بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

مطالعه پوشش ضد بازتاب نور ناهمدوس با احتساب افت و خیز ضخامت لایه

سید عدنان مرعشی، مسعود رضوانی جلال*، علی‌رضا عبدی کیان

گروه فیزیک و فوتونیک، دانشگاه ملایر، ملایر (*rezvanijalal@malayeru.ac.ir)

چکیده -در این مقاله، بازتاب یک پوشش ضد بازتاب برای وقتی که ضخامت پوشش دارای افت و خیز باشد و نور فرودی به آن نیز ناهمدوس در نظر گرفته شود مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. برای یافتن بازتاب، از تکنیک ماتریس انتقال اپتیکی استفاده می‌گردد. یک کد محاسباتی به زبان متمتیکا نوشته می‌شود که بتواند مقدار بازتاب را در حضور افت و خیز ضخامت لایه و طول دلخواهی از همدوسی نور پیدا کند. از نتایج محاسبات چنین بر می‌آید که وارد شدن هر مقدار افت و خیز در ضخامت و یا ناهمدوسی در نور باعث می‌شود که کمترین میزان بازتاب صفر نباشد. از طرف دیگر، محاسبات نشان می‌دهند که کمترین مقدار بازتاب در ضریب شکستی از پوشش رخ می‌دهد که قدری از رابطه آشنای $n_c=(n_s n_m)^{1/2}$ متفاوت می‌باشد که در آن n_s و n_m به ترتیب ضریب شکست زیرلایه و محیط بالای پوشش هستند و n_c هم ضریب شکست پوشش می‌باشد.

کلید واژه- افت و خیز ضخامت، پوشش ضد بازتاب، نور ناهمدوس.

Study of Anti-reflection Coating for Incoherent Light Taking into Account the Thickness Fluctuation of the Layer

Seyed Adnan Marashi, Masoud Rezvani Jalal*, Alireza Abdikian

Department of Physics and Photonics, Malayer University, Malayer
(rezvanijalal@malayeru.ac.ir*)

Abstract- In this paper, the reflection of an anti-reflection coating is calculated for the case where the coating has thickness fluctuation and the light is considered to be incoherent. To find the reflection, the technique of optical transfer matrix is used. A computational code in Mathematica language is written to find the reflection value in the presence of arbitrary thickness fluctuation and coherence length. It is found from the computation results that inclusion of any value of fluctuation or coherence causes the minimum reflection to be no longer zero. On the other hand, the calculations show that the minimum value of reflection occurs at a refractive index that is rather different from the familiar $n_c=(n_s n_m)^{1/2}$ relation, where n_s and n_m are refractive indices of substrate and upper medium, respectively, and n_c is refractive index of the coating.

Keywords: Anti-reflection coating, Incoherent light, Thickness fluctuation.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

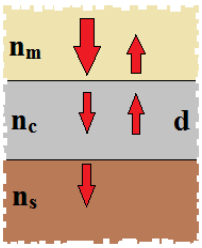
مقدمه

پوشش ضدبازتاب استفاده زیادی در کاهش میزان بازتاب از سطح عدسی‌ها، شیشه‌های عینک، سلول‌های خورشیدی و ... دارد [۱و۲]. این پوشش‌ها بر اساس خاصیت موجی نور کار می‌کنند و با تشکیل تداخل ویرانگر بین پرتوهای بازتابی از سطوح بالایی و پایینی پوشش، باعث حذف (یا کاهش) بازتاب می‌شوند. انواع مختلفی از این پوشش‌ها قابل طراحی هستند که ساده‌ترین آنها یک تک‌لایه نازک با ضخامت اپتیکی $\lambda/4$ (یا مضارب فردی از آن) است که برای حذف بازتاب از سطوح تخت کاربرد دارد. البته چنین پوششی فقط در یک طول‌موج جواب می‌دهد و فرمول‌بندی آن نیز بر فرض همدوسی کامل نور فرودی و همچنین ثابت بودن ضخامت لایه استوار است. طبق این نظریه، اگر پوششی به ضخامت اپتیکی $\lambda/4$ روی ماده تختی با ضریب شکست n_s کشیده شود و محیط بالای پوشش نیز دارای ضریب شکست n_m باشد آنگاه اگر ضریب شکست پوشش $n_c=(n_s n_m)^{1/2}$ باشد هیچ بازتابی رخ نخواهد داد. البته ممکن است ماده‌ای با چنین ضریب‌شکستی وجود نداشته باشد که در این صورت باید به پوشش ضدبازتاب چندلایه‌ای که آزادی عمل خیلی بیشتری برای طراحی دارد روی آورد [۳].

