بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

شبیه‌سازی سامانه اپتیکی شامل لایه جاذب نانومتری با ضخامت متغیر و بهینه‌سازی آن به روش محاسباتی مونت کارلو

نجات عثمانی، مرتضی حاجی محمودزاده، حمیدرضا فلاح

گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان

چکیده - در این مقاله یک نرم‌افزار، برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی یک سامانه‌ی اپتیکی شامل لایه جاذب طراحی شده‌است. این نرم-افزار، با گرفتن اطلاعات توسط کاربر، بازتاب، تراگسیل و جذب را براساس روش ماتریسی، برای قطبش Sو P محاسبه می‌کند و سپس با استفاده از روش مونت کارلو، ضخامت لایه‌ها را بهینه‌سازی می‌کند. هدف از این بهینه‌سازی، پیدا کردن ضخامت مناسب برای لایه‌های مختلف یک سامانه‌ی لایه نازک است به طوری که با تغییر ضخامت در محدوده رواداری، بازتاب، تراگسیل و جذب علاوه بر بیشینه شدن، دچار تغییرات زیادی نشود. قبلا مشابه این نرم‌افزار فقط برای لایه‌های عایق طراحی شده‌است.

کلید واژه- بهینه سازی، روش ماتریسی، روش مونت کارلو، لایه جاذب، نرم‌افزار.

Simulation of optical systems including absorber layers with variable thickness and their optimization using Monte Carlo method

Nejat osmani, Morteza Haji Mahmoodzadeh, Hamid Reza Fallah

Department of physics of Isfahan university

Abstract- In this paper, a computer code for simulation and optimization of thin film optical systems including absorbing layers is presented. Transmittance, reflectance and absorption are calculated in this code using matrix method for S and P polarizations. Then these characteristics are optimized using the layers with thickness variables with Monte Carlo method.

Keywords: absorbing layers, matrix method, Monte Carlo, optimization, software.

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

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

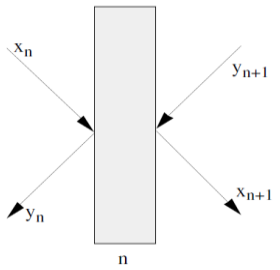
۱- مقدمه

منظور از لایه نازک، بُره‌ای از مواد است که ضخامت یک بعد از آن، خیلی کوچکتر از دو بعد دیگر است. ضخامت لایه‌ها، یکی از پارامترهایی است که نقش مهمی در خصوصیات لایه نازک دارد. برای بهینه‌سازی عملکرد مجموعه لایه‌ها، بایستی ضخامت بهینه‌ی هر لایه به طور جداگانه محاسبه شود. در عمل پیدا کردن ضخامت و تعداد لایه‌ها به طوری که هدف مورد نظر را برآورده کند، نیازمند طراحی و شبیه‌سازی پیچیده است. از آنجایی که لایه‌نشانی فرآیندی طولانی و پرهزینه است، داشتن یک نرم‌افزار شبیه‌سازی که بتواند طراحی مناسبی از نوع لایه-ها و ضخامت آنها ارائه کند بسیار مفید خواهد بود. یکی از رهیافت‌هایی که ما را به داشتن نرم‌افزار مناسب رهنمون می‌کند، روش مونت کارلو است. در این روش ضخامت لایه‌ها به صورت کاتوره‌ای و با تابع توزیع مناسب انتخاب شده و پیکربندی جدید مجموعه را می‌سازد. قبلاً از این روش، برای بهینه‌سازی یک سامانه‌ی اپتیکی، که تنها شامل لایه‌های دی‌الکتریک می‌باشد، استفاده شده است[۱]. در بسیاری از سامانه‌های لایه نازک، استفاده از لایه‌های جاذب ضروری است و بنابراین هدف ما، در این کار، اضافه کردن قابلیت شبیه‌سازی و بهینه‌سازی لایه‌های جاذب، در این برنامه محاسباتی است.

