

طراحی و تحلیل به دام اندازی نور برای سلول‌های خورشیدی گالیوم آرسنیک فیلم نازک با استفاده از دو بعدی ساختارهای کریستال فوتونی در سطح جلویی

خلاصه: این مقاله طرحی را پیشنهاد می‌کند که با استفاده از ساختار کریستال فوتونی دو بعدی (PhC) بر اساس سلول خورشیدی گالیوم آرسنیک فیلم نازک با اتصال ناهمگون با یک الگوی متناوب که از اکسید پذیری بالا (TCO) تا داخل لایه پنجره p-AlGaAs که درست بالای لایه فعال مواد GaAs قرار دارد، طراحی می‌کند. این مقاله مطالعه نوری نظری و بهینه‌سازی تمامی پارامترهای مورد نیاز را ارائه می‌دهد. این مقاله یک مطالعه بهینه‌سازی نوری برای سلول لایه فعال نازک را در روش تعمیم‌یافته برای لایه فعال ۵۰ نانومتری نشان می‌دهد و سپس عملکرد ساختار پیشنهادی با محدودیت Lambertian و سلول مسطح در نظر گرفته می‌شود. پیش‌بینی شده‌است که این ساختارهای تناوبی در مقیاس طول موج، عملکرد سلول را به شدت افزایش می‌دهند. بهبود در عملکرد اساساً برای قابلیت پراش (انکسار) بهتر، تطبیق امپدانس، به دام انداختن فوتون‌های دارای طول موج بالا و کاهش انعکاس از بالا به دلیل ساختار PhC محاسبه می‌شود. پارامترها بهینه‌سازی شده‌اند و با استفاده از تحلیل موج محکم کوپل شده (RCWA) محاسبه شده‌اند.

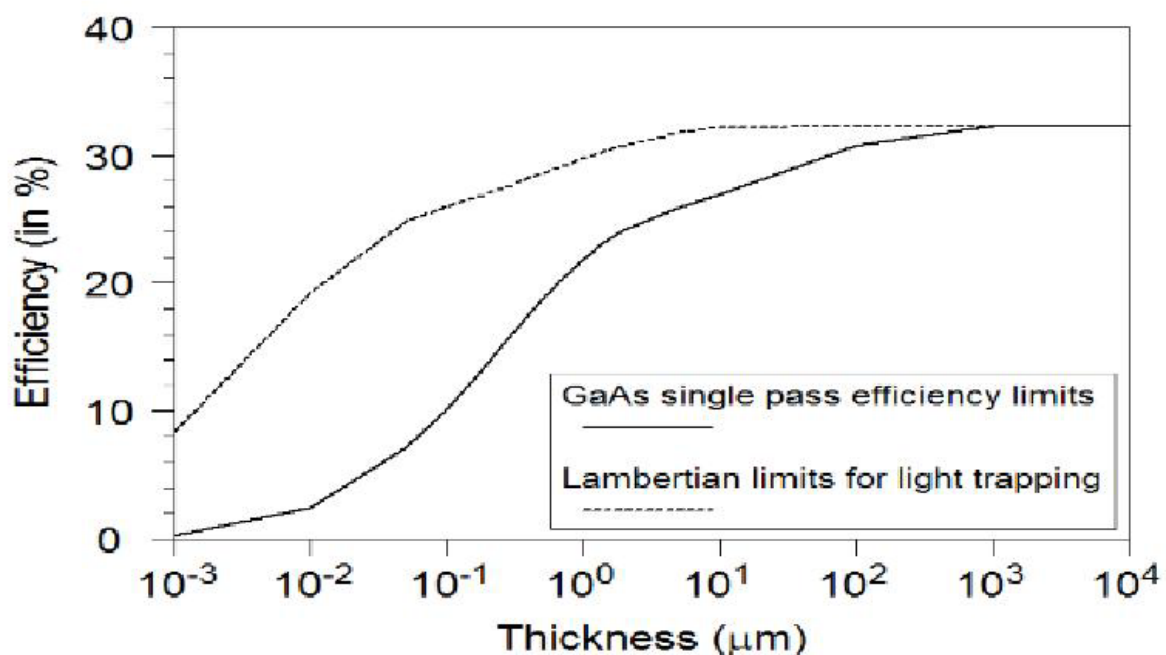
1. مقدمه

فناوری‌های فتوولتائیک (PV) اساساً از مشکل نسبت کارایی کم به هزینه رنج می‌برند. بیشتر هزینه‌های یک سلول خورشیدی اساساً با ضخامت لایه جذبی ایجاد می‌شود. بنابراین کاهش ضخامت لایه فعال بدون مصالحه با کارایی ممکن است مقبولیت وسیع‌تری برای فناوری‌های PV فراهم کند. در چند دهه اخیر، فناوری‌های فیلم‌های نازک نشان داده‌اند که توانایی ارائه راه حلی برای این مشکل دارند [1, 2]. نازک کردن مواد فعال آنالیز شده در این مقاله، یعنی گالیوم آرسنیک، به دلیل هزینه بالای آن، از همه مهم‌تر است. گالیوم آرسنیک چندین ویژگی دارد، مانند یک شکاف نواری مستقیم که آن را ماده‌ای خاص برای کاربردهای سلول خورشیدی می‌سازد [3]، اما به دلیل هزینه بالای آن‌ها معمولاً برای کاربردهای زمینی ترجیح داده نمی‌شود.

