

| |
|-----------------------|
| Research Paper |
|-----------------------|

Optimization of Metal-dielectric-quasi metal High Reflection Mirrors in Infrared Wavelength¹

Maryam Gheshlaghi² and Somayeh Davodi³

Received: 2021.10.27

Revised: 2022.01.16

Accepted: 2022.02.19

Abstract

The purpose of this paper is an optimization of high reflection mirrors in the infrared wavelength. Infrared mirrors, in addition to being one of the main components of carbon dioxide lasers, are widely used in the flexible optical path or beam conduction. In the structure of these high reflection infrared mirrors, metal, dielectric and quasi-metal are used as Glass/Metal/Dielectric/Quasi metal/Air. Separately the design of the high reflection mirror was investigated for each of the metals, dielectric and quasi-metal layers with different materials. In each step, the best type of material is selected based on the highest percentage of reflection. These layers are Silver (with a reflection of 99.87% in the structure of Glass/Metal/Air), magnesium fluoride (with a reflection of 98.31% in the structure of Glass/Ag/MgF₂/Air), and Germanium (with a reflection of 99.88% in Structure Glass/Ag/MgF₂/Ge/Air) for metal, dielectric and quasi-metal, respectively. Then, by changing the thickness of each layer, the optimal thicknesses for silver, magnesium fluoride, and germanium were determined to be 100, 550, and 200 nm, respectively. Examining the effect of angles of light incidence, it was observed that the highest average reflection is related to the angle of zero and 99.88%. The coating designs were done by McLeod coating software.

Keyword: *Coating, High Reflection, Infrared, Carbon Dioxide Lasers, Quasi Metal.*

¹ DOI: 10.22051/ijap.2022.38823.1251

² Assistant Professor, Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRL), Tehran, Iran. (Corresponding Author). Email: mgheshlaghi@aeoi.org.ir

³ M. Sc. Graduated, Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRL), Tehran, Iran. Email: sdavodi@aeoi.org.ir



بهینه‌سازی آینه‌های تمام‌بازتاب فلز - دی‌الکتریک - شبه‌فلز

در محدوده طول‌موج فروسرخ^۱

مریم قشلاقی*^۲ و سمیه داودی^۳

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران
دانشکده فیزیک شیمی، دانشگاه الزهرا
سال دوازدهم، پیاپی ۲۸، بهار ۱۴۰۱
صص ۳۱-۴۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰

چکیده:

هدف این مقاله بهینه‌سازی آینه‌های تمام‌بازتاب در محدوده طول‌موج فروسرخ می‌باشد. آینه‌های فروسرخ علاوه بر اینکه یکی از اجزای اصلی لیزر گاز کربنیک می‌باشد، کاربرد گسترده‌ای در مسیر نوری قابل انعطاف یا هدایت پرتو دارند. در ساختار این آینه‌های تمام‌بازتاب فروسرخ از فلز، دی‌الکتریک و شبه‌فلز به صورت (شیشه/فلز/دی‌الکتریک/شبه‌فلز/هوا) استفاده می‌شود. به طور جداگانه طراحی لایه‌نشانی آینه تمام‌بازتاب برای هر یک از لایه‌های فلزی، دی‌الکتریک و شبه‌فلز با مواد مختلف بررسی شد. در هر مرحله بهترین نوع لایه بر اساس بالاترین درصد بازتاب انتخاب شد. این لایه‌ها نقره (با بازتاب ۹۹/۸۷ درصد در ساختار شیشه/فلز/هوا)، فلوراید منیزیم (با بازتاب ۹۸/۳۱ درصد در ساختار شیشه/نقره/فلوراید منیزیم/هوا) و ژرمانیم (با بازتاب ۹۹/۸۸ درصد در ساختار شیشه/نقره/فلوراید منیزیم/ژرمانیوم/هوا) به ترتیب برای فلز، دی‌الکتریک و شبه‌فلز هستند. سپس با تغییر ضخامت هر یک از لایه‌ها، ضخامت بهینه برای نقره، فلوراید منیزیم و ژرمانیم به ترتیب ۱۰۰، ۵۵۰ و ۲۰۰ نانومتر تعیین شد. با بررسی تأثیر زاویه تابش، ملاحظه گردید که متوسط بیشترین درصد بازتاب مربوط به زاویه صفر و ۹۹/۸۸ درصد می‌باشد. طراحی‌های لایه‌نشانی توسط نرم‌افزار لایه‌نشانی مک‌لئود صورت گرفت.

واژگان کلیدی: لایه‌نشانی، تمام‌بازتاب، فروسرخ، لیزر گاز کربنیک، شبه‌فلز.

^۱ DOI: 10.22051/ijap.2022.38823.1251

^۲ استادیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). Email: mgsheshlaghi@aeoi.org.ir

^۳ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، تهران، ایران. Email: sdavodi@aeoi.org.ir



۱. مقدمه

آینه‌های فروسرخ آینه‌هایی نوری هستند که برای بازتاب بیشتر طیف فروسرخ (IR) طراحی شده‌اند. این آینه‌ها دارای کاربرد وسیعی بوده و در حوزه‌های گوناگون نظامی، پزشکی و صنعتی جهت تغییر مسیر نوری یا کنترل پرتو استفاده می‌شوند. طول موج فروسرخ از فروسرخ نزدیک^۱ تا فروسرخ دور^۲ شامل طول موج‌های بین ۰/۸ تا ۱۰ میکرومتر (فروسرخ نزدیک ۰/۸ تا ۲ میکرون، فروسرخ متوسط ۳ تا ۵ میکرون و فروسرخ دور ۸ تا ۱۱ میکرون) است [۱].