نور فرودی در مرز، به سه بخش، نور بازتابی، عبوری و جذب شده تقسیم می‌شود. با توجه به معادلات ماکسول و شرایط مرزی، برای هر مرز می‌توان روابط فرنل را برای امواج بازتابی وعبوری بدست آورد. در انجام محاسبات، از روش ماتریسی استفاده می‌شود. از مزیت‌های روش ماتریسی، انجام سریع‌تر و آسان‌تر محاسبات می‌باشد. پس از طراحی پوشش چندلایه‌ای، که شامل محاسبه‌ی ثابت-های اپتیکی، تعیین طول موج نور فرودی و زاویه‌ی تابش، تعیین ضخامت هر یک از لایه‌ها است، با استفاده از روش ماتریسی می‌توان، توان‌های بازتاب، تراگسیل و جذب‌شده، پوشش تک لایه‌ای یا چند لایه‌ای را بدست آورد. لازم به ذکر است که در تمام این پژوهش، نور فرودی همدوس فرض شده‌است.

۲- بررسی سامانه‌ی اپتیکی چند لایه‌ای شامل لایه جاذب

فرض می‌کنیم که N لایه بین دو محیط دی‌الکتریک (محیط فرودی و بستره) قرار گرفته باشند. که در این صورت $N+2$ محیط خواهیم داشت. با توجه به شکل(۱)، درسطح سمت چپ لایه‌ی n ام، دو موج فرودی و بازتابی داریم که دامنه‌های آنها با نماد های x_n و y_n نمایش داده می‌شود و دو موج فرودی و بازتابی درسطح سمت راست سطح این لایه داریم که دامنه‌ی آنها با نمادهای x_{n+1} و y_{n+1} نمایش داده می‌شود.



شکل۱- امواج بازتابی و عبوری در دو سمت سطح لایه n ام

دامنه‌ی امواج دوطرف لایه را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی زیر به هم ربط داد [۲]:

$$\begin{pmatrix} x_n \\ y_n \end{pmatrix} = \tilde{M}_n \begin{pmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \end{pmatrix} \quad ;$$

$$\tilde{M}_n = \frac{1}{t_{n-1,n}} \begin{pmatrix} e^{-i\delta_n} & r_{n-1,n} e^{+i\delta_n} \\ r_{n-1,n} e^{-i\delta_n} & e^{+i\delta_n} \end{pmatrix} \qquad (۱)$$

در رابطه‌ی بالا، $\tilde{M}_n$ ماتریس مربوط به لایه‌ی n ام می-باشد. پس برای سامانه‌ی شامل N لایه خواهیم داشت:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \tilde{M} . \frac{1}{t_{N,N+1}} \begin{pmatrix} 1 & r_{N,N+1} \\ r_{N,N+1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{N+1} \\ y_{N+1} \end{pmatrix}$$

$$= \tilde{M} \begin{pmatrix} x_{N+1} \\ y_{N+1} \end{pmatrix} \; ; \; \tilde{M} = \tilde{M}_1 . \tilde{M}_2 \ldots \tilde{M}_n \ldots \tilde{M}_N$$

(۲)

در این رابطه، $\frac{1}{t_{N,N+1}} \begin{pmatrix} 1 & r_{N,N+1} \\ r_{N,N+1} & 1 \end{pmatrix}$ مربوط

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

به لایه‌ی N+1ام می‌باشد.