اگرچه، به نظر می‌رسد که فناوری‌های فیلم نازک، همه راه‌حل سلول‌های خورشیدی حجیم را دارند، اما آن‌ها از مشکل بهره‌وری پایین رنج می‌برند زیرا بخش بزرگی از طیف در دسترس به دلیل جذب ناقص از دست می‌رود. بنابراین برای بهبود این جذب، نوع خاصی از تکنیک به دام انداختن نور باید معرفی شود، که در آن طول مسیر نوری فوتون‌ها برخوردی در لایه فعال عملاً بیشتر از عمق جذبی مورد نیاز برای جذب این فوتون‌ها و در نتیجه آن‌ها می‌توانند جذب شوند و آن هم بدون افزایش ضخامت سلول خورشیدی.

Cody و Yablonovitch [۴ ، ۵] اولین بار این مفهوم را برای مواد دارای جذب بسیار ضعیف و راه‌حل‌های تحلیلی به‌دست‌آمده برای افزایش مسیر نور با نور ایده‌آل Lambertian ایده‌آل ، برای هر درجه‌ای از جذب در ماده فعال ، معرفی کردند .

براساس این راه‌حل‌ها [6] ، شکل ۱ نشان داده‌است که مقایسه به دام اندازی نوری Lambertian و بازده سلول عریان برای مواد فعال GaAs به ضخامت خاص بدون هیچ نوع از ساختار به دام انداختن نور (LTS) برای شرایط ایده‌آل نشان داده‌است . به راحتی می‌توان این شکل را آنالیز کرد که یک LTS بهینه‌سازی‌شده در یک سلول نازک‌تر می‌تواند بازده یکسانی داشته باشد که در غیر این صورت می‌تواند با یک سلول بسیار ضخیم‌تر به دست آید و در نتیجه می‌تواند هزینه کلی دستگاه را کاهش دهد. بنابراین ، طراحی از تلفات کم نزدیک به LTS ایده‌آل ، نیاز به دستیابی به سلول‌های فیلم نازک با کارایی بالا ، داشتن مقادیر نزدیک به محدوده Shockley-Queisser (S-Q) است [7] . پارامترهای مادی مورد استفاده در این شکل از [۸] گرفته شده‌است .



شکل 1 نمودار کارایی سلول بر حسب ضخامت لایه فعال برای سلول خورشیدی مبتنی بر GaAs با استفاده از طیف تابش خورشید AM1.5 [9] . حالت ایده‌آل بدون در نظر گرفتن هرگونه تلفات در نظر گرفته شده‌است .

معمولاً یک لایه محافظ ضد انعکاس صفحه‌ای (ARC) در لایه بالایی و فلزی در پایین به عنوان یک رفلکتور پشتی (BR) برای به دام انداختن نور در سلول‌های خورشیدی استفاده شده‌است. با این حال، عملاً تا به امروز به دلیل نواقص ساختار ذکر شده فوق [10, 11] ، حتی نیمی از مقدار نشان داده‌شده در [4, 6]، به دست نمی‌آید. به همین دلیل، چندین LTS جدید پیشنهاد شده‌است که از استفاده از سطوح زمخت [12] طور تصادفی، تا ساختارهای فلزی پلاسمونیک ارائه شده‌است. محققان همچنین به دنبال طرح‌های ساختاری

جدید شامل کریستال‌های فوتونی پیشنهاد داده شده (کریستال فوتونی) [3, 14, 15] هستند. اگرچه در مورد LTS تصادفی، افزایش را می‌توان در طیف وسیعی به دست آورد، این ساختارها برای مهندسی و بازتولید سخت هستند. LTS متناوب دارای این مزیت است که پارامترهای هندسی می‌توانند به راحتی متفاوت باشند و کل ساختار می‌تواند به طور کامل با استفاده از تکنیک‌های لیتوگرافی مدرن مهندسی شده باشد، که یکی از انگیزه اصلی برای این کار نیز هست.

