



طراحی بهینه سلول‌های خورشیدی بسیار جدار نازک برای کاربردهای نانو در محدوده طول موج مرئی

علی گلشن^۱، سید امیرعباس علوم^{۲*}، سید علی آقا میرجلیلی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

amiroloomi@iauyazd.ac.ir

چکیده:

سلول‌های خورشیدی جدارنازک کادمیوم تلوراید/کادمیوم سولفید به واسطه داشتن راندمان عملکرد بالا، بالا ضریب صدور بالا، شکاف باند نزدیک به مقدار بهینه برای تبدیل انرژی خورشیدی و هزینه تولید پایین به عنوان یکی از مستعدترین گزینه‌ها در صنعت سلول‌های فتوولتائیک خورشیدی مطرح می‌باشند. عملکرد سلول‌های خورشیدی جدار نازک کارآمد نیازمند طراحی پارامترهای بهینه هر لایه از سلول خورشیدی می‌باشد. با توجه به آنکه ضخامت لایه‌های سلول و ضرایب تشعشعی از مهمترین پارامترهای تأثیر گذار در راندمان هر چندلایه خورشیدی سیلیکون، ایندیوم تین اکساید، روی اکساید، کادمیوم سولفید، کادمیوم تلوراید، مس و نقره می‌باشد، در این مقاله از روش ماتریس انتقال برای محاسبه خواص تشعشعی سه گانه ضریب صدور، ضریب انعکاس و ضریب عبور و ضخامت‌های چندلایه چندلایه خورشیدی در طول موج 0.6526 میکرومتر و زاویه تابش اشعه ورودی 45 درجه در دمای 25 درجه سانتی‌گراد استفاده شده و سپس از الگوریتم ژنتیک با کد نویسی در نرم افزار MATLAB بهینه سازی کلیه پارامترها انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد با تغییر در طول موج اشعه ورودی می‌توان ضریب صدور و انعکاس تا میزان 8% و 16% و با تغییر در زاویه تابش اشعه ورودی ضریب صدور و انعکاس تا میزان 14% و 36% بهبود بخشید. همچنین برای تمامی حالات ضریب عبور دارای مقدار تقریبی صفر و ضرایب دیگر دارای رفتار متضاد می‌باشند.

کلیدواژه‌گان: سلول خورشیدی جدار نازک، الگوریتم ژنتیک، ضریب صدور، ضریب انعکاس، ضریب عبور

Optimization Design of Thin Film Solar Cells for Nano-Area Applications at Visible Wavelength

Ali Golshan¹, Seyed Amir Abbas Oloom^{2*}, Seyed Aliagha Mirjalili³

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Yazd, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Yazd, Iran

†Corresponding Author Email: Amiroloomi@iauyazd.ac.ir

Abstract:

CdTe/Cds thin film solar cell is one of the most promising materials for device applications. It has a high performance efficiency, high emission coefficient and its band gap is close to the optimum value for efficient solar energy conversion. Efficient multilayer thin film solar cell performance requires optimum parameters of each layer. Since the cell thickness and radiation coefficients are the most influential parameters on the efficiency of any solar multilayer in this paper we use transfer matrix method to calculate the thickness and triple radiative properties of emission, reflection and transmission of silicon, indium tin oxide, zinc oxide, cadmium sulfide, cadmium telluride, copper and silver multilayer structure. The derivation results optimized with genetic algorithm at 0.6526 micrometer wavelength with an angle of incident 45° at 25°C. The results show that by changing in the wavelength emission and reflection coefficient can be improved up to 8% and 16% and by changing in angle of incident emission and reflection coefficient can be improved up to 14% and 36%. It was seen that for all cases transmission coefficient is approximately zero and other of triple coefficients behave in the form of sinusoidal curves oppositely.

Keywords: Thin film solar cell, Genetic algorithm, Emission coefficient, Reflection coefficient, Transmission coefficient

۱- مقدمه

از اواسط دهه ۸۰ میلادی فعالیت‌هایی جهت آشنایی و شناخت مکانیزم‌های انتقال حرارت هدایتی در مقیاس‌های کوچک آغاز شده است. ولیکن به مساله انتقال حرارت تشعشعی در مقیاس‌های کوچک تا چند سال اخیر توجهی نشد [۱]. انتقال حرارت تشعشعی کلید اصلی حل و توجیه بسیاری از فرایندهایی است که در اطراف ما رخ می‌دهد. فرایندهای گرمایی سریع^۱ (RTP) به تکنولوژی کلیدی جهت صنایع نیمه هادی‌ها تبدیل شده‌اند. اندازه‌گیری و کنترل دما در این فرایندها دارای اهمیت حیاتی می‌باشد [۲-۳]. زمانی که منبع تولید گرما در دمایی خیلی بیشتر از دمای لایه سیلیکون باشد، مکانیزم تشعشع پدیده غالب می‌باشد. بنابراین فهم و درک خواص تشعشعی سیلیکون و دیگر مواد مرتبط با صنایع نیمه هادی‌ها، امری ضروری و اجتناب ناپذیر می‌باشد. علاوه بر این خیلی از کوره‌های RTP جهت تخمین دما از ترمومترهای غیر تماسی استفاده می‌کنند. لذا تخمین دقیق ضریب صدور لایه جهت ارتباط دمای اندازه‌گیری شده به دمای واقعی لایه، ضروری است [۴-۵].

در سال‌های اخیر سلول‌های خورشیدی لایه نازک مورد توجه برای کاربرد-های فضایی قرار گرفتند [۶-۷]. ضریب صدور سلول‌های خورشیدی موجود ناچیز است (حدود ۰.۱۸). به همین دلیل حرارت در سطح افزایش می‌یابد و منجر به افزایش دما در سلول می‌شود و این افزایش دما بر کارکرد مطلوب سلول خورشیدی تاثیر منفی می‌گذارد. جهت غلبه بر این مشکل می‌بایست از پوشش‌هایی با ضریب صدور بالا استفاده نمود. این پوشش‌ها با ضریب صدور بالا منجر به تنظیم دمای مناسب سطح می‌شود. شیمازاکی جهت افزایش ضریب صدور سلول خورشیدی، از دو نوع پوشش استفاده نمود. پوشش‌های وی شامل یک لایه دی اکسید سیلیکون و یک لایه اکسید آلومینیم و نیز دو لایه از دی اکسید سیلیکون بود [۸]. استفاده از پوشش‌ها موجب افزایش ضریب صدور سلول خورشیدی شد [۸]. افزایش ضریب صدور منجر به تعادل دمایی و بازده مناسب برای سلول‌های خورشیدی در فضا شد. وی به کمک آزمایشات تجربی ضرایب بازتاب را بدست آورد. نتایج وی نشان داد، استفاده از لایه‌های نازک به عنوان پوشش منجر به کاهش ضریب بازتاب و افزایش ضریب صدور می‌شود. افزایش ضخامت پوشش منجر به کاهش بیشتر ضریب بازتاب شد [۸].