در واقعیت فیزیکی، هیچ منبع نوری دارای همدوسی کامل نیست و حتی بعضی از آنها دارای همدوسی بسیار ضعیفی هستند (مثلاً طول همدوسی نور خورشید کمتر از ۳۰ μm است [۴]). از طرف دیگر، این امکان هم وجود دارد که پوشش ساخته شده دارای افت‌وخیز ضخامتی باشد. هر دوی این موارد حتماً باید در طراحی یک پوشش ضدبازتابِ بهینه لحاظ گردند که گزارشی از انجام چنین کاری در مراجع دیده نمی‌شود. البته استفاده از نانوفناوری که با الگودهی مناسبِ سطوح و ایجاد تغییرات نانومتری در ضخامت لایه‌ها درصدد کاهش بازتاب و افزایش بازدهی است مد نظر نمی‌باشد [۵]. نویسندگان مقاله حاضر، در کار قبلی خود به اثر افت‌وخیز ضخامت روی بازتاب و عبور نور از لایه‌های نازک پرداختند [۶]. در پژوهش کنونی به اثر ناهمدوسی نور و تغییرات ضخامت پوشش بر بازتاب آن پرداخته می‌شود.

فرمول‌بندی استفاده شده در محاسبات

برای بررسی بازتاب از لایه‌ای به ضخامت d و ضریب شکست n_c که روی زیرلایه‌ای با ضریب شکست n_s واقع است و بالای آن نیز محیط n_m قرار دارد استفاده از ماتریس انتقال ساده‌ترین روش می‌باشد [۷]. در این روش، به هر فرایند اپتیکی اعمّ از انتشار نور یا اعمال شرایط مرزی در سطوح مشترک یک ماتریس ۲×۲ تعلق می‌گیرد. طرح‌واره عبور و بازتاب از پوشش مذکور در شکل ۱ نشان داده شده است:



شکل ۱: طرح‌واره‌ای از پوشش با ضریب شکست n_c و ضخامت d بین زیرلایه با ضریب شکست n_s و محیط بالای آن با ضریب شکست n_m که نوری از سمت بالا بر آن فرود می آید.

طبق شکل ۱، سه فرایند در این مسئله قابل تفکیک هستند که شامل یک شرط مرزی در سطح مشترک بین n_m و n_c، یک رفت و برگشت نور در n_c به طول d و یک شرط مرزی دیگر در سطح مشترک بین n_c و n_s می‌باشند. ماتریس انتقال هر کدام از این موارد به صورت زیر هستند [۷]:

$$A_{n_m\to n_c}=\frac{1}{2n_c}\begin{bmatrix} n_c+n_m & n_c-n_m \\ n_c-n_m & n_c+n_m \end{bmatrix} \quad (۱)$$

$$A_{n_c}=\begin{bmatrix} e^{-ikn_c d} & 0 \\ 0 & e^{ikn_c d} \end{bmatrix}$$

$$A_{n_c\to n_s}=\frac{1}{2n_s}\begin{bmatrix} n_m+n_c & n_m-n_c \\ n_m+n_c & n_m+n_c \end{bmatrix}$$