یکی از مهم‌ترین کاربردهای آینه‌های فروسرخ در لیزرهای گاز کربنیک است. لیزرهای گاز کربنیک از دسته پر کاربردترین لیزرهای قدرت به شمار می‌آیند که با توجه به ساختار این لیزر با ارزش، امکان ساخت کامل آن در کشور وجود دارد [۲]. آینه‌های موجود در کاواک لیزر گاز کربنیک یکی از قسمت‌های مهم این لیزر بشمار می‌آید که باید علاوه بر بومی‌سازی، امکان تعمیر و فناوری ساخت آن را نیز در داخل کشور فراهم کرد. سطح این نوع آینه‌ها نسبت به کاربرد آن، به مرور زمان آسیب یافته و باید تعویض شوند. ساختار این نوع آینه‌ها چند لایه است و به مواردی چون؛ نوع، توان بازتاب، ضخامت، جنس لایه‌ها بستگی دارد. در برخی موارد توان بازتاب مورد نظر را می‌توان با ساختار یک لایه‌ای بدست آورد، اگرچه به دلیل آستانه آسیب پایین، برای لیزر پر قدرت گاز کربنیک مناسب نیستند [۳]. آینه‌هایی با ساختار فلزی مانند نقره، مس، طلا و آلومینیوم برای بهبود ویژگی‌های نوری ساخته شدند. این فلزات در مقیاس نانو دارای جذب نوری بسیار پایینی در محدوده مرئی و فروسرخ هستند [۴-۶].

آینه‌های فلزی از جنس نقره، که اغلب در لیزر نوار پهن استفاده می‌شود، بازتاب بالایی از ۵۰۰ - ۸۰۰ نانومتر دارند. آینه‌های فلزی از جنس طلا برای کاربردهای در طول موج ۷۵۰ - ۱۵۰۰ نانومتر ایده‌آل هستند [۷، ۸]. در برخی موارد پوشش بازتابی این آینه‌ها شامل نقره، طلا یا دی‌الکتریک است [۹، ۱۰]. آینه‌هایی با لایه‌نشانی دی‌الکتریک به منظور ارائه بازتاب بهینه در طول موج‌های لیزری مورد نظر به کار می‌روند. همچنین تحقیقات زیادی در زمینه طراحی و ساخت آینه‌های تمام بازتاب در محدوده‌های تابشی مختلف انجام شده است [۱۱-۱۴].

آینه‌های تمام بازتاب در محدوده طول موج فروسرخ، با لایه‌نشانی فلز، دی‌الکتریک و شبه فلز به صورت (شیشه/فلز/دی‌الکتریک/شبه فلز/هوا)^۳ یا به اختصار (M/D/Q) ساخته می‌شوند. با تغییر

¹ Near Infra-Red (NIR)

² Longwave Infra-Red (LWIR)

³ Glass/Metal/Dielectric/Quasi metal/Air



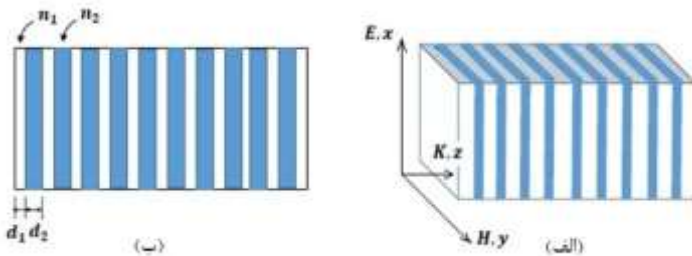
نوع و ضخامت هر یک از لایه‌ها (فلز، دی‌الکتریک و شبه‌فلز) می‌توان تغییرات پاسخ نوری بازتاب را تغییر داد [۱۵، ۱۶]. همچنین تغییر زاویه تابش در آینه‌های تمام‌بازتاب در محدوده طول‌موج فروسرخ بر ویژگی‌های اپتیکی آینه از جمله درصد بازتاب موثر می‌باشد. در پژوهش حاضر ابتدا به بررسی پاسخ نوری آینه‌های تمام‌فلز، سپس آینه‌های فلز، دی‌الکتریک و در نهایت آینه‌هایی فلز، دی‌الکتریک، شبه‌فلز پرداخته شد که با استفاده از نرم‌افزار لایه‌نشانی مک- لثود^۱ شبیه‌سازی شده‌اند. در هر مرحله با تغییر نوع مواد لایه‌نشانی، مقایسه‌ای بین آن‌ها صورت گرفته، سپس تاثیر جنس لایه‌ها و بعد ضخامت لایه‌ها و در نهایت زاویه تابش در آینه‌های تمام‌بازتاب در بازه فروسرخ میانی بررسی شد.

۲. مبانی نظری

انتشار امواج الکترومغناطیسی از قطعه‌ای اپتیکی متشکل از لایه‌های متناوب از مواد شفاف با ضرایب شکست مختلف به شرح زیر است. سیستم به صورت متناوب در جهت محور Z و در صفحه $X-Y$ همگن است (شکل ۱). مشخص است که معادله هلمهولتز برای ترتیب متناوب یک فیلم چندلایه به صورت معادله (۱) است [۱۷]:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_r \mu_r \vec{E} = 0 \quad (1)$$

جایی که ϵ_r و μ_r به ترتیب گذردهی نسبی و نفوذپذیری محیط ۱ و ۲ هستند که $r = 1, 2$.



شکل ۱ (الف) شماتیک ساختار قطعه اپتیکی تک بعدی و (ب) نمای جانبی از ساختار قطعه اپتیکی.

¹ Macleod

فرض کنید موج الکترومغناطیسی در جهت Z پخش شود و جهت قطبش در امتداد محور X است. برای راحتی، میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی با یک تابع $E(z, x)$ به شرح معادله (۲) است:

$$E(z, x) = (A_j e^{ik_j z} + B_j e^{-ik_j z}) e^{i\beta x} \quad (2)$$

که در آن A_j و B_j به ترتیب ضرایب انعکاس و برخورد، $\beta = k_j = \frac{\omega}{c} n_j \cos \theta_j$ و $\frac{\omega}{c} n_j \sin \theta_j$ زاویه برخورد ($j = 1, 2$) هستند. k_1 و k_2 به ترتیب بردارهای موج در قطعه اپتیکی تشکیل شده هستند. در این حالت، بردار میدان مغناطیسی \vec{H} را می‌توان در امتداد محور X بدست آورد:

$$\vec{H} = i \frac{1}{\omega \mu} \vec{\nabla} \times \vec{E} \quad (3)$$

حل معادله (۱) ترکیب سطوح موجی است که از سمت چپ به سمت راست حرکت می‌کنند. یعنی برای لایه‌ای با شاخص n_1 سطوح موج سمت راست و چپ به ترتیب دامنه‌های A_1 و B_1 دارند. بنابراین، برای لایه متناوب محیطها با ضریب شکست n_1 و n_2 حل معادله (۲) به ترتیب به شرح زیر است:

$$E(z) = A_1 e^{ik_1 z} + B_1 e^{-ik_1 z} \quad (4)$$

$$E(z) = C_1 e^{ik_2(z-d_1)} + D_1 e^{-ik_2(z-d_1)} \quad (5)$$

اعداد موج k_1 و k_2 توسط $k_j = \frac{\omega}{c} n_j \cos \theta_j$ داده شده‌است که $j = 1, 2$ معادلات (۲) و (۳) در سطح تماس بین لایه‌ها پیوسته هستند ($z = d_1$). از این رو می‌توانیم بین دامنه امواج صفحه‌ای رابطه (۶) را بدست آوریم:

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ D_1 \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

با

$$M_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{k_1}{k_2} \right) e^{i\delta_1} & \frac{1}{2} \left(1 - \frac{k_1}{k_2} \right) e^{-i\delta_1} \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{k_1}{k_2} \right) e^{i\delta_1} & \frac{1}{2} \left(1 + \frac{k_1}{k_2} \right) e^{-i\delta_1} \end{pmatrix} \quad (7)$$

که $\delta_1 = \frac{\omega n_1 d_1}{c} \cos \theta_1$ و در مرز بین محیطها با لایه‌های متناوب با ضریب شکست n_1 و n_2 ($z=d$) می‌توان نوشت:



$$\begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix} = M_2 \begin{pmatrix} C_1 \\ D_1 \end{pmatrix} \quad (۸)$$

ماتریس M_2 همان ماتریس M_1 با تغییر اندیس‌ها است. با استفاده از معادلات ۷ و ۸، معادله ماتریس تبدیل را برای یک واحد داریم:

$$\begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix} = M_{i,j} \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} \quad (۹)$$

که اعضای ماتریس به صورت زیر هستند:

$$m_{11} = e^{i\delta_1} \left[\cos \delta_2 + \frac{1}{2} i \left(\eta + \frac{1}{\eta} \right) \sin \delta_2 \right] \quad (۱۰)$$

$$m_{12} = e^{-i\delta_1} \left[\cos \delta_2 + \frac{1}{2} i \left(\eta - \frac{1}{\eta} \right) \sin \delta_2 \right] \quad (۱۱)$$

با $\delta_1 = \frac{\omega n_1 d_1}{c} \cos \theta_1$ و $\delta_2 = \frac{\omega n_2 d_2}{c} \cos \theta_2$ ؛ $m_{12} = \bar{m}_{21}$ و $m_{22} = \bar{m}_{11}$ و

و همچنین $\eta = \frac{n_2 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2}$ برای مد TM و $\eta = \frac{n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_2}$ برای مد TE. برای تناوب شبکه‌ها

$\vec{E}(z, K) = u_K(z) e^{iK(\omega)z}$ که یک تابع تناوبی مختلط برای شبکه $u_K(z)$

است که $d = d_1 + d_2$ یک ضخامت متناوب از سلول واحد است که

با در نظر گرفتن ساختار تناوبی لایه‌ها، ضرایب جملات توسط ضرب ماتریس‌های تبدیل هر واحد بدست می‌آید:

$$\begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix} = (M_{i,j})_1 \times (M_{i,j})_2 \dots (M_{i,j})_N \begin{pmatrix} A_N \\ B_N \end{pmatrix} \quad (۱۲)$$

می‌توان ضریب بازتاب سیستم را با استفاده از رابطه (۱۳) بدست آورد.

$$r = \left(\frac{B_0}{A_0} \right)_{B_N=0} \quad (۱۳)$$

مقدار مطلق ضریب بازتاب $R = r^* r$ است.

بازتاب بالا در لایه‌های دی‌الکتريک می‌تواند از لایه‌نشانی چندین لایه ربع‌موج از مواد دی‌الکتريک با ضرایب شکست بالا و پایین که به صورت تناوبی در کنار هم قرار گرفته‌اند، بدست آید. ضرایب عبور و انتقال بر اساس فرمول‌های فرنل در محیط‌های دی‌الکتريک مقادیر متناهی و حقیقی دارند که با محاسبه آن‌ها (۲ و t) می‌توان انرژی عبوری و انعکاسی را بدست آورد. برای تابش عمودی داریم [۴]:

$$\mathfrak{R}_p = \mathfrak{R}_s = \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right|^2 \quad (14)$$

$$\mathfrak{T}_p = \mathfrak{T}_s = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (15)$$

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، مقادیر n_1 و n_2 ضرایب شکست نور در محیط‌های اولیه و ثانویه گذار پرتو نور می‌باشند. برای تابش غیر عمودی بدست می‌آید:

$$\mathfrak{R} = \frac{r_1^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\delta_1 + r_2^2}{1 + 2r_1 r_2 \cos 2\delta_1 + r_1^2 r_2^2} \quad (16)$$

$$\mathfrak{T} = \frac{n_2}{n_1} \times \frac{t_1^2 t_2^2}{1 + 2r_1 r_2 \cos 2\delta_1 + r_1^2 r_2^2} \quad (17)$$

$$\tan \Psi = \frac{-r_2(1-r_1^2) \sin 2\delta_1}{r_1(1+r_2^2) + r_2(1+r_1^2) \cos 2\delta_1} \quad (18)$$

$$\tan \gamma = \frac{-(1-r_1 r_2) \tan \delta_1}{1+r_1 r_2} \quad (19)$$

اندیس‌های ۱ و ۲ مربوط به محیط‌های اولیه و ثانویه گذار پرتو نور می‌باشند. کمیت δ فاز حرکت موج در محیط و کمیت‌های Ψ و γ به ترتیب اختلاف فاز انعکاس و عبور پرتو نور است. همچنین ضخامت تک لایه بر روی زیرلایه با رابطه (۲۰) بدست می‌آید [۱۸]:

$$d(r) = \lambda / 4\pi n_f \cos^{-1} \left\{ \frac{[1+r_1^2 r_2^2]R(r) - r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_2(1-R(r))} \right\} \quad (20)$$

که در آن $r_1 = (1 - n_f)/(1 + n_f)$ و $r_2 = (n_f - n_s)/(n_f + n_s)$ ضرایب فرنل می‌باشند و n_s ضریب شکست زیرلایه و n_f ضریب شکست لایه نازک است. این رابطه برای حالت چند لایه پیچیده‌تر می‌شود که می‌تواند از تئوری تداخل در ساختارهای فیلم نازک محاسبه شود [۱۹].