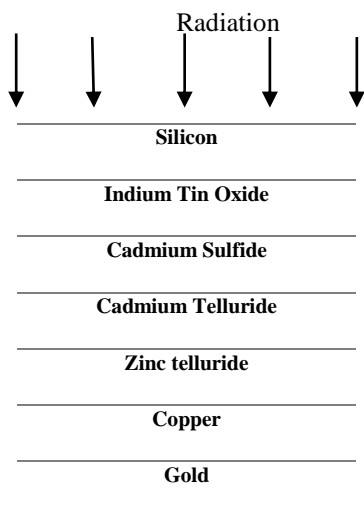
شیمازاکی نشان داد، اگرچه جذب بیشتر با پوشش ضخیم تر بدست می‌آید ولی ضخامت پوشش جهت حصول ضریب صدور بیشینه، باید بهینه شود. نتایج نشان داد که افزایش ضخامت پوشش از یک حد معین منجر به افزایش محسوس در ضریب صدور نمی‌شود. استفاده از پوشش ضخیم منجر به افزایش تنش، افزایش زبری، افزایش زمان تولید و افزایش هزینه پوشش می‌شود. همچنین استفاده از پوشش‌های خیلی ضخیم منجر به ترک

خوردن و جدا شدن از سطح سلول‌های خورشیدی می‌شود و از اینرو این پوشش‌های خیلی ضخیم جهت کاربردهای فضایی غیر عملی می‌باشد. آقای شیمازاکی پیشنهاد داد، به جای استفاده از یک پوشش خیلی ضخیم از دو لایه با ضخامت کمتر استفاده شود [۸]. لیخواص تشعشعی لایه‌های نیمه شفاف را شبیه سازی کرد [۹]. وی از روش ردیابی پرتو‌ها^۲ جهت شبیه سازی خواص تشعشعی استفاده کرد. وی نتایج خود را در محدوده طول موج ۰.۵ میکرو متر تا ۴.۵ میکرومتر ارائه داد. نتایج وی نشان داد پوشش دی اکسید سیلیکون منجر به کاهش شدید ضریب بازتاب می‌شود. نتایج لی در محدوده دمای اتاق تا دمای ۵۰۰ °C و برای سیلیکون ضخیم به ضخامت ۶۲۵ میکرومتر با پوشش دی اکسید سیلیکون به ضخامت ۳۰۰ نانومتر بررسی شد [۹]. لاتمان لایه‌های نیتريد سیلیکون و کربید سیلیکون را بر روی زیر لایه اصلی سیلیکون به روش رسوب بخار^۳ لایه نشانی کرد. وی خواص سختی و تنش این ساختارها را بررسی نمود. نتایج وی نشان دادند که ساختار پوشش داده شده با نیتريد سیلیکون و کربید سیلیکون دارای سختی بالا هستند و از این ساختارها می‌توان در سطوحی که نیاز به مقاوت در برابر خوردگی و سایش دارند استفاده نمود [۱۰]. بونک سطوح با ضریب بازتاب بالا و همچنین ضریب صدور بالا را بررسی کرد [۱۱]. وی از پوشش‌های آلومینیم و دی اکسید سیلیکون استفاده نمود. او نشان داد، پوشش آلومینیم منجر به حصول ضریب بازتاب بالا و پوشش دی اکسید سیلیکون منجر به ضریب صدور بالا می‌شود. نتایج وی نشان دادند اگر یک لایه دی اکسید سیلیکون بر روی یک لایه آلومینیم پوشش داده شود، ضریب بازتاب کمتری نسبت به حالت پوشش با یک لایه آلومینیم، بدست می‌آید. اگر چه پوشش دی اکسید سیلیکون بر روی لایه آلومینیم منجر به کاهش ضریب بازتاب گشت، ولی این ساختار منجر به یک سطح صادر کننده، جهت تقویت تشعشع حرارتی شد [۱۱]. وی به روش رسوب بخار شیمیایی، عمل لایه نشانی را انجام داد و سپس به کمک دستگاه اسپکتروفوتومتر، ضرایب بازتاب و عبور را بدست آورد. او نتیجه گرفت، استفاده از پوشش دی اکسید سیلیکون بر روی پوشش آلومینیم ساختار مناسبی جهت حصول بازتاب مناسب، توام با صدور سطحی کافی می‌باشد، که می‌توان از این ساختار در کاربردهای فضایی، جهت کنترل دما استفاده کرد [۱۱]. فو خواص تشعشعی ساختارهای چند لایه‌ای را برای لایه‌های نازک با ضریب شکست مثبت و منفی مقایسه کرد [۱۲]. وی یک ساختار متشکل از چهار لایه را در نظر گرفت. لایه‌های اول و چهارم را محیط نیمه بی نهایت با مواد دی الکتریک یکسان و ضریب شکست مساوی $n_1 = n_4 = 1.5$ در نظر گرفت. لایه‌های میانی را یکی از خلا و دیگری را با ضریب شکست منفی در نظر گرفت. ضخامت لایه‌های میانی را ۰.۸ سانتی متر انتخاب کرد. نتایج وی نشان دادند که، انتخاب لایه با ضریب شکست منفی، منجر به ضریب عبور بسیار بزرگی برای ساختار چند لایه‌ای می‌شود [۱۲]. در تحقیق انجام شده توسط علومی و

²-Ray Tracing Method³-Vapor Deposition¹- Rapid Thermal Processes

می‌پردازد. سپس اثر پارامترهای طول موج اشعه ورودی و زاویه تابش اشعه ورودی بر روی ساختار چندلایه بررسی و نتایج استخراج شده است.