برای بدست آوردن ضرایب بازتاب و تراگسیل، باید توجه داشت که در محیط N+۱ نور فقط از سمت چپ به راست حرکت می‌کند و نور فرودی به آن سطح لایه وجود ندارد و در نتیجه $y_{n+1}=0$. بنابراین خواهیم داشت:

$$x_1 = M_{11}x_{N+1} + M_{12}y_{N+1} = M_{11}x_{N+1} \qquad (۳)$$

$$y_1 = M_{21}x_{N+1} + M_{22}y_{N+1} = M_{21}x_{N+1} \qquad (۴)$$

$$t = \frac{x_{N+1}}{x_1} = \frac{1}{M_{11}} \quad ; \quad r = \frac{y_1}{x_1} = \frac{M_{21}}{M_{11}} \qquad (۵)$$

توان‌های بازتاب، تراگسیل و جذب شده به سادگی از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$Tp = |t|^2 \frac{n_1 \cos\theta_3}{n_3 \cos\theta_1} \; ; \; Ts = |t|^2 \frac{n_3 \cos\theta_3}{n_1 \cos\theta_1} \qquad (۶)$$

$$R = |r|^2 \quad ; \quad A = 1 - R - T \qquad (۷)$$

در رابطه‌ی(۶) اندیس‌های s وp به ترتیب مربوط به نور با قطبشs و p می‌باشند.

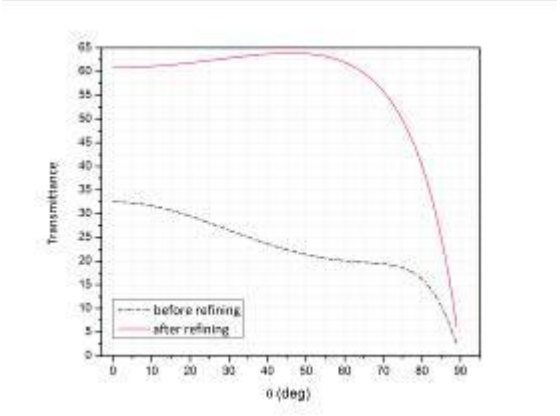
۲-۱- نتایج شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سامانه‌ی اپتیکی چند لایه‌ای شامل لایه جاذب

به منظور مقایسه نتایج نرم‌افزار طراحی شده، برای قبل و بعد از بهینه‌سازی، به دلخواه یک سامانه‌ی اپتیکی پنج لایه‌ای شامل لایه جاذب طراحی کرده‌ایم. در این سامانه محیط فرودی و بستره به ترتیب هوا و $Bk7$ فرض شده است.

این سامانه، شامل لایه‌های MgF_2، ZnS و لایه جاذب AL و با ترتیب زیر، شبیه‌سازی شده است:

$Air/\ MgF_2\ /\mathrm{ZnS}/\ MgF_2\ /\mathrm{AL}/\ MgF_2\ /Bk7$

با هدف، افزایش تراگسیل سامانه، بهینه‌سازی صورت گرفته‌است. شکل(۲)، منحنی تراگسیل، قبل و بعد از بهینه‌سازی را برحسب محدوده‌ی زاویه‌ی تابش نور فرودی با طول موج ۵۰۰(nm) نشان می‌دهد و در جدول(۱) ضخامت لایه‌های این سامانه، قبل و بعد از بهینه‌سازی مربوط به منحنی‌های این شکل، آمده است.



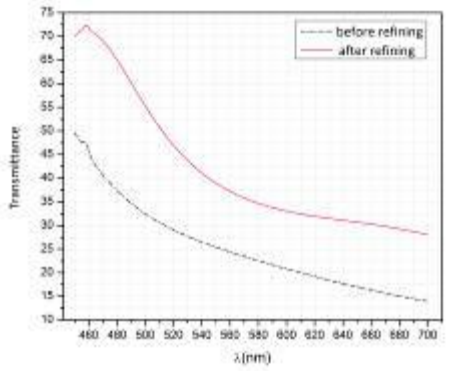
شکل۲- منحنی تراگسیل قبل و بعد از بهینه‌سازی سامانه پنج لایه‌ای برحسب محدوده‌ی زاویه‌ی تابش نور فرودی با طول موج ۵۰۰(nm)

جدول۱- ضخامت‌های قبل و بعد از بهینه‌سازی سامانه پنج لایه‌ای مربوط به منحنی‌های شکل(۲)