حاصل‌ضرب این سه ماتریس از آخر به اول هم ماتریس انتقال کل را به دست می‌دهد:

$$A=A_{n_c\to n_s}A_{n_c}A_{n_m\to n_c} \quad (۲)$$

با داشتن ماتریس انتقال کل می‌توان ماتریس پراکندگی را به دست آورد و ضرایب بازتاب و عبور r و t را از آن استخراج کرد. این ضرایب به شکل زیر می‌باشند [۷]:

$$\begin{cases} t=A_{11}-A_{12}A_{21}/A_{22} \\ r=-A_{21}/A_{22} \end{cases} \quad (۳)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

مقادیر r و t در حالت کلی به ضرایب شکست n_m، n_c و n_s، ضخامت پوشش d و عد موج $k=2\pi/\lambda$ بستگی دارند. از آنجا که هدف مقاله، مطالعه اثر ناهمدوسی نور فرودی و افت‌وخیز ضخامت پوشش است پس ضرایب شکست n_m و n_s جزء ثوابت مسئله هستند و مطالعه فقط بر روی مشخصات پوشش (مخصوصاً n_c) انجام می‌پذیرد.

برای چگالی طیفی میدان الکتریکی نور ناهمدوس از مدل قطار موج محدود به شکل زیر استفاده می‌شود [۴]:

$$E(\lambda)=E_0 Sinc[L\pi(1/\lambda-1/\lambda_0)] \qquad (۴)$$

که در آن L طول همدوسی و λ_0 نیز طول‌موج نور می‌باشد. برای احتساب افت‌وخیز ضخامت، بازه کوچکی به اندازه δ لحاظ می‌گردد تا توزیع ضخامت پوشش به شکل زیر باشد:

$$d_0-\delta/2<d<d_0+\delta/2 \qquad (۵)$$

دامنه تغییرات δ یک کمیت اختیاری است ولی دارای شرط $\delta<<d_0$ است. مقدار d_0 هم با یک فرض مناسب می‌تواند به صورت مضارب فردی از $\lambda_0/(4n_{c0})$ انتخاب شود که در آن $n_{c0}=(n_s n_m)^{1/2}$ می‌باشد.

در انجام محاسبات، برای ضریب شکست‌های مختلفی از پوشش (حول n_{c0})، طول‌موجی از توزیع (۴) و ضخامتی از توزیع (۵) انتخاب می‌گردد و ضریب بازتاب شدت (یعنی $R=r^2$) به دست می‌آید و در نهایت نیز میانگین آن روی همه ضخامت‌ها و طول‌موج‌ها گرفته می‌شود. با ترسیم $<R(n_c)>_{\lambda,d}$ ضریب شکست بازتاب کمینه پیدا می‌گردد.

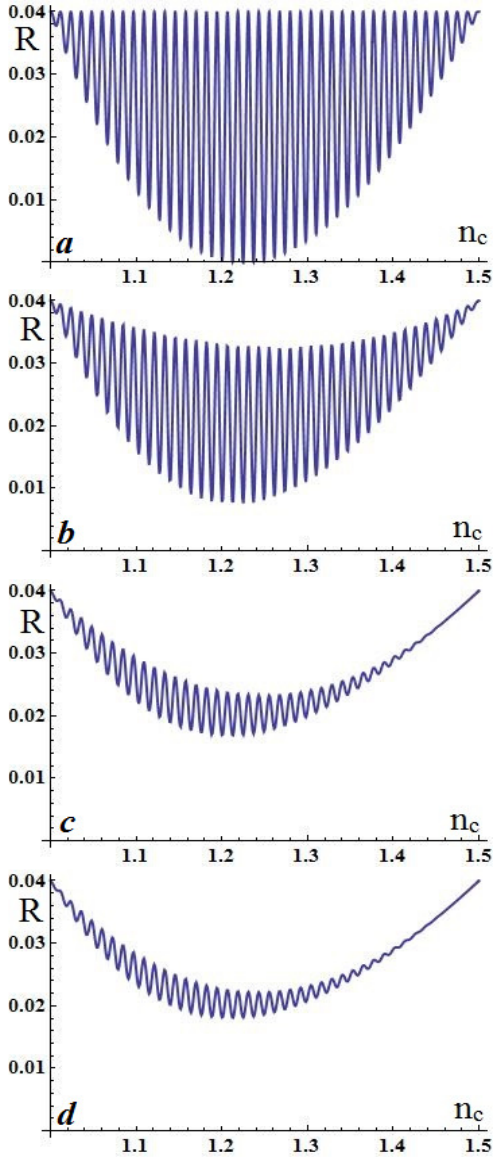
برای انجام محاسبات، برنامه‌ای در محیط *Mathematica* توسط نویسندگان مقاله نوشته شده که با دریافت مشخصات پوشش، زیرلایه، محیط و ویژگی‌های نور ناهمدوس، ماتریس انتقال کل را تشکیل می‌دهد و ضریب بازتاب $<R(n_c)>_{\lambda,d}$ را محاسبه کرده و ترسیم می‌کند.

