یعنی بیشتر از طلا می‌باشد.



شکل۲: طیف بالا مربوط به آینه ۵-۳ میکرومتر ساخته شده نهایی می‌باشد. محور افقی برحسب طول موج و محور عمودی، درصد انعکاس را نمایش می‌دهد. این طیف انعکاس نسبی، با استفاده از دستگاه FTIR و نسبت به طلا در زاویه ۱۲ درجه گرفته شده است.

این پوشش علاوه بر دارا بودن طیف مناسب انعکاسی، از پایداری محیطی مناسب برخوردار می باشد. در صورتی که قطعه دارای این پوشش، در چمبره‌ای با رطوبت ۹۹ درصد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

و دمای ۷۰ درجه سانتی گراد قرار گیرد هیچگونه تغییری در خواص ظاهری و طیفی پوشش ایجاد نخواهد شد. این پوشش، از چسبندگی بسیار بالایی به شیشه برخوردار است به گونه ای که با چسباندن یک چسب بر آن، کندن سریع چسب، هیچ نشانه ای از کنده شدن پوشش مشاهده نشد. این آزمون‌ها در آزمایشگاه محیطی شرکت اپتیک اصفهان انجام شدند.

۳- نتیجه‌گیری

با تلفیق طرح اینه تمام دی الکتریک و فلزی، علاوه بر افزایش انعکاس پوشش، استحکام و پایداری محیطی آن نیز افزایش یافت به گونه ای که انعکاس قطعه از طلا بیشتر و آزمون های رطوبت و چسبندگی نیز گذرانده شدند.

مراجع

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

[2] H. A. Macleod, *Thin film optical filters*, p. 209, (IOP publishing, 2002).

[3] Liping Feng and Zhengtang Liu, *Characteristics of silicon dioxide films prepared on sapphire*, Materials science and engineering B, Vol. 122, Page 7, 2005.

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

[5] Ronald R. Willy, *Practical Design and Production of Optical Thin Film*, Second Edition, p. 382, Marcel Dekker Press, 2002

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]