سلول‌های خورشیدی مبتنی بر PhC نسبت به دهه گذشته علاقه زیادی ایجاد کرده‌اند، چرا که به کنترل و دستکاری تعامل کم نور به عنوان هر الزام اجازه می‌دهند. مطالعات متعددی در مورد این موضوع از جمله PhC به عنوان یک رفلکتور پشتی تلفات کم تک دی‌الکتریک [16, 17]، PhC به عنوان یک توری پراش [3, 15, 18, 19]، طراحی PhC درون خود مواد جذب [20, 21] انجام شده‌است. با این حال، بیشتر این مطالعات بر پایه مواد فعال Si، با استفاده از PhC LTS یا در پشت (به جز تعداد کمی) ARC یا در پشت لایه فعال می‌باشند. بنابراین، نیاز به کاوش اثر PhC LTS در بالا وجود دارد، که می‌تواند هم به عنوان ARC و هم برای به حداکثر رساندن کوپلینگ نور برخوردی، برای سلول خورشیدی نازک GaAs به کار برده شود.

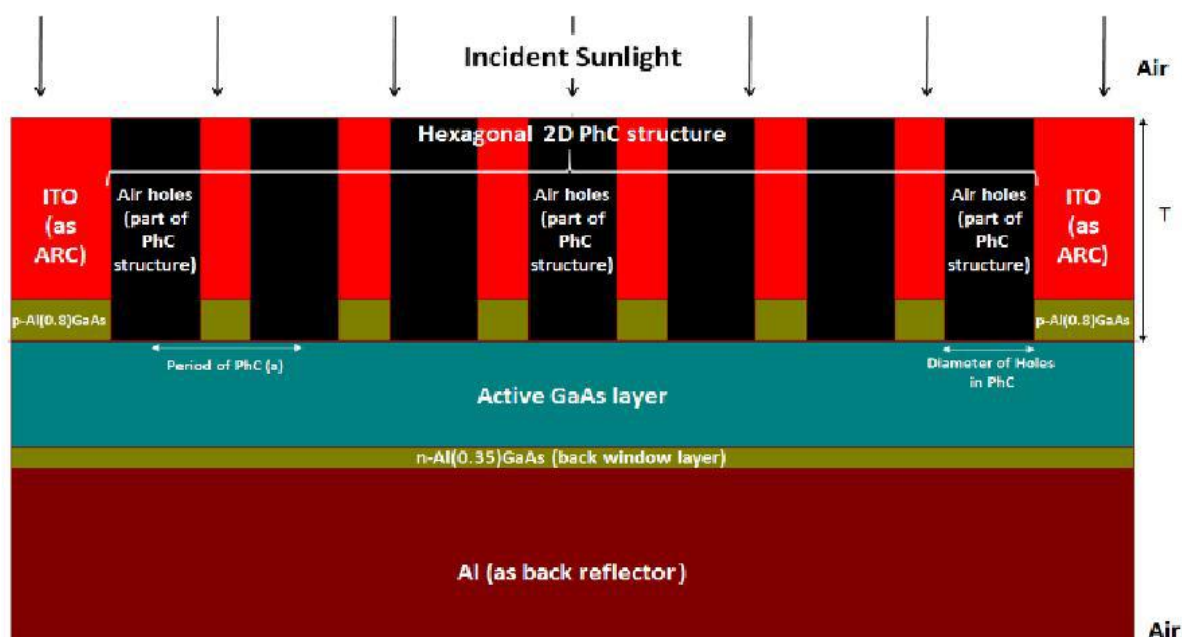
در این مقاله، ما به صورت ایتیکی، کارایی LTS متشکل از ساختار PhC را در بالا، که روی اکسید قلع ایندیوم (ITO) و لایه ی پنجره ی p-AlGaAs که به دنبال آن لایه ی فعال GaAs با ضخامت 50 نانومتری که لایه های پنجره ای پشتی n-AlGaAs را دارد، بهینه سازی و آنالیز کردیم. یک لایه مسطح BR از آلومینیوم (Al) در پایین قرار داده می‌شود. در اینجا ساختار PhC نه تنها به تطبیق شاخصی برای نور برخوردی کمک می‌کند، بلکه به کوپلینگ نور برخوردی به لایه جذب کمک می‌کند و در عین حال به افزایش طول مسیر نوری برای فوتون با طول موج بلند از طریق پراش کمک می‌کند و در نتیجه به بهبود جذب در کل طیف خورشیدی کمک می‌کند. علاوه بر این، PhC LTS نیز زاویه گریز را برای فوتون‌ها که به سمت بالا حرکت می‌کنند افزایش می‌دهد، در نتیجه به افزایش عملکرد زاویه‌ای دستگاه هم کمک می‌کند.