۱- مدلسازی خواص تشعشعی ساختار چندلایه‌ای و فرمول بندی مسئله
 شکل ۱ شماتیک چندلایه خورشیدی کادمیوم تلوراید/کادمیوم سولفید مورد مطالعه در این مقاله را نمایش می‌دهد. هرگاه ضخامت هر کدام از لایه‌ها کوچکتر یا قابل مقایسه با طول موج امواج الکترو مغناطیس باشند، آنگاه اثرات تداخل امواج داخل هر لایه دارای اهمیت می‌شود. این اثرات تداخل امواج جهت پیش بینی خواص تشعشعی ساختارهای چند لایه‌ای پوشش-های نازک، بسیار حائز اهمیت هستند. روش ماتریس انتقالیک روش مناسب جهت محاسبه خواص تشعشعی ساختارهای چند لایه‌ای پوشش‌های نازک می‌باشد. شکل ۲ نحوه برخورد اشعه ورودی به ساختار چند لایه‌ای را نشان می‌دهد. ضریب شکست مختلط برای لایه j ام $\tilde{n}_j = n_j + ik_j$ می‌باشد و d_j ضخامت لایه j ام می‌باشد.



شکل ۱ شماتیک سلول خورشید کادمیوم تلوراید/کادمیوم سولفید

ضریب شکست اولین لایه را یک فرض می‌کنیم. در محاسبات، خواص نوری هوا را با خواص خلا یکسان در نظر می‌گیریم.
 موج الکترومغناطیس از اولین محیط مادی (هوا) با زاویه θ_1 به ساختار چند لایه‌ای برخورد می‌کند و توسط لایه‌های زیرین بازتاب یا عبور می‌کند.

همکاران [۱۳]، تاثیر تعداد لایه های نازک با ساختارهای پوششی متفاوت بر روی خواص تشعشعی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد تاثیر پذیری خواص تشعشعی از طول موج و ساختار لایه‌ها می‌باشد. آنها همچنین در مطالعه پژوهشی خود [۱۴]، پیرامون خواص تشعشعی سیلیکون با روش ماتریس انتقال نشان دادند که در طول موج مادون قرمز، کاهش ضریب بازتاب در غلظت های بالاتر و افزایش ضریب عبور با افزایش غلظت رخ می‌دهد. همچنین در مطالعه‌ای دیگر نشان دادند که پوشش دی اکسید سیلیکون و نیتريد سیلیکون به عنوان ضد بازتابنده عمل می‌کنند و این پوشش‌ها ضریب بازتاب را کاهش می‌دهند و در مقابل پوشش لایه نازک طلا، ضریب بازتاب را افزایش می‌دهد [۱۵].

در دهه گذشته نرخ رشد صنعت انرژی خورشیدی فتوولتائیک بر اساس سلول های جدار نازک کادمیوم تلوراید/کادمیوم سولفید بالاتر از هرگونه فناوری فتوولتائیک دیگری است. نیروگاه های خورشیدی بر اساس کادمیوم تلوراید با ظرفیت چندها مگاوات در حال حاضر در کشور های آمریکا، کانادا، آلمان و اسپانیا ساخته شده است. هزینه تولید سلول های کادمیوم تلوراید در حدود 30% کمتر از سلول های کادمیوم ایندیوم گالیوم سلناید (CIGS) و 40% کمتر از سلول های سیلیکونی (A-Si) می‌باشد [16]. سلول های کادمیوم تلوراید نسبت به سلول های کادمیوم ایندیوم گالیوم سلناید و سیلیکونی دارای راندمان 18.3% می‌باشند [17]. همچنین بازده تئوری سلول های خورشیدی فوق را در شرایطی می‌توان به 30% نیز رسانید [18-19]. بررسی تئوری وابستگی راندمان سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید/کادمیوم سولفید به برخی خواص مانند ضخامت لایه‌های بالا دستی، ضخامت لایه پنجره ایکادمیوم سولفید، ضخامت لایه جاذب کادمیوم تلوراید و ... در مراجع [20-24] آمده است. اخیراً " روش های مبتنی بر جستجو به واسطه داشتن ویژگی هایی بی نظیر مانند وابستگی کمتر به مقدار اولیه، عدم احتیاج به گردابان اطلاعات و ... در مسائل مختلف به خصوص مسائل غیر خطی و چندپارامتری توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. در میان این روش ها روش الگوریتم ژنتیک بر روی بهینه سازی بسیاری از مسائل چندپارامتری اعمال شده است [25]. کاربرد الگوریتم ژنتیک در تحلیل های تابشی توسط لی و همکاران برای بررسی بازتاب پراکندگی، ضخامت های نوری و عملکرد فازی در صفحات موازی به کار برده شده است [26]. کیم و همکاران با ترکیب تکنیک بهینه سازی محلی و الگوریتم ژنتیک میزان صدور دیواره هندسه های نامنظم دوبعدی را بهبود داد [27].

این مقاله به بررسی خواص تشعشعی و ضخامت هر لایه سلول جدار نازک کادمیوم تلوراید/کادمیوم سولفید و سپس بهینه سازی آن خواص و ضخامت ها جهت دست یابی به بهترین ضرایب تشعشعی و ضخامت ها با کدنویسی الگوریتم ژنتیک در محیط نرم افزار متلب با روش ماتریس انتقال

با اعمال شرایط مرزی در سطوح تداخل، ضرایب A_j و B_j دامنه امواج پیشرو و پسرو با ضرایب مرتبط از لایه‌های مجاور، توسط یک معادله خطی ارتباط پیدا می‌کنند [۲۹-۳۰]:

$$\begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix} = P_j D^{-1}_j D_{j+1} \begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$P_j = \begin{bmatrix} e^{-iq_{jz}d_j} & 0 \\ 0 & e^{+iq_{jz}d_j} \end{bmatrix}, j = 2, 3, \dots, N-1 \quad (9)$$

و

$$P_1 = I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

D_j ماتریس انتقال و P_j نام دارد و برای حالتیکه بردار میدان الکتریکی عمود به صفحه اشعه ورودی باشد، ماتریس انتقال طبق رابطه (11) و در حالتیکه بردار میدان الکتریکی موازی صفحه اشعه ورودی باشد، طبق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$D_j = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \tilde{n}_j \cos \tilde{\theta}_j & -\tilde{n}_j \cos \tilde{\theta}_j \end{bmatrix}, j = 1, 2, \dots, N-1 \quad (11)$$

$$D_j = \begin{bmatrix} \cos \tilde{\theta}_j & \cos \tilde{\theta}_j \\ \tilde{n}_j & -\tilde{n}_j \end{bmatrix}, j = 1, 2, \dots, N-1 \quad (12)$$

و D^{-1}_j معکوس ماتریس انتقال می‌باشد.

