

بررسی اثر سرمایه‌شعشعی و بازتابنده براگ

سید حسین حسینی بیوکی و مجید بدیعی رستمی*

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران

پست الکترونیکی: * mbadiei@ut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰)

چکیده

ساختارهای سرمایه‌شعشعی با کم کردن جذب انرژی‌های شعشعی از محیط پیرامون و ساطع کردن حداکثری انرژی شعشعی خود ساختار، می‌تواند به دمایی زیر دمای محیط برسد. این ساختارها به علت آن که بدون صرف انرژی اضافی می‌توانند از مصرف انرژی برق سامانه‌های سرمایه‌شعی بکاهد، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. برای دستیابی به این هدف، نیاز به طراحی یک ساختار با خواص الکترومغناطیسی ویژه از نقطه نظر میزان جذب و میزان عبور نور داریم. ساختار مورد نظر باید همزمان شرایط (۱) بازتابش خوب در مقابل امواج خورشیدی و (۲) گسیل (جذب) خوب در پنجره انتقال اتمسفر را داشته باشد. این مقاله ضمن بررسی این شرایط، ابتدا برای تحقق شرط گسیل، ماده فوتورزیست SU-8 را پیشنهاد کرده و برای تحقق شرط بازتابش امواج خورشیدی، ساختار براگ را بررسی و تحلیل کرده است.

واژه‌های کلیدی: سرمایه‌شعشعی، بازتابنده براگ، ماتریس انتقال

۱. مقدمه

است [۱]، با انتشار مقاله [۲] در سال ۲۰۱۳، مجدداً در کانون توجه قرار گرفت و پس از آن ساختارهای سرمایه‌شعی متنوعی در پژوهش‌ها ارائه شد [۳-۵].

هر جسم دارای اثر سرمایه‌شعی باید همزمان دو ویژگی داشته باشد: (۱) ضریب بازتاب بالا در برابر امواج خورشید (طول موج ۰/۳ الی ۳ میکرومتر) و (۲) ضریب گسیل بالا در محدوده طول موج پنجره انتقال اتمسفر (۸ الی ۱۳ میکرومتر). هر جسمی با داشتن دو خاصیت مذکور، می‌تواند به صورت غیرفعال به دمایی کمتر از دمای همان جسم بدون دو خاصیت مذکور، برسد که این امر می‌تواند منجر به کاهش مصرف انرژی در فصول گرم سال شود. در ادامه، به بررسی فیزیکی پدیده

مبادله حرارت یک جسم با محیط پیرامون به سه شیوه همرفتی، رسانشی و شعشعی امکان پذیر است. در دو شیوه نخست، انتقال حرارت با اختلاف دمای جسم و محیط متناسب است، درحالی که انتقال حرارت به روش شعشعی، طبق قانون استیفن-بولتزمن، با اختلاف توان چهارم دمای دو جسم رابطه دارد که این بیانگر اهمیت انتقال حرارت شعشعی است. سرمایه‌شعی پدیده‌ای غیرفعال است که در آن جسم حرارت اضافی خود را از طریق شعشع به محیط بیرون خود می‌تبلاند. این پدیده گرچه از مدت‌ها قبل مورد بررسی بوده

$$P_{am}(T_{am}) = A \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} d\theta \sin\theta \cos\theta \quad (5)$$

$$\int_0^{\infty} d\lambda I_{BB}(T_{amb}, \lambda) \varepsilon_{am}(\lambda, \theta, \varphi) \varepsilon(\lambda, \theta, \varphi),$$

حاصل می‌شود. در این رابطه، $\varepsilon_{am}(\lambda, \theta, \varphi)$ ضریب گسیل اتمسفر است که با توجه به ناچیز فرض کردن ضریب بازتاب، می‌توان آن را از تفاضل عدد یک از ضریب عبور، به دست آورد. ضریب عبور اتمسفر در نقاط مختلف کره زمین را می‌توان با محاسبه گرهای استاندارد (مانند ATRAN) به دست آورد [۷].