از معادلات ماکسول برای بهینه‌سازی و تجزیه و تحلیل اثر ساختار PhC [22] استفاده می‌شود و برای محاسبه این معادلات و محاسبه جذب در لایه فعال، روش عددی تحلیل موج با شدت قوی (RCWA) استفاده می‌شود [20, 18, 23]. عملکرد نوری ساختار از طریق محاسبه جذب در ناحیه فعال و بازتابندگی ناشی از سطح بالا از طریق کارایی کوانتومی و اندازه‌گیری منحنی I-V مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌است [24, 25]. ما همچنین عملکرد زاویه‌ای دستگاه را با ارجاع به زاویه برخورد گزارش کردیم و همچنین افزایش جذبی در دستگاه را نشان دادیم. سپس تجزیه و تحلیل کردیم و عملکرد دستگاه با عملکرد Lambertian و ساختار مرجع مسطح با استفاده از ARC مسطح و BR را بررسی و مقایسه کردیم. مشاهده شده‌است که افزایش بازده سلول نسبی ۱۲۷٪ و ۲۶٪ را می‌توان با PhC LTS پیشنهاد

کرد که در مقایسه با بازده تک پاس و سلول مسطح است. این امر به وضوح اثر PhC LTS در بهبود عملکرد سلول را نشان می‌دهد، با این حال، هنوز نتایج به دست آمده زیر محدوده Lambertian هستند.

2. طراحی ساختار پیشنهادی

طرح پیشنهادی PhC LTS film based GaAs به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است. سلول مسطح بدون داشتن PhC LTS دارای یک ARC مسطح از ITO، با ضخامت یکسان، که برای ساختار PhC استفاده می‌شود به عنوان یک سلول مرجع برای مقایسه استفاده شده است. فرض می‌شود که نور خورشید از بالای سازه بر صفحه تناوب PhC برخورد کند. طیف خورشیدی به عنوان طیف زمینی AM1.5 شناخته می‌شود [9]. محیط اطراف دستگاه به عنوان هوا در نظر گرفته می‌شود. PhC LTS دو بعدی در بالا یک آرایش شبکه‌ای شش ضلعی دارد، چون پراش بهتری را در مقایسه با مونتاژ مربع فراهم می‌آورد [26]. ساختار PhC در نظر گرفته می‌شود که دارای حفره‌های هوا در پس زمینه ITO می‌شود که پس از آن توسط لایه پنجره $\text{Al}(0.8)\text{GaAs}$ دنبال می‌شود. لایه فعال GaAs در زیر لایه پنجره قرار داده می‌شود. لایه پنجره پستی $\text{Al}(0.35)\text{GaAs}$ در زیر لایه فعال دنبال شده توسط Al BR قرار داده می‌شود. در این مقاله، پارامترهای وابسته به طول موج برای GaAs و AlGaAs [8]، Al [27] و ITO [28] در نظر گرفته می‌شوند.



شکل 2: دیاگرام شماتیک سلول GaAs فیلم نازک (جهت x-z، نمای افقی) با PhC LTS در بالا به کمک رفلکتور Al پستی

لایه‌های پنجره نازک AlGaAs ، با داشتن گاف نواری بالاتر و آرایش به شدت آرایش شده، در تماس با لایه فعال قرار می‌گیرند، زیرا آن‌ها یک هدف مهم برای منحرف کردن حامل‌های اقلیت از اتصالات به منظور کاهش باز ترکیب سطحی جلو و عقب هستند [1، 16، 29]. AL BR در نظر گرفته می‌شود تا حد امکان

یک رفلکتور فلزی ایده‌آل باشد. ITO در بالا مورد استفاده قرار گرفته‌است، زیرا ضریب شکست (RI) به مربع حاصلضرب RI هوا در GaAs (0.85) Al نزدیک است، شرط مورد نیاز برای یک ماده برای فراهم کردن تطبیق امپدانس خوب برای به حداقل رساندن بازتاب‌ها از بالا [3, 28]. علاوه بر این، ITO همچنین این الزام را برآورده می‌کند که ساختار PhC باید حداقل جذب همراه با ضریب شکست بزرگ، به منظور ایجاد پراش بزرگ باشد.

وسیله‌ای که در شکل ۲ نشان داده شده، ساختار PhC دو بعدی دارد که در آن a نشان‌دهنده تناوب خود دارای سوراخ‌های هوایی دایره‌ای به شعاع R و عمق حکاکی، T ، گسترش از لایه ITO بالا تا لایه p -Al (GaAs) 0.8 است. در اینجا، PhC مورد استفاده در بالا به جای عقب [20, 21] به منظور ایجاد یک ساختار عملی تر از نقطه‌نظر ساخت بکار رفته‌است زیرا طراحی ساختار PhC در بالا بدون ایجاد اختلال در لایه‌های زیرین، آسان‌تر است. همچنین نیازی به پر کردن حفره‌های موجود در ساختار وجود ندارد، فقط به منظور اجازه دادن به لایه‌های ته‌نشین شده در بالا. بنابراین، کنتراست شاخص بالاتر را می‌توان در طراحی PhC به دست آورد.