انجام محاسبات و بررسی نتایج

فرض می‌شود که زیرلایه دارای $n_s=1/5$ و محیط پیرامون نیز $n_m=1$ باشد. ضریب شکست پوشش هم یک کمیت متغیر بین n_m و n_s لحاظ می‌گردد. طول موج نور فرودی $\lambda_0=0/5\ \mu m$ و طول همدوسی آن هم $L=60\ \mu m$ انتخاب می‌شود. ضخامت متوسط پوشش نیز $d_0=20/51\ \mu m$ (یعنی $\lambda_0/(4n_{c0})$ ۲۰۱) لحاظ می‌گردد. افت‌وخیز ضخامت هم به اندازه دلخواه $\delta=0/005d_0$ در نظر گرفته می‌شود. ضریب بازتاب R به ازای ضریب شکست‌های مختلف پوشش با کُدی که توسط نویسندگان مقاله طراحی شده است محاسبه می‌گردد. در شکل ۲ نمودار ضریب بازتاب برحسب n_c برای پوششی با ضخامت ثابت و نور همدوس؛ پوششی با افت‌وخیز ضخامت ولی نور همدوس؛ پوششی بدون افت‌وخیز ضخامت ولی نور ناهمدوس؛ و همچنین پوششی با افت‌وخیز ضخامت و نور ناهمدوس نشان داده شده است.

از این شکل معلوم است که ضریب بازتاب در پوششی که بدون افت‌وخیز ضخامتی و در حضور نور همدوس باشد (شکل ۲-a) یک رفتار تناوبی بر حسب ضریب شکست دارد که حاکی از رفتار کاملاً موجی است [۵]. بیشینه بازتاب دارای مقدار ۴ درصد است و کمترین مقدار آن نیز صفر می‌باشد. این مقدار کمینه در $n_c=1/225$ رخ می‌دهد که دقیقاً همان مقدار $n_c=(n_s n_m)^{1/2}$ می‌باشد که برای پوشش ضد بازتاب استفاده می‌گردد. وقتی هم که افت‌وخیز ضخامت برای پوشش لحاظ شود (شکل ۲-b) با تغییر ضریب شکست لایه، باز هم رفتار تناوبی حضور دارد با این تفاوت که بیشینه بازتاب کاهش یافته است ولی کمینه آن افزایش یافته است. واضح است که در این حالت، دیگر به ازای هیچ مقدار n_c بازتاب $R=0$ وجود ندارد. کمترین مقدار بازتاب نیز باز در $n_c=1/225$ اتفاق می‌افتد. وقتی هم که ضخامت لایه ثابت باشد ولی نور دارای ناهمدوسی باشد (شکل ۲-c) باز هم رفتاری مشابه با حالت‌های قبل دیده می‌شود که البته میزان خاصیت موجی بازتاب کاهش بیشتری پیدا کرده است. در این حالت، کمترین بازتاب در $n_c=1/213$ می‌باشد که اندکی نسبت به دو حالت قبلی کاهش پیدا کرده است. در حالتی که هم افت‌وخیز ضخامتی باشد و هم ناهمدوسی نور (شکل ۲-d)، حذف اثرات موجی بیشتر شده و کمترین بازتاب در $n_c=1/213$ به وقوع می‌پیوندد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]