هرگاه بردار میدان الکتریکی عمود بر صفحه فرود باش، اشعه ورودی قطبی از نوع S^۱ می‌باشد و هرگاه بردار میدان الکتریکی موازی صفحه فرود باشد، اشعه ورودی قطبی از نوع P^۲ گویند.

از اینرو با اعمال شرایط مرزی در هر یک از سطوح مشترک بین لایه‌ها، می‌توان ضرایب A_1 و B_1 را به ضرایب A_N و B_N به کمک معادله (13) مرتبط ساخت.

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} A_N \\ B_N \end{pmatrix} \quad (13)$$

و ماتریس M از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$M = \prod_{j=1}^{N-1} P_j D^{-1}_j D_{j+1} \quad (14)$$

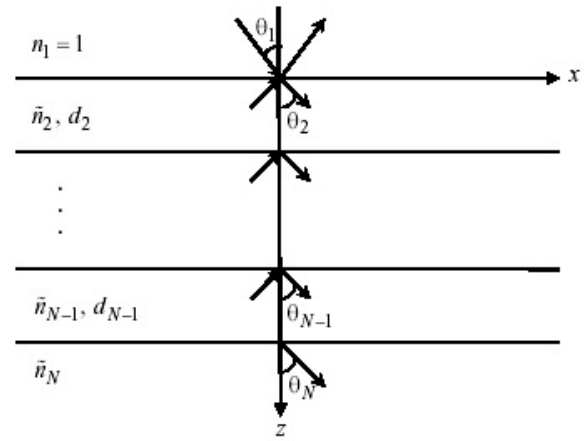
A_1 یک عدد حقیقی است و $B_N = 0$ می‌باشد. در نتیجه خواص تشعشی طیفی جهتی یک ساختار چند لایه‌ای شامل ضریب بازتاب $\rho_{\lambda, \theta}$ و ضریب عبور $\tau_{\lambda, \theta}$ با توجه به مفهوم و تعریف هر کدام از خواص تشعشی از روابط زیر محاسبه می‌گردد [۳۰]:

$$\rho_{\lambda, \theta} = \frac{B_1 B_1^*}{A_1^2} \quad (15)$$

$$\tau_{\lambda, \theta} = \frac{Re(\tilde{n}_N \cos \tilde{\theta}_N) A_N A_N^*}{\tilde{n}_1 \cos \tilde{\theta}_1 A_1^2} \quad (16)$$

در معادلات بالا، علامت * مشخص کننده مزدوج مختلط می‌باشد.

ضریب جذب طیفی جهتی، از تفاضل ضرایب بازتاب و عبور از عدد یک محاسبه می‌گردد و ضریب گسیل طیفی جهتی $\epsilon_{\lambda, \theta}$ به کمک قانون



شکل ۲ نحوه برخورد اشعه ورودی به ساختار چند لایه‌ای

بردار موج به کمک رابطه (۱) نشان داده می‌شود.

$$q_j = q_{jx} \hat{x} + q_{jz} \hat{z} \quad (1)$$

q_{jx} و q_{jz} اجزای موازی و عمودی بردار موج هستند.

جزء موازی بردار موج q_{jx} از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۸]:

$$q_x = q_{jx} = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 \sin \theta \quad (2)$$

این مقدار q_x در طول لایه ها ثابت می‌ماند.

جزء عمودی بردار موج q_{jz} توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$q_{jz} = \frac{2\pi}{\lambda} \tilde{n}_j \cos \tilde{\theta}_j \quad (3)$$

$\tilde{\theta}_j$ در حالت کلی مختلط می‌باشد و به کمک رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۸]:

$$\tilde{\theta}_j = \sin^{-1} \left(\frac{n_1 \sin \theta_1}{\tilde{n}_j} \right) \quad (4)$$

میدان مغناطیسی محیط مادی Zام مجموع امواج پیشرو و پسرو در جهت Z می‌باشد؛ لذا میدان مغناطیس E_j در هر لایه توسط رابطه زیر بیان می‌شود [۲۹-۳۰]:

$$E_j = \begin{cases} [A_1 e^{iq_{1z}z} + B_1 e^{-iq_{1z}z}] e^{(iq_x x - i\omega t)}, j = 1 \\ [A_j e^{iq_{jz}(z-z_{j-1})} + B_j e^{-iq_{jz}(z-z_{j-1})}] e^{(iq_x x - i\omega t)}, j = 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (5)$$

همچنین عمق لایه Zام به کمک معادلات (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند:

$$z_j = z_{j-1} + d_j \quad j = 2, 3, \dots, N-1 \quad (6)$$

$$z_1 = 0 \quad (7)$$

با توجه به پیوستگی تابع نمایی، لذا رابطه میدان مغناطیسی (معادله (5)) و مشتقات آن نیز در عبور از مرز پیوسته است. جهت اعمال شرایط مرزی معادله (5) و مشتق آن در مرز بین هر دو لایه مجاور برابر قرار داده می‌شوند.

¹-S Polarization

²-P Polarization

ضرایب بازتاب زیر لایه سیلیکون ضخیم با ضخامت $700 \mu m$ و پوشش داده شده با دی اکسید سیلیکون با ضخامت 300 nm را در دو حالت پوشش و دو دمای متفاوت بر حسب طول موج، با نتایج لی [34] مقایسه شد.

جدول ۱- محاسبه میزان خطای ضرایب تشعشی با روش حاضر

دمای $^{\circ}\text{C}$ ۱۰۰۰	دمای $^{\circ}\text{C}$ ۵۰۰	دمای $^{\circ}\text{C}$ ۳۰	ضرایب تشعشی/ دما
8.6%	12.5%	12.7%	ضرایب بازتاب

کرشیف^۱ از معادله (۳-۱۷) محاسبه می شود [۲۸]:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta} = 1 - \rho_{\lambda,\theta} - \tau_{\lambda,\theta} \quad (17)$$

شکل خاصی از قانون کرشیف که هیچگونه محدودیتی ندارد، شامل خواص طیفی و جهتی است. یعنی [۳۱]:

$$\alpha_{\lambda,\theta} = \varepsilon_{\lambda,\theta} \quad (18)$$

چون $\varepsilon_{\lambda,\theta}$ و $\alpha_{\lambda,\theta}$ به ترتیب، مستقل از توزیع های طیفی و جهتی تشعشع صادر شده و تشعشع ورودی اند، تساوی فوق همیشه صادق است [۳۱].