تبادل غیر تشعشعی جسم (همرفتی و رسانشی) در رابطه (۱) با $P_{non-rad}$ نمایش داده شده است و از رابطه

$$P_{non-rad} = Ah(T - T_{amb}), \quad (6)$$

به دست می‌آید که در آن h ضریب عبور حرارت غیر تشعشعی است. اگر P_{net} عددی منفی باشد به معنی آن است که جسم از محیط اطراف انرژی دریافت می‌کند و باعث افزایش دمای جسم می‌شود. اگر P_{net} عددی مثبت باشد، جسم انرژی از دست می‌دهد و دمای آن کاهش می‌یابد که به این پدیده اصطلاحاً سرمایه‌ش تشعشعی گفته می‌شود. برای نشان دادن امکان سرمایه‌ش تشعشعی، رابطه (۱) را برای سه جسم فرضی محاسبه می‌کنیم. شکل ۱ الف نمودار طیف ضریب گسیل این سه جسم را در همه جهات نشان می‌دهد. با فرض ضریب عبور صفر، ضرایب گسیل برای اجسام مذکور مطابق آنچه بیان شد، به دست می‌آید. مطابق روابط (۱) تا (۶)، P_{net} برای این سه جسم در نرم‌افزار متلب محاسبه شده و در شکل ۱ ب بر حسب دما (T) نمایش داده شده است. محل برخورد منحنی P_{net} با صفر، نمایانگر دمای تعادل ساختار است که در جدول ۱ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که هرچه ضریب بازتاب جسم در محدوده امواج خورشیدی بیشتر باشد، حرارت کمتری جذب ساختار شده و در نتیجه دمای تعادل جسم کمتر می‌شود. این نشان می‌دهد که اگر سطحی با بازتابش بالا (در محدوده امواج خورشیدی) روی جسمی قرار دهیم، می‌تواند باعث کاهش دمای آن جسم شود. لازم به ذکر است در محاسبه P_{net} فرض شده است که تبادل حرارتی غیر تشعشعی ناچیز است ($h=0$) و

سرمایش تشعشعی پرداخته و ساختار مورد نظر را از این منظر بررسی می‌کنیم.

۲. امکان پدیده سرمایه‌ش تشعشعی

هر جسم در دمای T و با ضریب گسیل $\varepsilon(\lambda, \theta, \varphi)$ با محیط پیرامون خود، شامل اتمسفر با دمای T_{amb} و خورشید، در طول موج λ و در جهت (θ, φ) تبادل حرارت می‌کند. براینکه این مبادلات را توان خالص نامیده (P_{net}) که از رابطه

$$P_{net}(T) = P_{rad}(T) - P_{Sun} - P_{am}(T_{amb}) - P_{non-rad}, \quad (1)$$

به دست می‌آید. در این رابطه، P_{rad} توانی است که از جسمی با مساحت A و دمای T در فضای نیم کره بالاسر و در تمام طول موج‌ها تشعشع می‌شود و از رابطه

$$P_{rad}(T) = A \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} d\theta \sin\theta \cos\theta \int_0^{\infty} d\lambda I_{BB}(T, \lambda) \varepsilon(\lambda, \theta, \varphi), \quad (2)$$

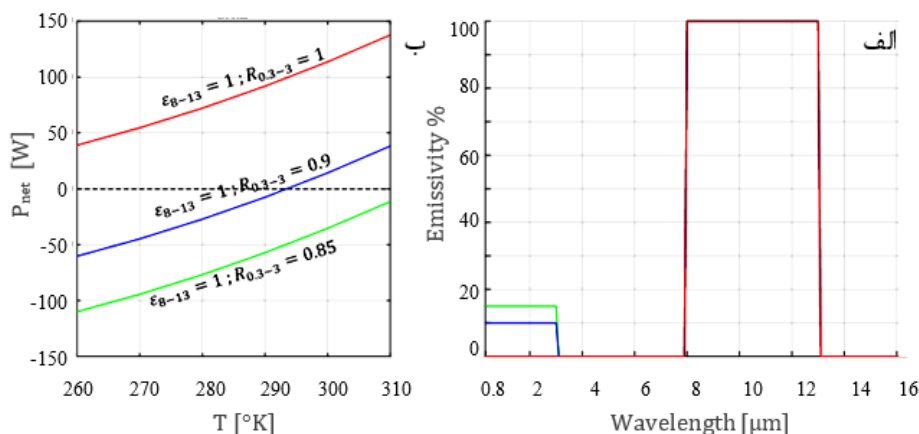
به دست می‌آید که در آن $I_{BB}(T, \lambda)$ توانی است که از یک جسم سیاه در دمای T و طول موج λ ساطع می‌شود و از قانون پلانک یعنی