حال برای دو لایه فلز و دی‌الکتریک روی زیرلایه شیشه، نور از هوا ($n_1 = 1$) بر روی یک فیلم نازک با ضخامت h و ضریب شکست مختلط $\tilde{n}_2 = n_2 + ik_2$ که روی یک لایه فلزی با ضریب شکست مختلط n_3 انباشت شده است، برخورد می‌کند. ضریب بازتاب برای پلاریزاسیون S نوری فرودی با زاویه β با فرمول ۲۱ محاسبه می‌شود [۲۰]:

$$\tilde{r} = \frac{\tilde{r}_{12} + \tilde{r}_{23} e^{2i\beta}}{1 + \tilde{r}_{12} \tilde{r}_{23} e^{2i\beta}} \quad (21)$$

که در آن:



$$\tilde{t}_{mn} = \frac{\tilde{p}_m - \tilde{p}_n}{\tilde{p}_m + \tilde{p}_n} \quad (22)$$

و

$$\tilde{p}_m = \tilde{n}_m \cos \tilde{\theta}_m \quad (23)$$

$$\beta = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \tilde{n}_2 h \cos \tilde{\theta}_2 \quad (24)$$

$$\tilde{\theta}_m = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_1}{\tilde{n}_m} \right) \quad (25)$$

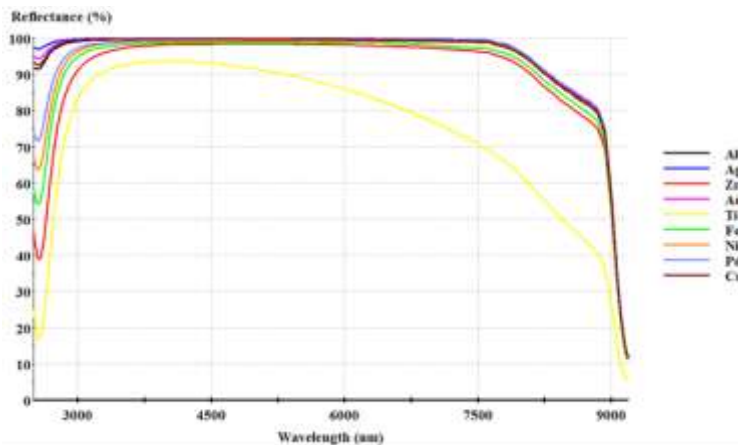
که شکل مختلط قانون اسنل است. برای پلاریزاسیون p نوری فرودی، مولفه \tilde{p}_m با \tilde{q}_m جایگزین می‌شود، که از فرمول (۲۶) بدست می‌آید:

$$\tilde{p}_m = \frac{\cos \tilde{\theta}_m}{\tilde{n}_m} \quad (26)$$

و در این‌جا نیز مانند روابط چند لایه دی‌الکتریک، بازتاب کل با رابطه $R = |\tilde{r}|^2$ مشخص می‌شود.

۳. تأثیر جنس لایه فلزی

ابتدا طراحی لایه‌نشانی فلزاتی چون آلومینیوم، نقره، زیرکونیوم، طلا، تیتانیم، آهن، نیکل، سرب و مس با ضخامت‌های یکسان (۱۰۰ نانومتر) روی زیرلایه شیشه انجام شد و درصد بازتاب در محدوده ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ نانومتر با هم مقایسه شد (شکل ۲).



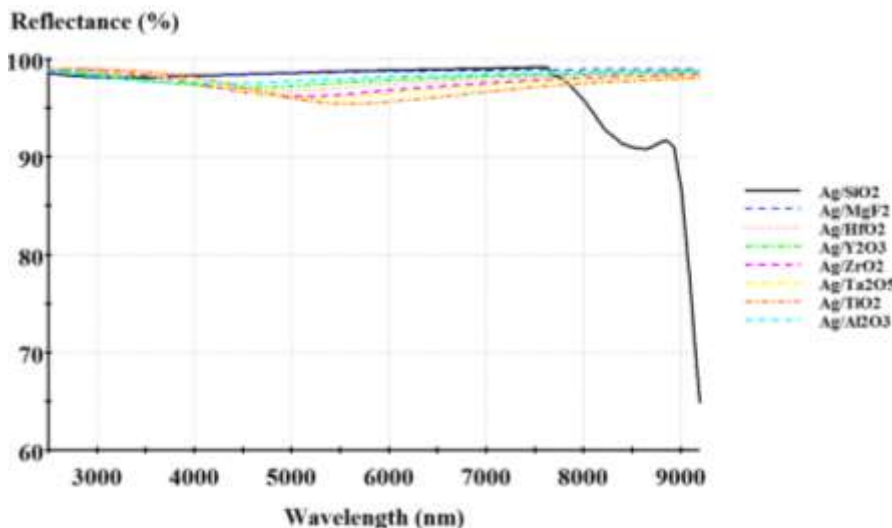
شکل ۲ نمودار درصد بازتاب بر حسب طول‌موج برای طراحی لایه‌نشانی (شیشه/ فلز/ هوا) با فلزات مختلف در بازه ۲۵۰۰ تا ۹۵۰۰ نانومتر.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود فلز نقره (Ag) نسبت به دیگر فلزات، دارای بیشترین درصد بازتاب در بازه ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ نانومتر می‌باشد، در حالی که فلز تیتانیوم (Ti)، در این بازه دارای کمترین درصد بازتاب می‌باشد. درصد بازتاب برای چهار فلز آلومینیوم (Al)، نقره (Ag)، طلا (Au) و مس (Cu) از باقی فلزات بیشتر است. در بازه ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ نانومتر، متوسط درصد بازتاب طراحی لایه‌نشانی (شیشه/ فلز/ هوا) برای فلز آلومینیوم، نقره، طلا و مس به ترتیب ۹۹/۶۴، ۹۹/۸۷، ۹۹/۷۸ و ۹۹/۷۱ درصد است. بنابراین فلز نقره دارای بالاترین مقدار درصد بازتاب برای طراحی لایه‌نشانی بالا است.