۲- ثابتهای نوری سیلیکون و مواد مرتبط

۱-۳- ضریب شکست سیلیکون

جلیسون و مادین آزمایشات خود را در محدوده دمایی بین 25°C تا 490°C جهت به دست آوردن عبارتی برای ضریب شکست انجام دادند. آنها از نتایج اندازه گیری شده، ضریب شکست سیلیکون را توسط رابطه های زیر (J.M) بیان نمودند [۳۲]:

$$n_{JM}(\lambda, \theta) = n_0(\lambda) + \beta(\lambda)T \quad (19)$$

که:

$$n_0 = \sqrt{4.565 + \frac{97.3}{3.648^2 - \left(\frac{1.24}{\lambda}\right)^2}} \quad (20)$$

$$\beta(\lambda) = -1.864 \times 10^{-4} + \frac{5.394 \times 10^{-3}}{3.648^2 - \left(\frac{1.24}{\lambda}\right)^2} \quad (21)$$

که در روابط بالا، λ طول موج در خلا بر حسب μm و T دما بر حسب $^{\circ}\text{C}$ می باشد. از این واحدها در کلیه معادلات استفاده خواهد شد.

۲-۳- ضریب استهلاک سیلیکون

فرمول (J.M) برای ضریب استهلاک به صورت زیر بیان می شود [۳۲]:

$$k_{JM}(\lambda, T) = k_0(\lambda) \exp \left[\frac{T}{369.9 - \exp \left(-12.92 + \frac{6.831}{\lambda} \right)} \right] \quad (22)$$

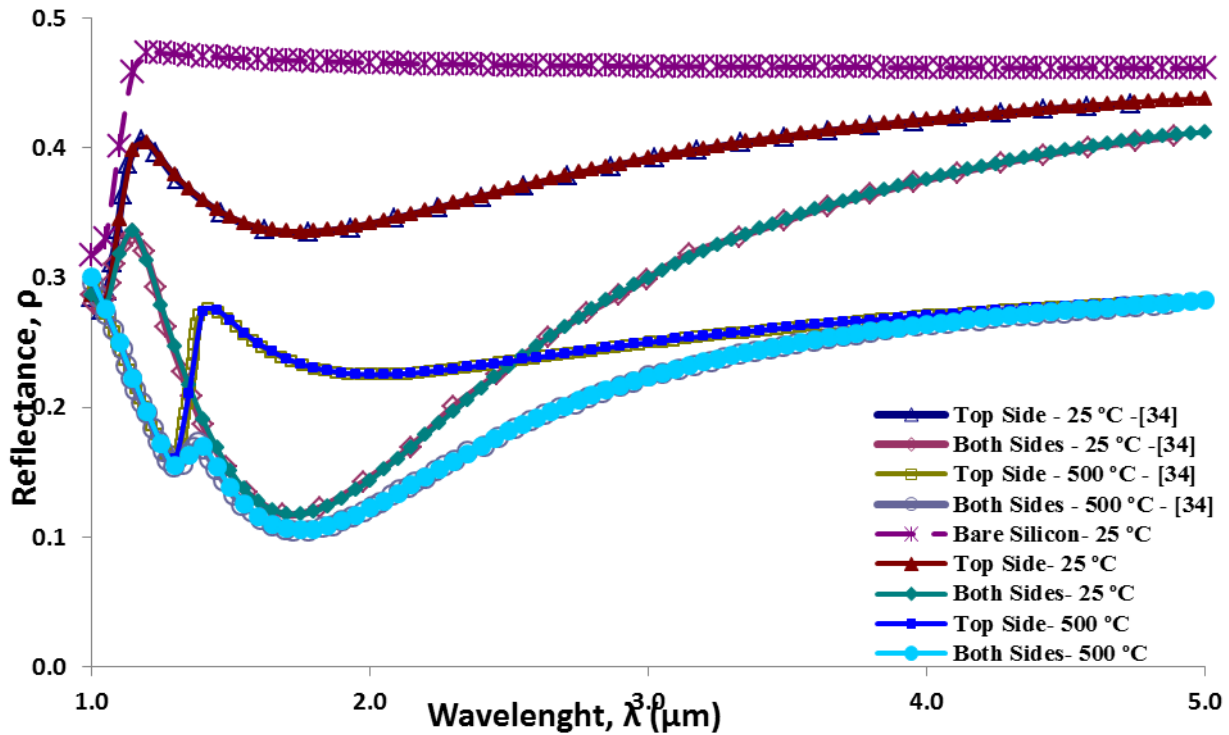
$$k_0(\lambda, T) = -0.080 + \exp \left[-3.1893 + \frac{7.946}{3.648^2 - \left(\frac{1.24}{\lambda}\right)^2} \right] \quad (23)$$

۳-۳- ثابتهای نوری مواد دیگر

با توجه به فقدان داده های تجربی، فرضیاتی جهت به دست آوردن ثابت های نوری مواد دیگر باید فرض شود ثابت های نوری ایندیم تین اکساید، زینک تلوراید، کادمیوم سولفید، کادمیوم تلوراید، مس و طلا بر پایه داده های جمع آوری شده در هندبوک پالیک استوار است [۳۳]. ثابت های نوری این مواد را بر اساس داده های موجود در هندبوک در هر محدوده طول موج رسم نموده و به کمک فرمول یابی، معادله آنها را برای هر محدوده طول موج، استخراج می شود.