3. محاسبات نظری عددی و محاسبه کارایی

در طول شبیه‌سازی، جذب، انعکاس و انتقال با استفاده از روش RCWA محاسبه شده‌است [30, 31]. آن میدان الکترومغناطیسی را به صورت مجموع امواج کوپله، نشان می‌دهد. یک تابع گذردهی الکتریکی متناوب با استفاده از هارمونیک‌های فوریه نمایش داده می‌شود. هر موج کوپل شده به هارمونیک فوریه تبدیل می‌شود که امکان حل معادلات ماکسول را در حوزه فوریه فراهم می‌کند. سپس بازده پراش در پایان شبیه‌سازی محاسبه می‌شود. نرم‌افزار DiffractionMod RSoft در دسترس، براساس روش RCWA برای انجام تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی سه‌بعدی استفاده شده‌است [۳۲].

در اینجا تعداد هارمونیک‌ها، M نقش مهمی در تعیین صحت نتیجه ایفا می‌کند، چون از آن برای گسترش ضریب شکست و میدان در فضای فوریه استفاده می‌شود. هرچه تعداد Of مورد استفاده قرار گیرد، شبیه‌سازی دقیق‌تر خواهد بود، اما برای آن زمان شبیه‌سازی و حافظه بیشتری مورد نیاز است. بنابراین، یک مطالعه هم‌گرایی در تعداد هارمونیک‌ها با هارمونیک‌های مختلف انجام شده‌است تا مشاهده شود نتایج شبیه‌سازی چگونه تغییر می‌کند. نتایج تقریباً برای M برابر یا بیشتر از ۵ می‌شود، بنابراین برای تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی M برابر با ۵ است.

به منظور حل معادلات شبیه‌سازی، ساختار به عنوان یک ساختار متناوب چند لایه در نظر گرفته شده‌است که به توده‌ای از لایه‌ها که دارای یک ناحیه همگن هستند تجزیه می‌شود. این رویکرد نه تنها شناخت فیزیکی را به مساله تسهیل می‌کند بلکه مزایای عددی مهمی نیز فراهم می‌کند [۲۰]. این الگوریتم، ساختار را برای داشتن شرایط مرزی متناوب به طور افقی در نظر می‌گیرد (PBC). ساختار چند لایه در

جهت عمودی (جهت Z) طراحی شده است که دارای ساختار متناوب در جهت γ - x است . برای اهداف شبیه سازی ، ما تنها از یک تناوب منفرد از ساختار در ابعاد γ - x استفاده کردیم ، با در نظر گرفتن PBC .

همان طور که انگیزه این مطالعه نشان دادن اثر نوری PhC LTS و مکانیزم پشت تله گذاری نور در این ساختارها است ، ما وارد جزئیات مجموعه حامل بار نشده ایم . از آنجا که کار عمدتاً مربوط به اپتیکی است به جای ویژگی های حمل و نقل سلول ، بازده کوانتوم داخلی برابر با یک تنظیم شده است . در عوض ، ما تلاش کرده ایم تا تلفات الکتریکی را با ترکیب از تلفات در کارایی جمع آوری و از طریق اثرات shadowing ترکیب کنیم . برای محاسبه راندمان سلول خورشیدی ، ما طیف جذبی نوری کل ، $A(\lambda)$ از کل دستگاه را از طریق روش RCWA محاسبه کردیم ، که مجموع طیف های جذبی در هر لایه است ، $A(\lambda)$ به عنوان $A(\lambda) = \sum_i A_i(\lambda)$. در اینجا ، جذب در لایه فعال به عنوان تنها جذب مفید ، به منظور در نظر گرفتن تنها حامل های بار مفید در نظر گرفته شده است . با در نظر گرفتن طیف های بالا ، تعداد فوتون های جذب شده در طول موج در هر لایه به صورت زیر است :

$$n_i(\lambda) = \frac{S(\lambda)A_i(\lambda)}{E(\lambda)} = \frac{\lambda}{hc} S(\lambda)A_i(\lambda) \quad (1)$$

که در آن $S(\lambda)$ مشخصه طیف برخوردی [9] و $E(\lambda)$ انرژی فوتون برخوردی برابر با hc/λ است که h ثابت پلانک و c سرعت نور در خلا است. تعداد ترکیب جفت حفره-الکترون تولید شده در طول موج λ و جمع آوری شده توسط الکترودها به صورت زیر داده می شود [1] :

$$n_{e-h}(\lambda) = \sum_i \eta_i n_i(\lambda) = \frac{\lambda}{hc} \sum_i \eta_i S(\lambda)A_i(\lambda) \quad (2)$$