$$I_{BB}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}, \quad (3)$$

محاسبه می‌شود [۲]. لازم به ذکر است h ثابت پلانک، k_B ثابت بولتزمن و c سرعت نور در محیط است. گفتنی است که ضریب گسیل جسم سیاه برابریک در همه جهات و همه طول موج‌ها است و این جسم فرضی، معیاری برای سنجش ضریب گسیل اجسام دیگر است. در رابطه (۱)، P_{Sun} توانی است که از خورشید به جسم می‌رسد و از رابطه

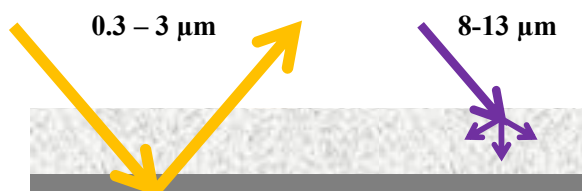
$$P_{Sun} = A \int_0^{\infty} d\lambda I_{AM1.5}(\lambda) \varepsilon(\lambda, \theta, \varphi), \quad (4)$$

به دست می‌آید که در آن $I_{AM1.5}(\lambda)$ طیف تشعشع دریافتی خورشید طبق داده‌های استاندارد است [۲ و ۶]. در رابطه (۱)، توانی که از ذرات اتمسفر با دمای T_{amb} به جسم می‌رسد با $P_{am}(T_{amb})$ نشان داده می‌شود و از رابطه



شکل ۱. (الف) ضریب گسیل سه ساختار فرضی با بازتاب 100% ، 90% و 85% در بازه امواج با طول موج 0.3 الی 3 میکرومتر و ضریب گسیل 100% در طول موج 8 الی 13 میکرومتر و (ب) توان خالص سه ساختار ارائه شده در نمودار الف فرض شده است که گرمای غیر تشعشی صفر است ($h = 0$). توجه شود که محل تلاقی توان سرمایشی با خط چین صفر، دمای تعادل را به دست می دهد (دمای محیط ثابت و برابر 300 کلوین است).

جدول ۱. مقایسه دمای تعادل سه ساختار فرضی شکل ۱.



شکل ۲. ساختار سرمایش تشعشی چندلایه.

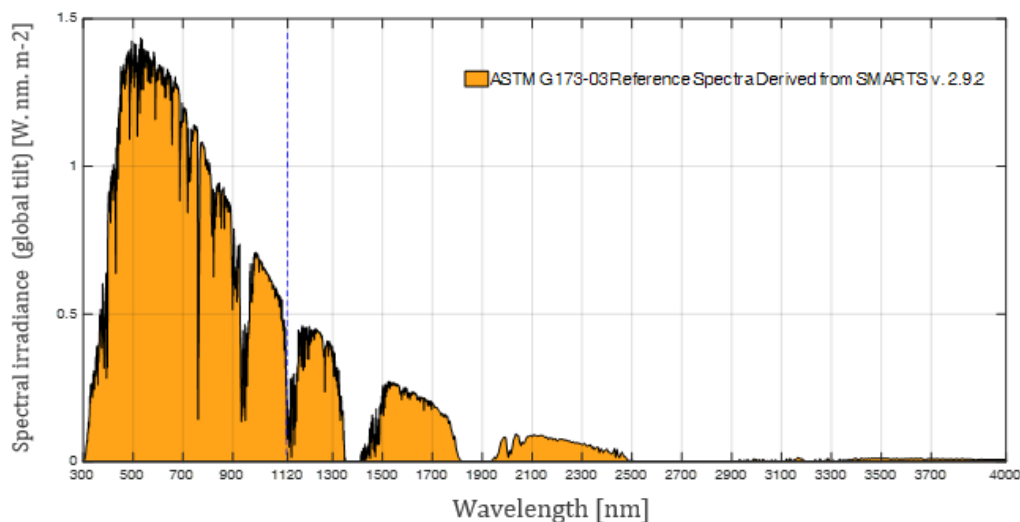
شرایط ساختار فرضی	دمای تعادل (کلوین)
$\epsilon_{8-13} = 1; R_{0.3-3} = 1$	کمتر از 260
$\epsilon_{8-13} = 1; R_{0.3-3} = 0.9$	293
$\epsilon_{8-13} = 1; R_{0.3-3} = 0.85$	بالاتر از 310