۴- نتایج

¹-Kirchhoff's Law



شکل ۳ = مقایسه نتایج با مرجع [34]

جدول ۳- ضرایب بهینه تشعشعی

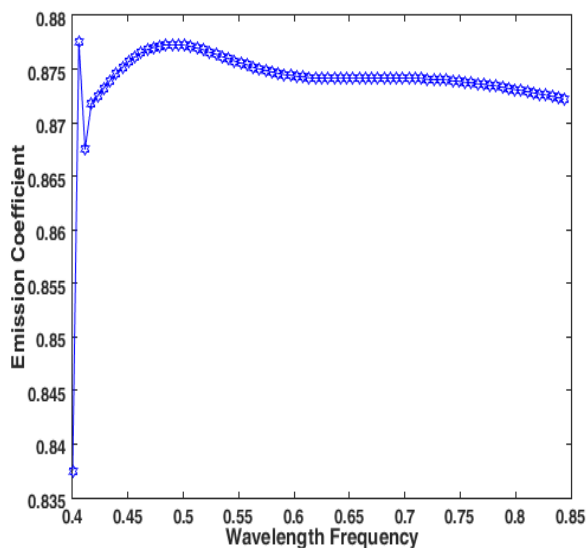
ضرایب تشعشعی	مقدار ضرایب بهینه
ضریب صدور	8.076e-01
ضریب انعکاس	1.923e-01
ضریب عبور	9.880e-13

با استفاده از روش ماتریس انتقال و الگوریتم ژنتیک ضخامت های هرلایه از سلول خورشیدی و ضرایب بهینه تشعشعی صدور، انعکاس و عبور محاسبه شده و در جداول 2 و 3 آورده شده است. نتایج در محدوده طول موج $0.4\mu m \leq \lambda \leq 0.84\mu m$ و زاویه تابش اشعه ورودی $0 \leq \theta \leq 90$ برای ضریب گسیل، ضریب انعکاس و ضریب عبور در شکل های ۹ - ۴ آمده است.

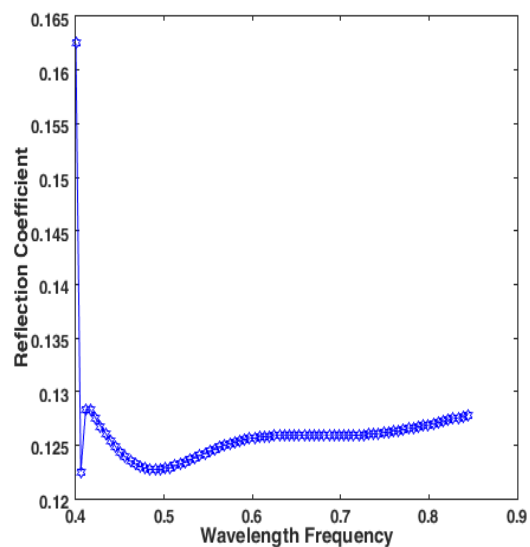
جدول ۲- ضخامت های بهینه چندلایه خورشیدی

عنوان لایه	ضخامت لایه (میکرومتر)
سیلیکون	0.100
ایندیوم تین اکساید	0.100
کادمیوم سولفید	0.100
کادمیوم تلوراید	3.024
زینک تلوراید	0.299
مس	0.010
طلا	0.100
ضخامت کل چند لایه	3.733

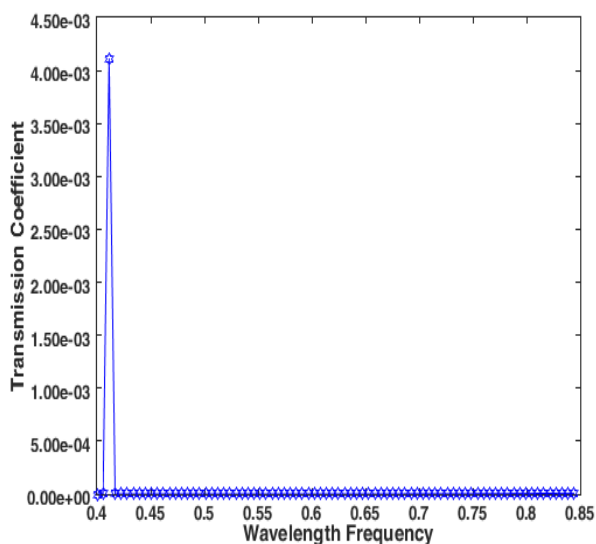
خطای متوسط بیشینه برای تمام حالات از ۱۳% تجاوز نمی کند (جدول ۱)، از این رو نتایج این تحقیق با نتایج سایر مراجع تطابق خوبی دارد.



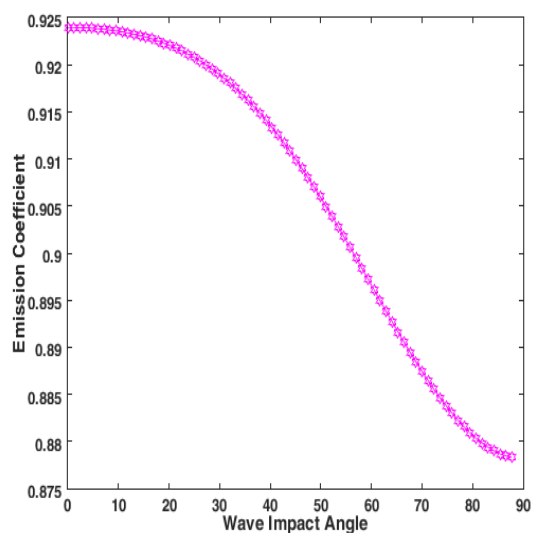
شکل ۴ - ضریب صدور در برابر تغییرات طول موج



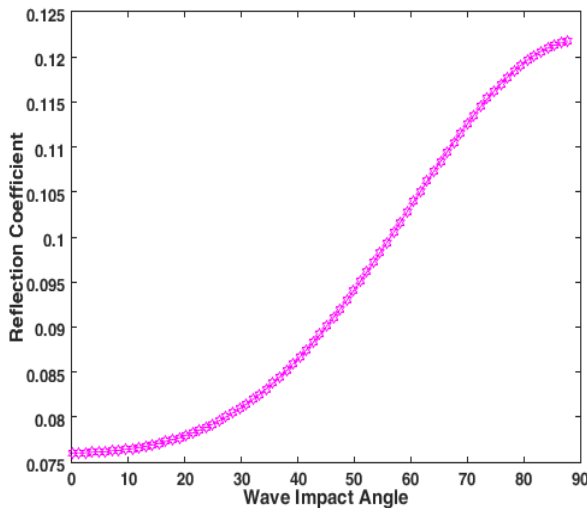
شکل ۵ - ضریب انعکاس در برابر تغییرات طول موج