۴. تأثیر جنس لایه دی‌الکتریک

به دلیل استفاده از دی‌الکتریک در طراحی لایه‌نشانی آینه فروسرخ، ابتدا مقایسه‌ای از درصد بازتاب لایه‌نشانی دی‌الکتریک‌های مختلف به ترتیب، دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2)، فلورید منیزیم (MgF_2)، دی‌اکسید هافنیم (HfO_2) و اکسید یوتریم (Y_2O_3) با ضخامت‌های یکسان (۵۰۰ نانومتر) روی زیرلایه شیشه برحسب طول موج در بازه ۷۵۰ تا ۹۰۰۰ نانومتر انجام شد. ملاحظه شد که درصد بازتاب برای دی‌الکتریک‌های بالا کم و بیش یکسان می‌باشد. بر روی لایه فلز، از یک نوع دی‌الکتریک به عنوان لایه محافظ استفاده می‌شود، دی‌الکتریک‌های مورد استفاده دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2)، فلورید منیزیم (MgF_2)، دی‌اکسید هافنیم (HfO_2)، اکسید یوتریم (Y_2O_3)، دی‌اکسید زیرکونیم (ZrO_2)، اکسید تانتالیم (Ta_2O_5)، دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) و اکسید آلومینیم (Al_2O_3) می‌باشند. در نمودار شکل (۳)، درصد بازتاب طراحی لایه‌نشانی (شیشه/ نقره/ دی‌الکتریک/ هوا) برحسب طول موج در بازه ۲۵۰۰ تا ۹۵۰۰ نانومتر برای دی‌الکتریک‌های مختلف نشان داده شده است. بیشترین درصد بازتاب مربوط به لایه‌نشانی (شیشه/ نقره/ فلورید منیزیم/ هوا) با بازتاب ۹۸/۳۱ درصد است. در طراحی بالا، ضخامت نقره ۱۰۰ نانومتر و ضخامت لایه دی‌الکتریک ۵۰۰ نانومتر در نظر گرفته شد.



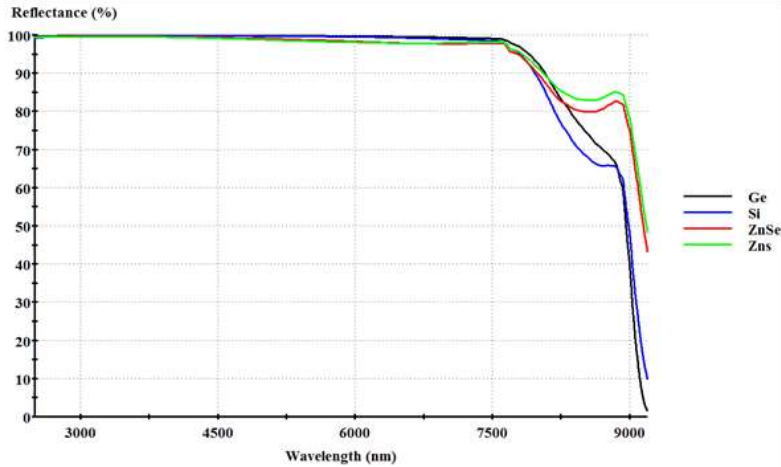


شکل ۳ نمودار درصد بازتاب بر حسب طول‌موج برای طراحی لایه‌نشانی (شیشه / نقره / دی‌الکتریک / هوا)، با دی-الکتریک‌های مختلف در بازه ۲۵۰۰ تا ۹۵۰۰ نانومتر.

۵. تأثیر جنس لایه شبه‌فلز

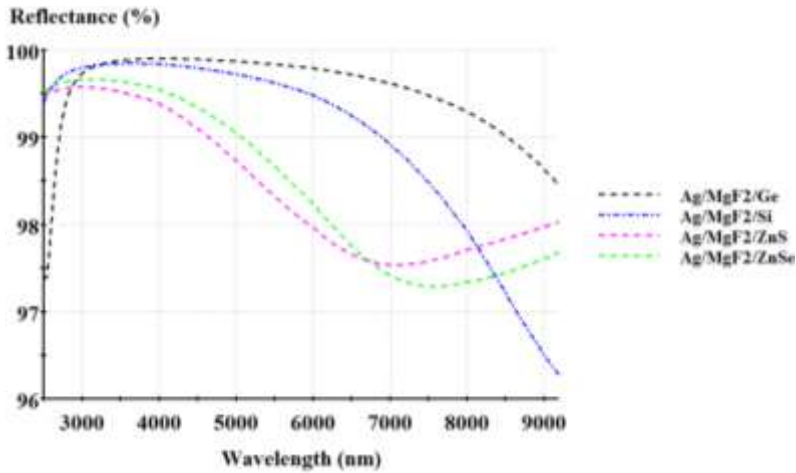
به این دلیل که با افزودن لایه محافظ درصد بازتاب کم می‌شود برای افزایش درصد بازتاب نیاز به یک لایه شبه‌فلز به عنوان لایه سوم، داریم. از آنجاییکه شبه‌فلزاتی چون ژرمانیم (Ge)، سیلیکون (Si)، سلناید روی (ZnSe) و سولفید روی (ZnS) در بازه فروسرخ دارای بازتاب بالا می‌باشند، این شبه‌فلزات در طراحی لایه‌نشانی (شیشه / نقره / فلورید منیزیم / شبه‌فلز / هوا) انتخاب شدند. در این طراحی ضخامت نقره ۱۰۰ نانومتر و ضخامت لایه فلورید منیزیم ۵۰۰ نانومتر و ضخامت لایه شبه‌فلز ۱۵۰ نانومتر در نظر گرفته شد.

در نمودار شکل (۴)، درصد بازتاب لایه‌نشانی شبه‌فلزات ژرمانیم، سیلیکون، سلناید روی و سولفید روی بر حسب طول‌موج در بازه ۲۵۰۰ تا ۹۵۰۰ نانومتر رسم شده است. در این نمودار ژرمانیم با بیشینه متوسط درصد بازتاب ۹۹/۸۸ درصد، سیلیکون ۹۹/۸۱ درصد، سلناید روی ۹۹/۴۷ درصد و سولفید روی با ۹۹/۲۹ درصد در بازه ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ نانومتر نشان داده شده که لایه‌نشانی شبه‌فلز ژرمانیم دارای بیشترین درصد بازتاب است.



شکل ۴ نمودار درصد بازتاب بر حسب طول موج برای شبه فلزات مختلف در بازه ۲۵۰۰ تا ۹۵۰۰ نانومتر.