عبور کرده و به لایه بازتابنده می رسند و با بازتاب از این لایه، به محیط بازگردانده می شود. همچنین لایه بالایی انرژی حرارتی خود را به طور حداکثری، به محیط بیرون گسیل می کند [۸]. طبق قانون تابش حرارتی کیرشهف، در تعادل حرارتی، ضریب جذب یک جسم در یک طول موج و جهت مشخص با ضریب گسیل آن در همان طول موج و جهت برابر است [۹]. بنابراین، استفاده از مواد شفاف در برابر امواج خورشیدی که قسمت موهومی ضریب شکست مختلط $(n - jk)$ آنها عدد قابل توجهی در ناحیه فروسرخ باشد، می تواند به عنوان ایده اولیه تحقق گسیل کننده مناسب در پنجره انتقال اتمسفر، مورد توجه قرار گیرد. یکی از این مواد، فوتورزیست منفی SU-8 است. SU-8 به علت قابلیت مسطح سازی و پوشش دهی مناسب، برای ساخت ساختارهای عمیق و تناوبی مورد اقبال است. این

دمای اتمسفر ثابت و برابر 300 کلوین است. همچنین در نقطه مشاهده با شرایط مشابه تهران (ارتفاع از سطح دریا 4538 فوت، عرض جغرافیایی 39 درجه و مقدار بخار آب صفر) از محاسبه گر ATRAN استخراج شده است [۷].

۳. ارائه ساختار چندلایه جهت سرمایش تشعشی

در این بخش، به بررسی یک ساختار چندلایه که اثر سرمایش تشعشی دارد، می پردازیم. ساختار آرمانی مدنظر باید به گونه ای باشد که لایه زیرین بازتاب مناسب در بازه طول موجی 0.3 الی 3 میکرومتر داشته باشد و لایه های بالایی نیز دو شرط: (۱) شفافیت در ناحیه امواج خورشیدی و (۲) ضریب گسیل زیاد در ناحیه پنجره انتقال اتمسفر را داشته باشند (شکل ۲). در این شرایط، امواج با طول موج 0.3 الی 3 میکرومتر با برخورد به جسم، از لایه بالایی



شکل ۳. شدت طیفی تابش خورشید پس از عبور از اتمسفر [۱۱].

زیرلایه با ضریب شکست n_s قرار گرفته‌اند. همچنین لایه اول و آخر باید ضریب شکست n_H داشته باشند و در نتیجه تعداد لایه‌ها فرد است (شکل ۴. الف). با طراحی مناسب، موج‌های عبوری از ساختار بر هم تأثیر مخرب می‌گذارند و در نتیجه ضریب عبور ساختار صفر و بازتاب برابر با یک می‌شود (ضریب جذب لایه‌ها را صفر فرض کردیم). در ادامه، یکی از روش‌های تحلیل بازتابنده براگ را معرفی می‌کنیم و سپس سعی داریم با استفاده از این روش، یک بازتابنده خوب برای هدف سرمایش تشعشعی طراحی کنیم. با توجه به توان بالای امواج خورشیدی در طول موج ۵۵۰ نانومتر، در طراحی‌ها آن را به عنوان طول موج مرکزی بازتابنده اختیار می‌کنیم.