که η_s و η_i به ترتیب ، اثرات سایه و بازده جمع آوری را نشان می دهند . در اینجا ، بازده جمع آوری 90٪ براساس نتایج قبلی در نظر گرفته می شود [33] ، در حالی که اثرات سایه به ترتیب برابر با 6.6٪ در نظر گرفته شده است [29] . بنابراین تعداد کل جفت های الکترونی حفره جمع آوری شده توسط الکترودها :

$$N_{e-h} = \int_{\lambda} n_{e-h}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

برای شبیه سازی های ما انتگرال بالا از 300 تا 1000 نانومتر (در مراحل 1 نانومتر) گرفته شده است . وقتی شار فوتون زیر این مقدار 5 . AM1 طیف خورشیدی در استاندارد کم است ، مقدار پایین تر طول موج مشخص شد . در حالی که حد بالایی با در نظر گرفتن فاصله باند مواد GaAs در دمای اتاق که حدود 1.43 eV است ، در نظر گرفته شده است [34] . این جذب در بالای این شکاف نواری در نظر گرفته می شود . با استفاده از معادله بالا ، چگالی جریان اتصال کوتاه ، J_{sc} می تواند به صورت $J_{sc} = qNe-h$ محاسبه شود ، که در آن q بار الکترونیکی و V_{oc} ، ولتاژ مدار باز از $V_{oc} = (kT/q) \ln(J_{sc}/J_{s0} + 1)$ (بر حسب

(V) بدست می‌آید، که در آن k ثابت بولتزمن، $kT = 300$ است، و JS جریان اشباع بایاس معکوس است. با استفاده از این مقادیر محاسبه شده از مقدار [sc] J و [oc] V، بازده سلول‌های خورشیدی را می‌توان به صورت زیر اندازه‌گیری کرد:

$$\eta = \frac{\Gamma_{sc} V_{oc} J_{sc}}{P_{in}} \quad (4)$$

توان برخوردی، در حالی که vm و jm نشان‌دهنده ولتاژ و چگالی جریان در نقطه حداکثر توان هستند. در این مقاله، ما نتایج خود را با محدودیت‌های Lambertian در سلول‌های خورشیدی مقایسه کردیم. این محدودیت‌ها برای اولین بار با توجه به سه فرضیه اصلی [۴، ۵]، به صورت زیر بدست آمدند:

۱. این دستگاه دارای Lambertian scatter در جلو یا عقب است، که یک نور تصادفی با توزیع ایزوتروپیک در هر مقدار انرژی، صرف‌نظر از تلفات ذاتی مواد، دارد.
۲. ماده فعال دارای جذب ضعیفی برای طیف نور خورشیدی در نظر گرفته می‌شود. این شرط به صورت زیر داده می‌شود:

$$4n^2 \alpha t \ll 1 \quad (5)$$

- که در آن n ضریب شکست، α ضریب جذب و t ضخامت لایه فعال است.
۳. پارامتر t بسیار بزرگ‌تر از طول موج درون آن، λ/n است که بحث نور را برای تحلیل مناسب می‌سازد. بر پایه این فرضیات، تعیین کمی میزان جذب $\alpha(\lambda) t_{eff}$ ، از نظر c، که t_{eff} طول مسیر موثر برای فوتون درون لایه فعال برای ساختار داده شده می‌باشد، امکان پذیر شده است. با استفاده از همان فرضیات، جذب در یک عبور فوتون منفرد، $As(\lambda)$ از طریق صفحه مسطح بدون در نظر گرفتن تلفات انعکاسی بر پایه محصول X می‌تواند به صورت زیر داده شود:

$$A_z(\lambda) = 1 - e^{-\alpha(\lambda)t} \quad (6)$$

همان معادله (۶) برای محاسبه محدوده‌های بهره‌وری تک خروجی نشان داده شده در شکل ۱ استفاده شده است. حال، طبق فرضیه Yablonovitch، بیش‌ترین افزایش را می‌توان در حالت سلول مسطح که توسط یک محیط ایزوتروپیک احاطه شده $4n^2/\sin^2 \gamma$ و در آن $\sin \gamma$ برای مورد ایزوتروپیک یک در نظر گرفته می‌شود، بدست آورد. بنابراین، در اینجا جذب محاسبه شده توسط معادله (۶) به صورت زیر اصلاح می‌شود:

$$A_{LIT}(\lambda) = 1 - e^{-4n^2 \alpha(\lambda)t} \quad (7)$$

این محاسبات با در نظر گرفتن موارد ایده آل انجام شده است. در اینجا، I_{ly} بیانگر جذب در مورد محدود Lambertian [۴] است ما این افزایش مسیر نور را با استفاده از عبارات LLG نشان داده ایم. در غیر این صورت، در بخش های بعدی حد Lambertian به معنای حد تغییر یافته توسط گرین در [۶] است. ما همچنین ضریب افزایش جذب F که به صورت [۲۰] تعریف می شود را محاسبه کرده ایم،

$$F(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{A_z(\lambda)} = \frac{A(\lambda)}{1 - e^{-a(\lambda)l}} \quad (8)$$