در نمودار شکل (۵)، بیشترین درصد بازتاب برای ترکیب آینه فروسرخ (شیشه / نقره / فلورید منیزیم / ژرمانیوم / هوا) در بازه ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ نانومتر، ۹۹/۸۷ درصد می باشد. از این رو انتخاب این ترکیب برای آینه فروسرخ در این بازه، مطلوب است.



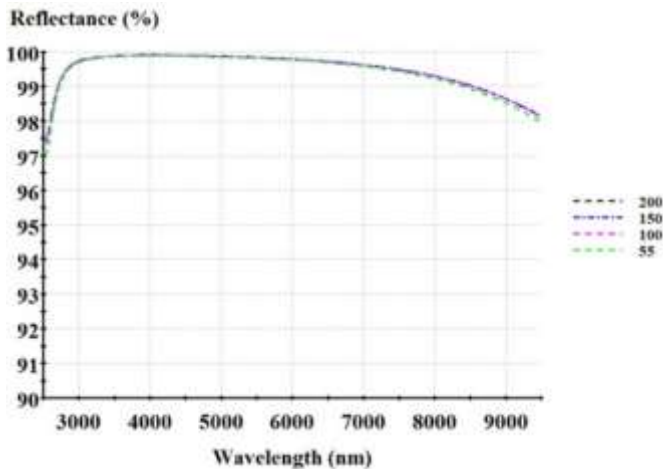
شکل ۵ نمودار درصد بازتاب بر حسب طول موج برای طراحی لایه نشانی (شیشه / نقره / فلورید منیزیم / شبه فلز / هوا) با شبه فلزات مختلف در بازه ۲۵۰۰ تا ۹۵۰۰ نانومتر.

۶. تأثیر ضخامت لایه‌ها در آینه‌های تمام بازتاب

پس از انتخاب نوع لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها اهمیت دارد، چرا که علاوه بر حفظ درصد بازتاب بالا، جذب پایین نیز مورد توجه می باشد. از این رو در این بخش، با انتخاب نوع ترکیب برای آینه

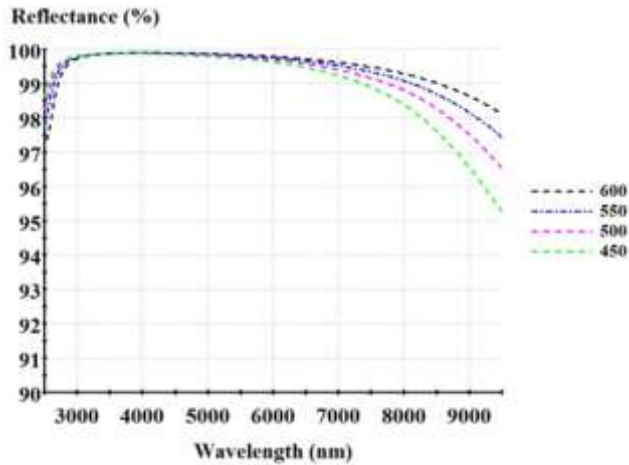


فروسرخ، به تاثیر ضخامت لایه‌ها می‌پردازیم. در شکل (۶)، درصد بازتاب آینه فروسرخ انتخابی فلز، دی‌الکتریک و شبه‌فلز در بازه ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ نانومتر، به ازای ضخامت‌های مختلف، ۱۵۰، ۲۰۰، ۵۵ و ۱۰۰ نانومتر برای فلز نقره (Ag) به ترتیب ۹۹/۸۷، ۹۹/۸۷، ۹۹/۸۷ و ۹۹/۸۶ درصد را نشان می‌دهد. به این دلیل که ضخامت‌های ۱۵۰، ۲۰۰ و ۱۰۰ نانومتر برای فلز نقره دارای درصد بازتاب میانگین یکسان هستند، برای کمتر شدن درصد جذب، پایین‌ترین ضخامت یعنی ۱۰۰ نانومتر را در نظر می‌گیریم.



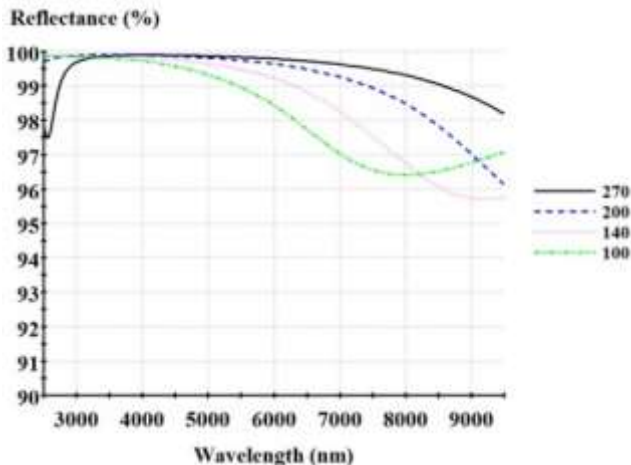
شکل ۶ نمودار درصد بازتاب بر حسب طول‌موج برای ترکیب آینه فروسرخ با ضخامت‌های مختلف فلز نقره در بازه ۲۵۰۰ تا ۹۵۰۰ نانومتر.

در شکل (۷)، آینه فروسرخ انتخابی فلز، دی‌الکتریک و شبه‌فلز با ضخامت‌های مختلف دی‌الکتریک MgF_2 گزارش شده است. متوسط درصد بازتاب در بازه ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ نانومتر، به ازای ضخامت‌های مختلف ۶۰۰، ۵۵۰، ۵۰۰ و ۴۵۰ نانومتر برای MgF_2 به ترتیب ۹۹/۸۶، ۹۹/۸۷، ۹۹/۸۷ و ۹۹/۸۵ درصد را نشان داد. از این رو، برای MgF_2 ضخامت ۵۵۰ نانومتر را در نظر می‌گیریم.



شکل ۷ نمودار درصد بازتاب بر حسب طول موج برای ترکیب آینه فرسرخ با ضخامت‌های مختلف MgF_2 در بازه ۲۵۰۰ تا ۹۵۰۰ نانومتر.

در نمودار شکل (۸)، متوسط درصد بازتاب در بازه ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ نانومتر، به ازای ضخامت‌های مختلف، ۲۷۰، ۲۰۰، ۱۴۰ و ۱۰۰ نانومتر برای ژرمانیوم به ترتیب ۹۹/۸۶۹، ۹۹/۸۷۹، ۹۹/۸۱۷ و ۹۹/۶۸۳ درصد را نشان می‌دهد. در نتیجه بالاترین درصد بازتاب متوسط برای ضخامت ۲۰۰ نانومتر است.