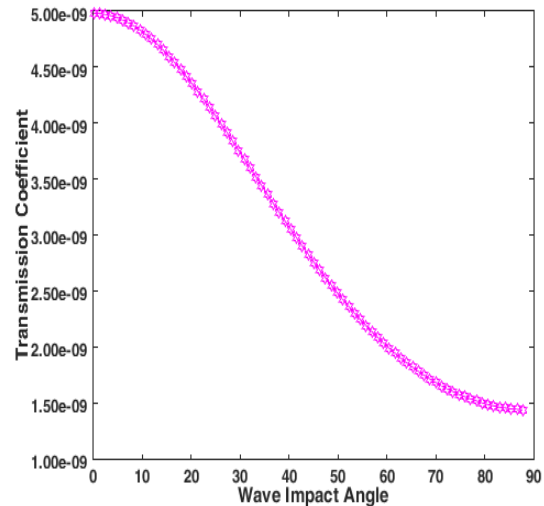
شکل ۶ - ضریب عبور در برابر تغییرات طول موج



شکل ۷ - ضریب صدور در برابر تغییرات زاویه تابش ورودی



شکل ۸- ضریب انعکاس در برابر تغییرات زاویه تابش ورودی



شکل ۹ - ضریب عبور در برابر تغییرات زاویه تابش ورودی

نمود و ضریب صدور و انعکاس را با تغییر در طول موج اشعه ورودی تا میزان 8% و 16% و با تغییر در زاویه تابش اشعه ورودی ضریب صدور و انعکاس تا میزان 14% و 36% بهبود بخشید.

۵- جمع بندی

سلول‌های خورشیدی فیلم نازک کادمیوم تلوراید/کادمیوم سولفید پتانسیل بسیار زیادی برای دستیابی به بازده بالا را دارا می‌باشند. مدل سازی الکترواپتیکی روشی امیدبخش برای شناسایی و تجزیه و تحلیل عملکرد اپتیکی اینگونه ساختارها بدون صرف هزینه‌های بالای تولید می‌باشد. بنابراین پتانسیل‌های بهینه سازی می‌تواند به سرعت، ارزیابی و اصلاح ساختارهای چندلایه را با تمرکز بر ویژگی‌های مورد نظر امکان سازد. در این مقاله اثر ضخامت هر لایه زاویه تابش اشعه ورودی و طول موج مورد مطالعه قرار گرفته است. با بررسی پارامترهای فوق بر روی ساختار چندلایه مشاهده می‌گردد ضرایب سه گانه تشعشعی صدور، انعکاس و عبور تابعی از پارامترهای زاویه تابش و طول موج می‌باشد. در صنعت سلول‌های خورشیدی جدارنازک نیاز است یک چندلایه جهت خواص بهینه طراحی شود. با تغییر پارامترهای هندسی و اپتیکی می‌توان به این مهم دست یافت. می‌توان بسته به کاربرد مورد نیاز صنعت، محدوده طول موج معین را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد و به کمک الگوریتم ژنتیک، ساختار را مناسب انتخاب نمود.

۶- مراجع

1. M. Menguc and M.Zhang, Special Issue on Nano/Microscale Radiative Transfer, *Journal of Heat Transfer*, Vol.129, pp. 1-2, 2007.

به علت تداخل امواج در پوشش‌های نازک، نوساناتی در نتایج دیده می‌شود. که این نوسانات به شکل منحنی‌های سینوسی می‌باشد. با توجه به معادلات (۹)، (۱۱) و (۱۲) متوجه رفتار سینوسی (کسینوسی) امواج در هر محیط مادی می‌شویم. هر چه تعداد لایه‌ها بیشتر باشد حاصلضرب $\cos \theta_j$ ها نیز افزایش یافته و در نتیجه نوسانات بیشتر و وابستگی خواص تشعشعی به طول موج بیشتر می‌شود. در تعداد لایه‌های بالا، رفتار تشعشعی پیچیده می‌شود. بنابراین رفتار نتایج به دست آمده در این مقاله، هم از نظر فیزیکی و هم از نظر ریاضی موجه است. دامنه و فاصله بین قله‌ها در نوسان‌های سینوسی با افزایش طول موج، زیاد می‌گردد. فاصله بین نوسانات را می‌توان از رابطه (۲۴) محاسبه نمود [۳۵]:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda^2} = (2n_j d_j)^{-1} \quad (24)$$

$\Delta \lambda$ فاصله بین دو قله مجاور است. بنابراین افزایش ضخامت لایه، منجر به نوسانات بیشتر نتایج ناشی از کاهش فاصله بین قله‌ها می‌شود. با افزایش طول موج، نوسانات کمتر می‌شود، زیرا فاصله بین قله‌ها افزایش می‌یابد. ضریب عبور در طول موج‌های کوتاه، به علت جذب موج الکترومغناطیس توسط ساختارهای چند لایه‌ای صفر است، ولی ضریب عبور با افزایش طول موج، به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد و به بیشینه خود می‌رسد. وجود یک شیب تند ناشی از لبه جذب می‌باشد و با افزایش طول موج، ضرایب تشعشعی تحت تأثیر وجود ناخالصی‌ها و نقایص، جذب حاملان آزاد، انتقال درون نوارها توسط الکترون‌ها و حفره‌ها، جذب توسط ارتعاشات شبکه و غیره، قرار می‌گیرد. همچنین با توجه به شکل‌های ۹-۴ با انتخاب طول موج و زاویه تابش اشعه ورودی خواص تشعشعی مناسب مورد نیاز صنایع مختلف را می‌توان انتخاب