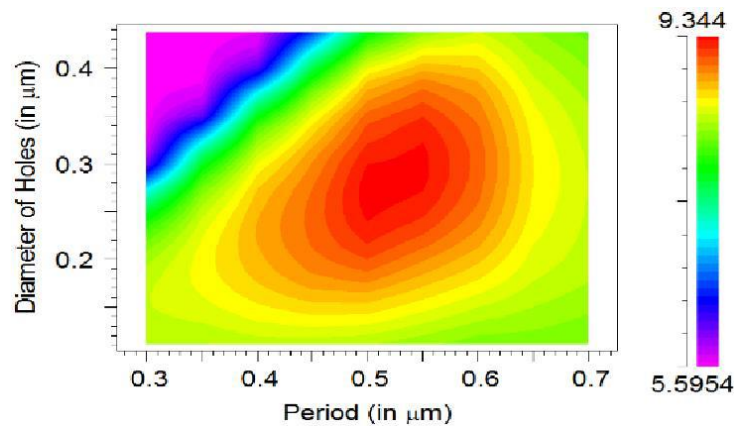
این ضریب افزایش با توجه به بازده تک عبوری محاسبه شده است (با در نظر گرفتن تلفات).

4. بهینه سازی ساختار

این بخش جزییات مطالعه بهینه سازی ساختار پیشنهادی را نشان می دهد. به منظور حفظ مسایل عملی در ذهن، که در آن پارامترهای مختلف بر یکدیگر در هنگام طراحی یک دستگاه اپتو - الکترونیکی بر همدیگر تاثیر می گذارند، ما از نقشه های منحنی برای نشان دادن بهینه سازی این ساختارهای فوتونی استفاده کرده ایم. بهینه سازی دستگاه لایه نازک ۵۰ نانومتری شامل بهینه سازی تناوب، a ساختار PhC همراه با شعاع آن، R یا قطر حفره های هوا مدور، D که هم چنین نسبت پر کننده برای مواد پس زمینه را تعریف می کند، T ، که شامل بهینه سازی ضخامت لایه های جلوی پس زمینه ITO می شود و در زیر لایه پنجره Al GaAs (0.8) قرار دارد. فرآیند بهینه سازی مورد استفاده در این مقاله از [۲۱، ۳۵] به ارث رسیده است.

در ابتدا برای شروع مطالعات شبیه سازی، ضخامت لایه مواد فعال در یک مقدار خاص ثابت نگه داشته شده (در اینجا 50 نانومتر برای هدف نمایش). لایه پنجره پشتی بدون الگوی Al GaAs (0.35) با استفاده از مطالعات انجام شده قبلی روی 10 نانومتر تنظیم شده اند، از این که لایه پنجره ضخیم تر عملکرد دستگاه را کاهش دهد مشخص شده است [36]. ضخامت صفحه فلزی Al BR به ۸۰ نانومتر ثابت شده است، که از طریق روش بهینه سازی همانطور که در بالا ذکر شد، برای به حداکثر رساندن بازتاب ها از BR به یک لایه فعال پیدا شده است. ابتدا یک نقشه منحنی برای کارایی سلول با تغییر همزمان مقادیر a و D سوراخ های هوایی برای بهینه سازی ساختار PhC محاسبه شده است. نقشه منحنی برای کارایی سلول بین a و D در شکل ۱ نشان داده شده است.

این شکل نشان می دهد که مقدار بهینه a در حدود ۵۰۰ نانومتر یافت شده است و مقدار D در حدود ۲۷۵ نانومتر پیدا شده است، بنابراین نسبت D/a تا حدود ۰.۵۵، است، در نهایت این نسبت، نسبت پر کردن برای الگوی بهینه طرح PhC را تعریف می کند. این مقدار فرض می شود که کوپلینگ نور برخوردی را از PhC به لایه جذبی به حداکثر برساند و در نتیجه توزیع انبوهی از پیک های جذب را برای محدوده طول موج مطلوب تولید می کند. بنابراین ساختار PhC در اینجا پراش فوتون به سمت لایه جذب را به حداکثر می رساند و جذب فوتون ها مفید در LTS جلویی و پراش در هوا را به حداقل می رساند.



شکل 3 - نقشه منحنی نشان‌دهنده بهینه‌سازی قطر حفره‌های هوا با اشاره به ثابت شبکه (a) از ساختار PhC است. رنگ‌های مختلف بازده محاسبه‌شده برای سلول ۵۰ نانومتری را نشان می‌دهند.