شماره لایه	ضخامت قبل از بهینه‌سازی برحسب (nm)	ضخامت بعداز بهینه‌سازی برحسب (nm)
لایه اول	۱۰۶/۹۲	۱۰
لایه دوم	۶۲/۲۴	۱۲۸/۴۲
لایه سوم	۱۰۶/۹۲	۱۶/۶۲
لایه چهارم	۵	۵
لایه پنجم	۱۰۶/۹۲	۵۳/۲۳

همچنین، برای این سامانه، بهینه‌سازی را می‌توان به منظور افزایش تراگسیل، برای محدوده‌ی طول موجی انجام داد. در شکل(۳) منحنی تراگسیل این سامانه را، برای قبل و بعد از بهینه‌سازی برحسب محدوده‌ی طول موجی۴۵۰(nm) تا ۷۰۰(nm) نور فرودی با زاویه‌ی تابش صفر درجه نشان می‌دهد و در جدول(۲)، ضخامت لایه‌ها این سامانه، برای قبل و بعد از بهینه‌سازی مربوط به این منحنی‌ها، آمده است.

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



شکل۳- منحنی تراگسیل قبل و بعد از بهینه‌سازی سامانه پنج لایه‌ای بر حسب محدوده‌ی طول موج نور فرودی با زاویه‌ی تابش صفر درجه

جدول۲- ضخامت‌های قبل و بعد از بهینه‌سازی سامانه پنج لایه‌ای مربوط به منحنی‌های شکل(۳)

شماره لایه	ضخامت قبل از بهینه‌سازی برحسب (nm)	ضخامت بعداز بهینه‌سازی برحسب (nm)
لایه اول	۱۰۶/۹۲	۱۷۰/۸۲
لایه دوم	۶۲/۲۴	۱۶/۶۷
لایه سوم	۱۰۶/۹۲	۱۸۱/۰۵
لایه چهارم	۵	۵
لایه پنجم	۱۰۶/۹۲	۱۶۹/۶۵

۳- بحث و نتیجه‌گیری کلی

برای سامانه‌ی پنج لایه‌ای مشاهده کردیم که با بهینه-سازی ضخامت می‌توان تراگسیل سامانه را به مقدار قابل توجه‌ای افزایش داد. بهینه‌سازی را می‌توان برای افزایش بازتاب یا جذب نیز انجام داد. در صورتی که زاویه‌ی تابش نور فرودی مایل باشد، باید قطبش نور را هم در نظر گرفت و می توان برای هر قطبش شبیه‌سازی و بهینه-سازی را انجام داد. به عبارت دیگر، در عمل به علت خطای موجود در آزمایشگاه، لایه‌نشانی با ضخامت دقیق بسیار سخت است. به همین دلیل نرم‌افزار طراحی کردیم که با استفاد از روش مونت کارلو و محاسبه تابع شایستگی، ضخامت بهینه برای سامانه‌ی اپتیکی چندلایه-ای شامل لایه‌های جاذب را به گونه‌ای محاسبه کند که با تغییر ضخامت در محدوده‌ی رواداری، مقدار تابع شایستگی بیشینه شود، به گونه‌ای که اگر ضخامت هر لایه در طراحی کمی تغییر کند، تابع شایستگی دچارتغییرات زیادی نشود.

سپاسگزاری

مولفین از تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان به خاطر حمایت‌هایشان قدردانی می‌نمایند.

مراجع

[۱] آزاده مجیدی نژاد، مرتضی حاجی محمودزاده، حمیدرضا فلاح، روش مونت کارلو در طراحی قطبنده لایه نازک در طول موج ۱۵۴۰ نانومتر و مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی، **هجدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران به همراه چهارمین کنفرانس مهندسی فوتونیک ایران**، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۰

[۲] Sernelius, BoE, *Surface Modes in Physic* ,Berlin, Wiley-VCH, ۲۰۰۱.

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