۱.۵. تحلیل بازتابنده براگ

یکی از روش‌های تحلیل بازتابنده براگ، روش ماتریس انتقال است. در این روش، هر لایه معادل یک خط انتقال در نظر گرفته می‌شود که در آن برای قطبش TM_y ، میدان‌های عرضی E_x و H_y معادل ولتاژ و جریان خط انتقال است. به علت پیوستگی میدان‌های عرضی در مرزها، این خطوط انتقال به صورت زنجیره‌ای به هم متصل می‌شود و بنابراین بررسی انتشار موج در بازتابنده براگ معادل حل یک مدار متشکل از

ماده به علت پایداری شیمیایی و استحکام مکانیکی می‌تواند به تنهایی به عنوان لایه پوششی روی ساختار بماند و جزئی از ساختار باشد [۱۰]. در ادامه، سعی در طراحی یک بازتابنده مناسب برای امواج خورشیدی داریم.

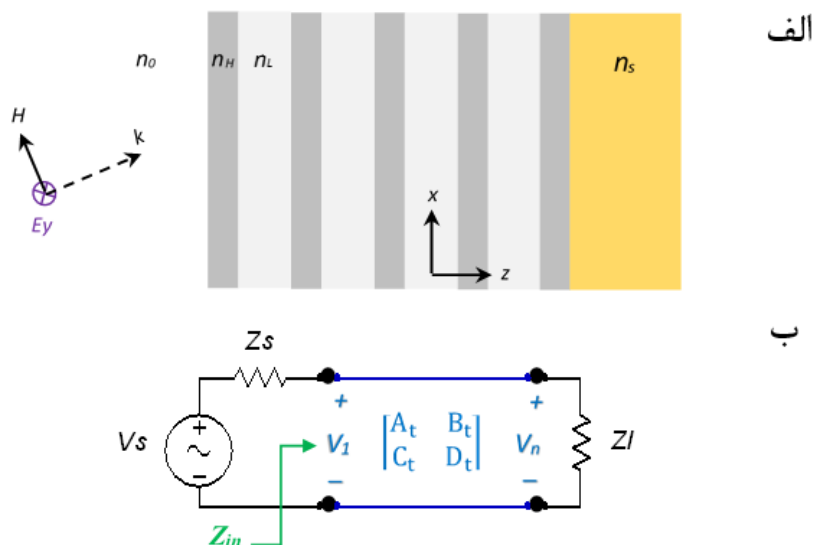
۴. طراحی بازتابنده مناسب برای امواج خورشیدی

در این بخش سعی داریم تا با روش‌های رایج در الکترومغناطیس، یک بازتابنده مناسب در محدوده طول موج خورشیدی طراحی کنیم. برای سادگی طراحی، بازه طول موج طراحی را محدود می‌کنیم. بدین منظور، هدف طراحی را طول موج ۰/۳ الی ۱/۱۲ میکرومتر قرار می‌دهیم؛ چون ۸۵/۵٪ از توان خورشید در این بازه متمرکز شده است (شکل ۳). در ادامه، با روش براگ سعی در طراحی یک بازتابنده خوب در محدوده ذکر شده هستیم.

۵. بازتابنده براگ^۱

بازتابنده براگ از N لایه نازک که معمولاً متناوب هستند تشکیل می‌شود. این ساختار از جفت لایه دی‌الکتریک با ضریب شکست n_H و n_L تشکیل شده است که $n_H > n_L$ است. لایه‌ها، به ترتیب، ضخامت d_H و d_L دارند که روی یک

۱. Bragg reflector



شکل ۴. (الف) بازتابنده براگ متشکل از N لایه متناوب n_L و n_H که روی زیرلایه n_s قرار دارند و (ب) خط انتقال معادل بازتابنده براگ.

تابشی است. با معادلسازی انجام شده، بازتاب توان^۱ از سطح ساختار به راحتی از رابطه

$$\Gamma = \left| \frac{Z_{in} - Z_s}{Z_{in} + Z_s} \right|^2, \quad (12)$$

به دست می‌آید که در آن Z_{in} (امپدانس معادل ساختار براگ) و Z_s (امپدانس محیط تابش) به صورت

$$Z_{in} = \frac{A_t Z_l + B_t}{C_t Z_l + D_t}, \quad (13)$$

$$Z_s = \frac{\omega \mu}{\sqrt{k_x^2 n_0^2 - k_x^2}},$$

به دست می‌آید.