شکل ۸ نمودار درصد بازتاب آینه فرسرخ بر حسب طول موج در بازه ۲۵۰۰ تا ۹۵۰۰ نانومتر با ضخامت‌های مختلف شبه فلز ژرمانیم.

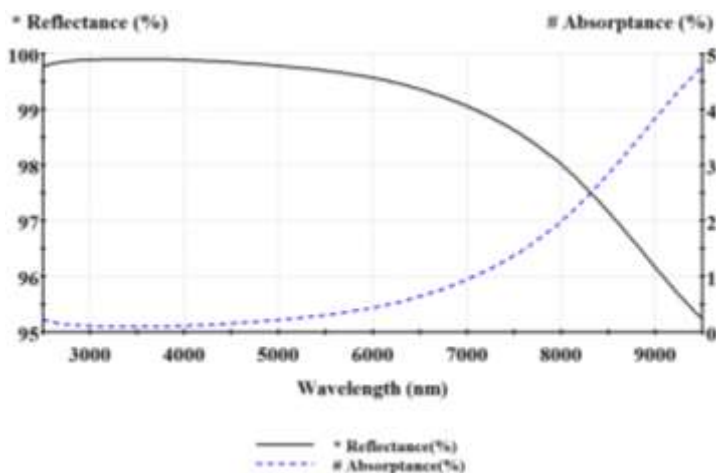


بهینه‌سازی ضخامت لایه‌ها بر اساس نمودارهای (۶) الی (۸) برپایه جدول (۱) است.

جدول ۱ نوع و ضخامت لایه‌ها در ترکیب آینه فروسرخ (شیشه/ فلز/ دی‌الکتریک/ شبه فلز/ هوا).

| ردیف | نوع لایه | ضخامت (نانومتر) |
|------|---------------|-----------------|
| ۱ | هوا | - |
| ۲ | نقره | ۱۰۰ |
| ۳ | فلورید منیزیم | ۵۵۰ |
| ۴ | ژرمانیم | ۲۰۰ |
| ۵ | زیرلایه | - |

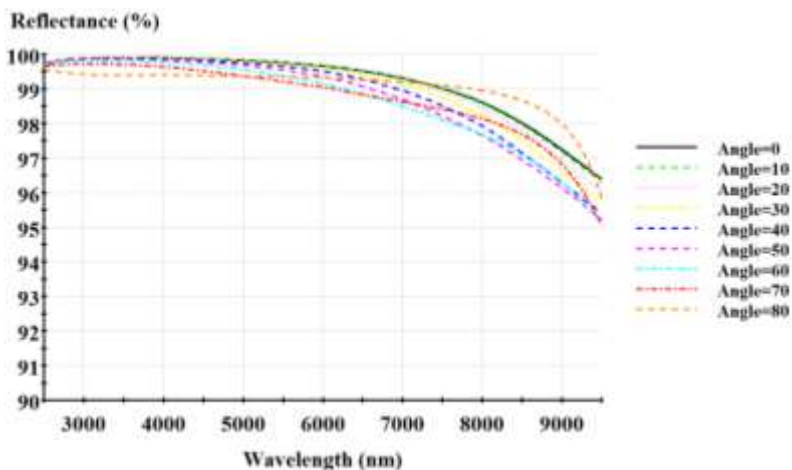
در نمودار شکل (۹)، درصد بازتاب و جذب ترکیب انتخابی بالا برای آینه فروسرخ در بازه ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ نانومتر رسم شده است، که درصد بازتاب و جذب به ترتیب برابر با ۹۹/۸۷۹ و ۰/۱۲ است.



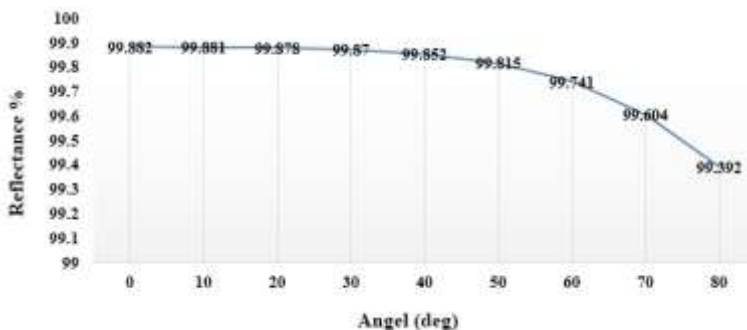
شکل ۹ نمودار درصد بازتاب و جذب ترکیب انتخابی آینه فروسرخ بر حسب طول موج در بازه ۲۵۰۰ تا ۹۵۰۰ نانومتر.

۷. تأثیر زاویه تابش در آینه‌های تمام‌بازتاب

شکل (۱۰)، درصد بازتاب آینه فروسرخ انتخابی فلز، دی‌الکتریک و شبه‌فلز بر حسب زاویه‌های تابش مختلف نشان می‌دهد. متوسط بیشترین درصد بازتاب آینه فروسرخ به ازای زوایای تابش مختلف در بازه ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ نانومتر در نمودار شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۰ نمودار درصد بازتاب آینه فرورسرخ در بازه ۲۵۰۰ تا ۹۵۰۰ نانومتر برای زوایای تابش مختلف.



شکل ۱۱ نمودار متوسط بیشترین درصد بازتاب آینه فرورسرخ به ازای زوایای تابش مختلف.

نمودار شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان می‌دهد که آینه فرورسرخ طراحی شده (شیشه / نقره / فلورید منیزیم / ژرمانیوم / هوا) برای زاویه تابش صفر و نزدیک آن بالاترین درصد بازتاب را دارد.