- thermal control, *Optical Materials*, Vol. 30, pp. 1410–1421, 2008.
12. Fu, Ceji, Zhang, M. Zhuomin and Tanner, B. David, Radiative Properties of Multilayer Thin Films with Positive and Negative Refractive Indexes, *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, New Orleans, Louisiana, 2002.
 13. S.A.A. Oloomi, Appropriate coating for optimum of radiative properties of nanoscale multilayer structures. *World Applied Sciences Journal*, Vol. 16, No. 8, pp. 1131-1136, 2012.
 14. S.A.A. Oloomi, A. Saboonchi, and A. Sedaghat, Effects of donors on radiative properties of nanoscale multilayer structures at infrared wavelengths, *Recent Researches in Mechanic Transportation and Culture*, Vouliagmeni, Athens, Greece, pp. 82-89, December 29-31, 2010.
 15. S.A.A. Oloomi, A. Saboonchi and A. Sedaghat, Effects of thin film thickness on emittance, reflectance and transmittance of nano scale multilayers. *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. 5, No. 5, pp. 465-469. 2010.
 16. R. Swami, *Solar cell*, *International Journal of Science and Research Publications*, Vol. 2, No. 7, pp. 1-5, 2012.
 17. M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop, Solar cell efficiency tables (version 41), *Progress in Photovoltaic Research and Applications*, Vol. 21, pp. 1-11, 2013.
 18. L. Kosyachenko, T. Toyama, Current–voltage characteristics and quantum efficiency spectra of efficient thin-film CdS/CdTe solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 120, Part B, pp. 512-520, 2014.
 19. L. Zhi, F. Lianghuan, Z. Guanggen, L. Wei, Z. Jingquan, W. Lili, W. Wenwu, Influence of CuxS back contact on CdTe thin film solar cells, *Journal of Semiconductors*, Vol. 34, No. 1, pp. 014008-1-0170083, 2013.
 20. L.A. Kosyachenko, A.I. Savchuk, E.V. Grushko, Dependence of efficiency of thin-film CdS/CdTe solar cell on parameters of absorber layer and barrier structure, *Thin Solid Films*, Vol. 517, pp. 2386-2391, 2009.
 21. H.A. Mohamed, Influence of the optical and recombination losses on the efficiency of CdS/CdTe solar cell at ultrathin absorber layer, *Canadian Journal of Physics*, Vol. 92, No. 11, pp. 1350-1355, 2014.
 2. P. J. Timans, R. Sharangpani, and R. P. S Thakur, Rapid Thermal Processing, *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*, Y. Nishi and R. Doering (eds.), Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 201-286, 2000
 3. Z. M. Zhang, Surface Temperature Measurement Using Optical Techniques, *Annual Review of Heat Transfer*, Vol. 11, pp. 351-411, 2000.
 4. Y. H. Zhou, Y. J. Shen, Z. M. Zhang, B. K. Tsai, and D. P. DeWitt, A Monte Carlo Model for Predicting the Effective Emissivity of the Silicon Wafer in Rapid Thermal Processing Furnaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 1945-1949, 2002.
 5. B. K. Tsai, D. P. DeWitt, E. A. Early, L.M. Hanssen, S. N. Mekhontsev, M. Rink, K. G. Kreider, B. J. Lee, and Z. M. Zhang, Emissance Standards for Improved Radiation Thermometry During Thermal Processing of Silicon Materials, *9th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science*, Cavtat-Dubrovnik, Croatia, 2004.
 6. A. Klaver, J.W. Metselaar, M. Zeman and R. Swaaij, Development of a model to predict EOL efficiency of amorphous silicon solar cells for space applications, *Proceedings of the 20th european photovoltaic solar energy conference*, pp. 1612-1615, Munich, Germany, 2005.
 7. E.J. Simburger, J.H. Matsumoto, T.W. Giants, Material Science and Engineering B, Solid-State Material Advance Technology, Vol. 116, pp. 265-268, 2005.
 8. Shimazaki, Kazunori, Imaizumi, Mitsuru, Kibe, Koichi, SiO₂ and Al₂O₃/SiO₂ coatings for increasing emissivity of Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells for space applications, *Thin Solid Films*, Vol. 516, pp. 2218–2224, 2008.
 9. H.J. Lee, B.J. Lee, Z.M. Zhang, Modeling the radiative properties of semitransparent wafers with rough surfaces and thin-film coatings, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, Vol. 93, pp. 185–194, 2005.
 10. M. Lattemanna, S. Ulrich, H. Holleck, M. Stuber, H. Leiste, Characterizations of silicon carbide and silicon nitride thin films and Si₃N₄/SiC multilayer, *Diamond and Related Materials*, Vol. 11, pp. 1248–1253, 2002.
 11. Bohnke, Tobias, Kratz, Henrik, Hultaker, Annette, Kohler, Johan, Marika Edoff, Arne Roos, Carl-Gustaf Ribbing, Greger Thornell, Surfaces with high solar reflectance and high thermal emittance on structured silicon for spacecraft

- and *Chemical Reference Data*, Vol. 9, pp. 561-658, 1980.
35. B. J. Lee, and Z. M. Zhang, Modeling Radiative Properties of Silicon with Coatings and Comparison with Reflectance Measurements, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol.19, No.4,pp.558-565, 2005.
 22. J.L.A. Kosyachenko, E.V. Grushko, V.V. Motushchuk, Recombination losses in thin-film CdS/CdTe photovoltaic devices, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 90, No. 15, pp. 2169-2574, 2006.
 23. V.V. Brus, On quantum efficiency of nonideal solar cells, *Solar Energy*, Vol.86,pp.786-791, 2012.
 24. H.A. Mohamed, Dependence of efficiency of thin-film CdS/CdTe solar cell on optical and recombination losses, *Journal of Applied Physics*, Vol. 113,pp.093105-1-093105-6,2013.
 25. Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms p Data Structures ¼ Evolution Programs*, 3d rev. and extended ed.,Springer-Verlag, New York, pp.100–104, 1999.
 26. H. Y. Li and C. Y. Yang, A Genetic Algorithm for Inverse Radiation Problems, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 1545–1549, 1997.
 27. K. W. Kim, S. W. Baek, M. Y. Kim, and H. S. Ryou, Estimation of Emissivities in a Two Dimensional Irregular Geometry by Inverse Radiation Analysis Using Hybrid Genetic Algorithm, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative transfer*, Vol. 87, pp.1–14, 2004.
 28. Z. M. Zhang, C. J. Fu, and Q. Z. Zhu, Optical and Thermal Radiative Properties of Semiconductors Related to Micro/Nanotechnology, *Advances in Heat Transfer*, Vol. 37, pp. 179-296, 2003.
 29. P. Yeh, *Optical Waves in Layered Media*, Wiley, New York, 1988.
 30. Z. M. Zhang, L. M. Hanssen, and R. U. Datla, Polarization-dependent angular reflectance of silicon and germanium in the infrared. *Infrared Physics & Technology*. Vol. 37, pp.539–546, 1996.
 31. Frank P. Incropera, and David P. DeWitt, *Fundamentals Of Heat and Mass Transfer*, Seven Edition, pp. 810-811, John Wiley and Sons, 2011.
 32. G. E. Jellison and F. A. Modine, Optical Functions of Silicon at Elevated Temperatures, *Journal of Applied Physics*, Vol. 76, pp.3758-3761, 1994.
 33. E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids* (ed.), pp. 280-598, San Diego, CA., 1998.
 34. H. H. Li, Refractive Index of Silicon and Germanium and Its Wavelength and Temperature Derivatives, *Journal of Physics*