۲.۵. شبیه‌سازی بازتابنده براگ

بر مبنای روش ماتریس انتقال، برای محاسبه بازتاب ساختارهای براگ، برنامه‌ای در نرم افزار متلب نوشته شد که در این برنامه، با دادن جنس، ضخامت و تعداد لایه‌ها، ضریب بازتاب را برای موج تخت تابشی با طول موج و زاویه تابش دلخواه محاسبه می‌کند.

زیرلایه را از جنس سیلیسیوم و لایه‌های فوق را متناوباً از جنس TiO_2 و SiO_2 در نظر گرفتیم. ملاک انتخاب این مواد اولاً در

خطوط انتقال است. جهت حل خط انتقال، برای هر لایه یک ماتریس انتقال با تعریف

$$\begin{pmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} A_{N-1} & B_{N-1} \\ C_{N-1} & D_{N-1} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

در نظر می‌گیریم که این ماتریس به صورت

$$\begin{pmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta_i l_i & j Z_{C_i} \sin \beta_i l_i \\ \frac{j}{Z_{C_i}} \sin \beta_i l_i & \cos \beta_i l_i \end{pmatrix}, \quad (8)$$

است که در آن

$$\beta_i = \sqrt{k_0^2 n_i^2 - k_x^2}; Z_{C_i} = \frac{\omega \mu}{\beta_i}, \quad (9)$$

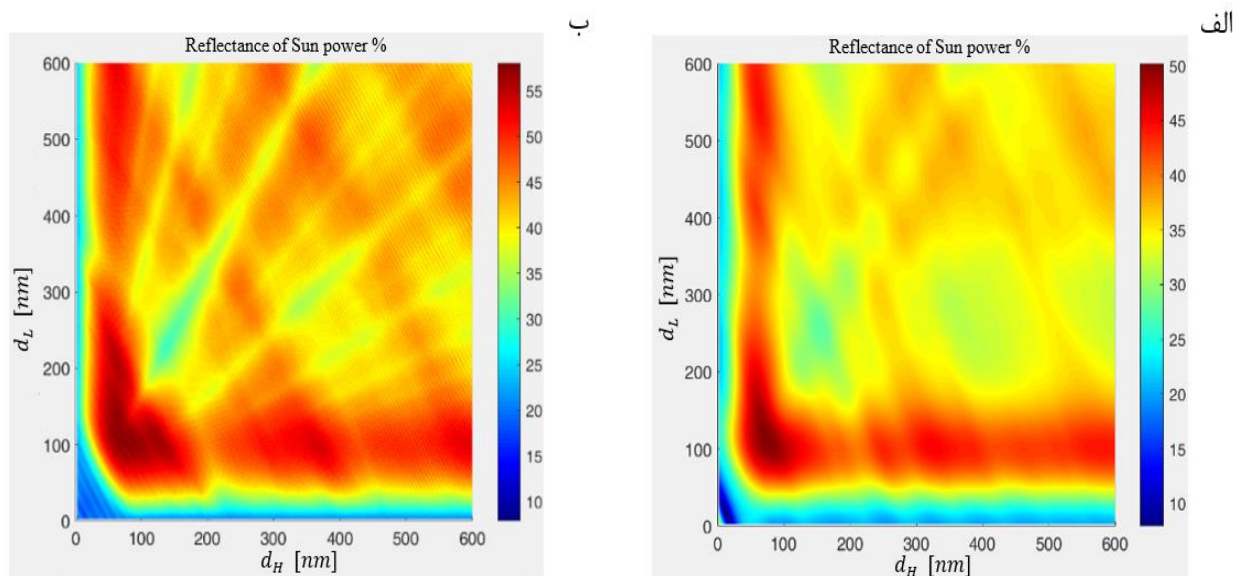
n_i ضریب شکست لایه مورد بررسی، k_x مؤلفه مماسی بردار موج تابشی ($k_x = k_0 n_0 \sin \alpha$)، n_0 ضریب شکست محیط تابش (که معمولاً هوا است) و α زاویه بردار موج با خط قائم بر ساختار است. به علت زنجیره‌ای بودن اتصال خطوط، موج خروجی (لایه N) و ورودی (لایه ۱) با ماتریس انتقال به صورت

$$\begin{pmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_N \\ I_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