شکل ۲: ضریب بازتاب پوشش ضدبازتاب بر حسب ضریب شکست آن با ضخامت ثابت پوشش و نور همدوس (*a*)؛ با افت‌وخیز ضخامتی پوشش ولی نور همدوس (*b*)؛ با ضخامت ثابت پوشش ولی نور ناهمدوس (*c*)، و افت‌وخیز ضخامتی به همراه نور ناهمدوس (*d*).

بررسی‌های بیشتر (که در اینجا آورده نشده است ولی از روند تغییرات شکل ۲ قابل پیش‌بینی است) نشان می‌دهند که با افزایش افت‌وخیز ضخامت و ناهمدوسی نور، رفتار موجی کاملاً از بین می‌رود و یک منحنی صاف که دارای کمترین بازتاب در n_c=۱٫۲۳۳ است حاصل می‌شود. این تغییرات اندک در ضریب شکست پوشش ضدبازتاب نسبت به رابطه نظری $n_{c0}=(n_s n_m)^{1/2}$ را می‌توان ناشی از پهنای طیفی نور ناهمدوس و ضخامت اپتیکی مؤثر (که دیگر قادر به برقراری شرط تداخل ویرانگر کامل نیست) دانست.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، میزان بازتاب برای وقتی که پوشش ضدبازتاب دارای افت‌وخیز ضخامتی و نور فرودی نیز ناهمدوس باشد مورد بررسی قرار گرفت. معلوم شد که با اعمال افت‌وخیز ضخامت و ناهمدوسی نور، رفتار تناوبی بازتاب بر حسب n_c کاهش می‌یابد که نشانگر تضعیف اثرات موجی است. از طرف دیگر، در حضور این عوامل، کمترین مقدار بازتاب به ازای هیچ ضریب شکستی نمی‌تواند صفر باشد. کمینه بازتاب هم در ضریب شکست‌های مختلفی رخ می‌دهد که اندکی با مقدار $n_c=(n_s n_m)^{1/2}$ تفاوت دارد. یافته‌های این مقاله می‌تواند در طراحی لایه‌های ضدبازتاب مخصوصاً سلول‌های خورشیدی و ادوات فوتوولتائی مفید باشد.

مرجع‌ها

[1] H. K. Raut et al, "Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review", Energy Environ. Sci., 4 3779, 2011.

[2] Y. F. Makableh et al, "Design and Optimization of the Antireflective Coating Properties of Silicon Solar Cells by Using Response Surface Methodology", Coatings, 11, 721, 2021.

[3] H. A. Macleod, *Thin-film optical filters*, p.105, CRC press, Taylor and Francis group, 2010.

[4] S. Divitt et al, "Spatial coherence of sunlight and its implications for light management in photovoltaics", Optica, 2(2), 95-103, 2015.

[5] A. Abass et al, "Modeling combined coherent and incoherent scattering structures for light trapping in solar cells", J. Appl. Phys., 114, 033101, 2013.

[۶] مرعشی، سید عدنان؛ رضوانی جلال، مسعود؛ عبدی کیان، علیرضا، "شبیه سازی بازتاب و عبور نور از لایه های اپتیکی همدوس، همدوس جزئی و ناهمدوس"، *کنفرانس فیزیک ایران*، دانشگاه رازی، ۱۳۹۹.

[۷] صالح، بهاء، *مبانی فوتونیک*، ترجمه: محمدصادق ابریشمیان، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۳.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]