۸. نتیجه گیری

برای بهینه‌سازی ساختار آینه‌های تمام‌بازتاب فرورسرخ به صورت (شیشه / فلز / دی الکتریک / شبه فلز / هوا) به طور جداگانه طراحی لایه‌نشانی با نرم افزار مک‌لئود شبیه‌سازی شد و لایه‌نشانی آینه تمام‌بازتاب برای هر یک از لایه‌های فلزی، دی الکتریک و شبه فلز با مواد مختلف بررسی شد. ابتدا لایه‌های فلزی مختلف آلومینیوم، نقره، زیرکونیوم، طلا، تیتانیوم، آهن، نیکل، سرب و مس در نظر



گرفته شد. فلز نقره با بازتاب ۹۹/۸۷ درصد در ساختار (شیشه/ فلز/ هوا) بالاترین میزان بازتاب را داشت. سپس پاسخ نوری دی‌الکتریک‌های مختلف دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2)، فلورید منیزیم (MgF_2)، دی‌اکسید هافنیوم (HfO_2)، اکسید یوتریم (Y_2O_3)، دی‌اکسید زیرکونیم (ZrO_2)، اکسید تانتالیم (Ta_2O_5)، دی‌اکسید تیتانیم (TiO_2) و اکسید آلومینیم (Al_2O_3) بررسی شد. منیزیم فلوراید با بازتاب ۹۸/۳۱ درصد در ساختار (شیشه/ نقره/ فلورید منیزیم/ هوا) بالاترین میزان بازتاب را نشان داد. در نهایت شبه فلزات مختلف ژرمانیم (Ge)، سیلیکون (Si)، سلناید روی (ZnSe) و سولفید روی (ZnS) مورد بررسی قرار گرفت که شبه فلز ژرمانیم با بازتاب ۹۹/۸۸ درصد در ساختار (شیشه/ نقره/ فلورید منیزیم/ ژرمانیم/ هوا) بیشترین بازتاب را داشت. سپس با تغییر ضخامت هر یک از لایه‌ها، ضخامت بهینه برای نقره، منیزیم فلوراید و ژرمانیم به ترتیب ۱۰۰، ۵۵۰ و ۲۰۰ نانومتر تعیین شد. با بررسی تاثیر زاویه تابش، ملاحظه گردید که متوسط بیشترین درصد بازتاب مربوط به زاویه صفر و ۹۹/۸۸ درصد می‌باشد.

منابع

- [1] Rahlmlow T.D., Lazo-Wasema J.E., Wilkinson S., and Tinkerc F., Dual band antireflection coatings for the infrared, *Proc. of SPIE*, 6940, 69400T-1, 2008.
- [2] Endo M., and Walter R.F., *Gas lasers*, 1st ed., CRC Press, 2006.
- [3] Ichikawa Y., Yoshida K., Tsunawaki Y., Yamanaka M., Yamanaka T., Yamanaka C., Okamoto H., Matsuo N., and Kitajima K., Highly damage-resistant Mo mirror for high-power TEA CO2 laser systems, *Applied optics*, 26, 3671-3675, 1987.
- [4] Chou C.H., Lin Y.T., Shinde S., Huang C.E., Wu T.C., Lin K.M., and Hsiao W.T., The development of a monitoring system for analyzing factors affecting film thickness in a sputtering process, *Modern Physics Letters B*, 34(07n09), 2040021, 2020.
- [5] Sinha M.K., Mukherjee S.K., Pathak B., Paul R.K., and Barhai P.K., Effect of deposition process parameters on resistivity of metal and alloy films deposited using anodic vacuum arc technique, *Thin Solid Films*, 515(4), 1753-1757, 2006.
- [6] Leftheriotis G., Papaefthimiou S., and Yianoulis P., Development of multilayer transparent conductive coatings, *Solid State Ionics*, 136, 655-661. 2000.
- [7] Gheshlaghi M., Maleki, M.H., Shafaei, S.R., and Hojjati rad, H., Study of laminated materials in the process of making gold interior mirrors, *The Second National Vacuum Conference of Iran*, 2007. (In Persian)
- [8] Gheshlaghi M.; Haririan Z., Maleki, M.H., and Hojjati rad, H., Optimization of gold reflectors on glass and quartz substrates and study of changes in its reflection in different angles of radiation, *15th Iranian Optics and Photonics Conference*, 2008. (In Persian)
- [9] Li Q., Wei C., Chi H., Zhou L., Zhang H., Huang H., and Liu Y., *Au Nano cages saturable absorber for 3- μm mid-infrared pulsed fiber laser with a wide wavelength tuning range*, *Optics Express*, pp.30350-30359, 2019.
- [10] Bedford R., and fallahi M., Analysis of high-reflectivity metal-dielectric mirrors for edge-emitting lasers, *Optics Letters*, 29(9):1010-2, 2004.
- [11] Habel F., *Advanced dispersive mirrors for ultrashort laser pulses from the near-UV to the mid-IR spectral range*, München, den 15. 11. 2016



- [12] Wang Z., Cheng Y., Nie Y., Wang X., and Gong R., Design and realization of one-dimensional double hetero-structure photonic crystals for infrared-radar stealth-compatible materials applications, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 116, 054905, 2014.
- [13] Mao Q., Feng C., Yang Y., and Tan Y., Design of broadband metamaterial nearperfect absorbers in visible region based on stacked metal-dielectric gratings, *Mater. Res. Exp.*, 5, 6, 065801, 2018.
- [14] Gheshlaghi M., and Davoodi S., Design of Selective Low Emission Infrared Spectrum Layer Design, *13th Dense Matter Conference*, 2016 . (In Persian)
- [15] Jon Nesari M., Zablian H., Firoozifar S.A., Mardiha M., and Ghaneie H., Design and fabrication of infrared mirrors with a combination of metal and all-dielectric thin-layer mirrors, *20th Iranian Optics and Photonics Conference*, 2013. (In Persian)
- [16] Gheshlaghi M., and Davoodi S., Study of the effect of layer thickness and radiation angle on all-infrared mirrors, *9th National Vacuum Conference of Iran*, 1398. (In Persian)
- [17] Wang Z., Cheng Y., Nie Y., Wang X., and Gong R., Design and realization of one-dimensional double hetero-structure photonic crystals for infrared-radar stealth-compatible materials applications, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 116, 054905, 2014.
- [18] Emiliani G., Piegari A., De Silvestri S., Laporta P., and Magni V., Optical coatings with variable reflectance for laser mirrors, *Applied optics*, 28, 14, 1989.
- [19] Vidal B., Fournier A., and Pelletier E., Optical Monitoring of non-quarter wave Multilayer Filters, *Appl. Opt.*, 17, 1038-1047, 1978.
- [20] Born M., and Wolf E., *Principles of Optics*, 7th ed., Cambridge Uni. Press, 2003.

© 2020 Alzahra University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