ارتباط داده می‌شود که در آن

$$\begin{pmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} A_{N-1} & B_{N-1} \\ C_{N-1} & D_{N-1} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

بنابراین مدار معادل ساختار براگ به شکل ۴. ب درمی‌آید که Z_s و Z_l امپدانس مشخصه مربوط به زیرلایه و محیط موج



شکل ۵. میانگین بازتاب توان خورشید در بازه ۰/۳ الی ۱/۱۲ میکرومتر توسط ساختار براگ (الف) ۵ لایه و (ب) ۳۱ لایه.

$$2m \frac{\pi}{2} + \pi + 2m \frac{\pi}{2} = (2m+1)\pi$$

و همچنین در حالت ب موج بازتابیده به میزان

$$(2m+1) \frac{\pi}{2} + (2m+1) \frac{\pi}{2} = (2m+1)\pi$$

تغییر فاز داده است و در نتیجه امواج بازتابی عمدتاً به صورت سازنده با یکدیگر جمع می‌شوند که باعث بازتاب بالای سطح می‌شود.

با توضیحات گفته شده، با انتخاب طول موج ۵۵۰ نانومتر به عنوان طول موج مرکزی، ضخامت اولیه d_H و d_L را به صورت زیر انتخاب می‌کنیم:

$$d_H = \frac{550}{2 \times 2/4} = 55/2 \text{ nm}$$

$$d_L = \frac{550}{4 \times 1/45} = 94/2 \text{ nm}$$

ضخامت زیر لایه را که در واقعیت نسبت به طول موج خیلی زیاد است بی‌نهایت فرض می‌کنیم.

در ادامه، به ازای $N \in \{5, 11, 21, 31\}$ ، ضخامت لایه‌ها را بین ۲/۵ تا ۶۰۰ نانومتر جاروب می‌کنیم و بازتاب امواج خورشیدی (با فرض زاویه تابش صفر درجه) را برای هر مورد میانگین گرفته و در شکل ۵ برای $N \in \{5, 31\}$ ترسیم می‌کنیم. ابعاد ساختار با بازتاب بیشینه در هر نمودار، در جدول ۲ خلاصه شده است.

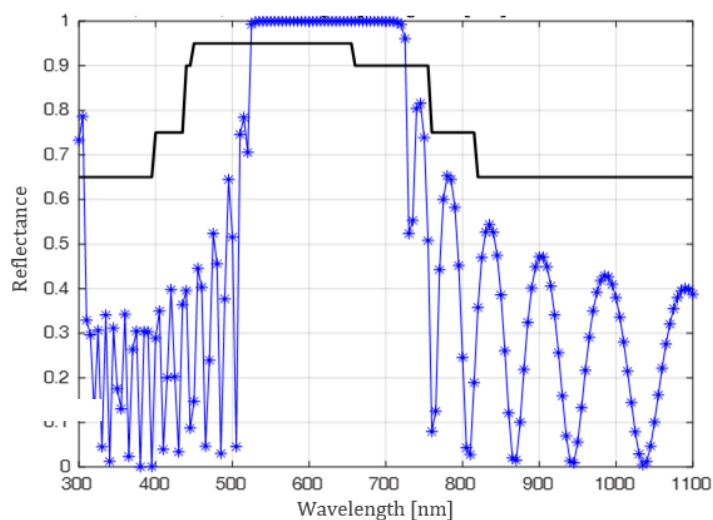
دسترس بودن و قابلیت لایه‌نشانی آنها، ثانیاً اختلاف بالای ضریب شکست آنها است. گفتنی است که در برنامه نوشته شده، ضریب شکست این مواد نسبت به طول موج ثابت برابر با میانگین ضریب شکست آنها در بازه طول موج ۰/۳ الی ۱/۱۲ میکرومتر به صورت ۳/۸، ۲/۴ و ۱/۴۵ در نظر گرفته شده است. در ادامه، دو متغیر d_H و d_L را جاروب می‌کنیم و برای هر حالت، بازتاب امواج خورشیدی (۰/۳ الی ۱/۱۲ میکرومتر) را از سطح ساختار محاسبه می‌کنیم. برای جاروب روی ضخامت لایه‌ها نیاز داریم که یک حدس اولیه مناسب داشته باشیم. برای بیشینه شدن بازتاب در طول موج λ_0 ، ضخامت لایه‌ها باید ربع طول موج در دی‌الکتریک ($\frac{\lambda_0}{4n}$) باشد. در این حالت امواج بازتابی عمدتاً به صورت هم‌فاز با یکدیگر جمع می‌شوند. به بیان دقیق‌تر، موج بازتابیده عمدتاً در یکی از دو حالت زیر در لایه‌ها طی طریق کرده است:

(الف) طی کردن $2m$ لایه به سمت $+z$ ، بازتاب از لایه n_H و سپس طی کردن $2m$ لایه به سمت $-z$

(ب) طی کردن $2m+1$ لایه به سمت $+z$ ، بازتاب از لایه n_L و سپس طی کردن $2m+1$ لایه به سمت $-z$
در حالت الف موج بازتابیده به میزان

جدول ۲. محاسبه بازتاب ساختارهای براگ با روش ماتریس انتقال.

بازتاب توان خورشیدی %	ضخامت بهینه لایه n_H [nm]	ضخامت بهینه لایه n_L [nm]	تعداد لایه ها (N)
۵۰/۲	۷۵	۱۱۲/۵	۵
۵۸/۱	۸۵	۱۰۵	۱۱
۵۷/۵	۶۲/۵	۱۱۰	۲۱
۵۸/۱	۶۰	۱۱۰	۳۱



شکل ۶. نمودار بازتاب ساختار براگ ۳۱ لایه در حالت بیشینه ($n_H = ۲/۴, n_L = ۱/۴۵, d_H = ۶۰nm, d_L = ۱۱۰nm$) برحسب طول موج. پوش گسسته تشعشع امواج خورشیدی به رنگ سیاه ترسیم شده است.

توانایی بازتابش بازتابنده براگ (با دو ماده معرفی شده) در برابر پرتو خورشیدی نهایتاً ۵۸٪ می‌شود. این بررسی منجر به ارائه نمودارهای سیستماتیک شکل ۵ شد که برای طراحی یک ساختار براگ سودمند است. همچنین دیده شد که در بازتابنده براگ بهینه، ضخامت لایه‌ها کمتر از ۲۰۰ نانومتر است که ساخت این بازتابنده‌ها را با پیچیدگی روبرو می‌سازد و این از چالش‌های مهم و عملی بازتابنده‌های براگ به شمار می‌رود.

طیف بازتاب ساختار براگ در حالت بیشینه (سطر آخر جدول ۲) در شکل ۶ ترسیم شده است.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا خواص یک ساختار با خاصیت سرمایش تشعشعی بررسی و تحلیل شد و ضمن پیشنهاد فوتورزیست SU-8 برای لایه گسیل‌دهنده، در مورد استفاده از بازتابنده براگ تحقیق صورت گرفت. با روش ماتریس انتقال نشان داده شد که

مراجع

1. S Catalanotti, et al., *Sol. Energy* **17** (1975) 83.
2. E Rephaeli, A Raman, and S Fan, *Nano Lett.* **13** (2013) 1457.
3. A Raman, et al., *Nature* **515** (2014) 540.
4. Y Zhai, et al., *Science*, **355** (2017) 1062.
5. J Mandal, et al., *Science* **362** (2018) 315.
6. "Reference Air Mass 1.5 Spectra, National Renewable Energy Laboratory", Accessed on: June 28, 2021. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>.

7. "Web-based Input Form for ATRAN (Atmosphere Transmittance)", Accessed on: June 28, 2021. [Online]. Available: <https://atran.arc.nasa.gov/cgi-bin/atran/atran.cgi>.
8. D Zhao, et al., *Appl. Phys. Rev.* **6** (2019) 021306.
9. T L Bergman, et al., "Fundamentals of heat and mass transfer", JohnWiley & Sons, New York (2011).
10. A del Campo and C Greiner, *J. Micromech. Microeng.* **17** (2007) 81.
11. "Reference Air Mass 1.5 Spectra, National Renewable Energy Laboratory". Accessed on: June 28, 2021. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>.