به منظور انجام این تابع پراش، تناوب ساختار PhC باید بزرگ‌تر از طول موج نور در لایه فعال باشد یعنی $a > \lambda/n(\lambda)$ ، که در آن $N(\lambda)$ ضریب شکست مواد فعال در آن طول موج خاص است. همانطور که در هر دو پارامتر مواد GaAs استفاده می‌شود، این شرط اساساً به مقدار برابر با حدود ۲۰۰ نانومتر راضی است. با این حال، برای یک ماده فعال ضخامت خاص با استفاده از شبکه پراش PhC، چندین شوک پراش در کل طیف خورشیدی ایجاد می‌شود که اساساً همپوشانی داشته و منجر به بهبود کلی کارایی می‌گردد [۱۵، ۱۹]. اجازه دهید، برای ضخامت لایه t_{Act} ، تمام این فرکانس‌های تشدید باید یک فاز گرد از تغییر $2m\pi$ داشته باشند، به طوری که $k_{\perp} = m\pi/t_{Act}$ که در آن k حرکت فوتونی را نشان می‌دهد و m نشان‌دهنده یک حالت خاص است. طول موج حالت تشدید پراش بدست می‌آید [۳، ۱۷]:

$$\lambda = \frac{2\pi n(\lambda)}{\sqrt{G_x^2 + G_y^2 + (m\pi/t_{Act})}} \quad (9)$$

که در آن n ضریب شکست ITO/Al(0.8)GaAs است، G_x و G_y مولفه‌های شبکه دوطرفه $G_x = i(2\pi/a)$ و $G_y = j(2\pi/a)$ هستند. تشدید پراش برای مقادیر صحیح i ، j و m رخ می‌دهد و قله‌ها را در جذب طول موج در نزدیکی لبه باند برای مقادیر تناوب بیش از ۳۵۰ نانومتر نشان می‌دهد که در شکل ۳ نشان‌داده شده است.

قبلاً نشان داده شد [۲۰] که زمانی که a لایه بسیار کوچک است (در مورد ما بیش از ۲۰۰ نانومتر)، تنها فوتون‌های با طول موج کم می‌توانند به لایه فعال برسند، در حالی که لایه PhC الگو به عنوان یکنواخت برای لایه‌های طول موج بالا ظاهر می‌شود، که در آن ضریب شکست لایه PhC با ضریب شکست موثر لایه الگو مشخص می‌شود. اگرچه، در این الگوی PhC از بالا و شکست در هوا به حداقل رسیده است، به دام انداختن نور تنها محدود به رژیم طول موج کوتاه است که در آن شار خورشیدی ضعیف است. با این حال، این بدان معنا نیست که ما می‌توانیم مقادیر بسیار بالایی از a را به دست آوریم، به عنوان افزایش ارزش آن، به دام انداختن (به دام انداختن) فوتون طول موج بالا، بلکه شکست در هوا را افزایش می‌دهد.

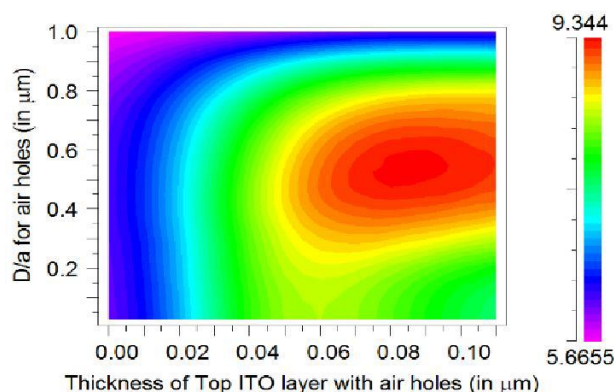
بنابراین ، نیاز به داشتن یک مقدار بهینه از a وجود دارد که نه تنها می‌تواند بازتاب را از بالا و شکست در هوا کاهش دهد بلکه به به دام انداختن نور بالای فوتون طول موج بالا نیز کمک کند . نتایج شبیه‌سازی نشان داده‌است که PhC LTS ، موثرترین هدایت و پراش را برای ۵۰۰ نانومتر فراهم می‌کند .

همانطور که قبلاً ذکر شد ، در حالتی که طول موج فوتون به بالاتر از تناوب PhC LTS تبدیل می‌شود ، سپس به جای رفتار به عنوان یک شبکه پراش رفتار می‌کند ، ساختار به عنوان یک لایه یکنواخت عمل می‌کند ، که شاخص موثر آن میانگین وزنی در ضریب شکست ساختار PhC است . این رفتار می‌تواند با به یاد آوردن عبارت شاخص موثر یک آرایش از حفره های هوا در پس زمینه دی الکتریک ، که می‌تواند به صورت زیر باشد ، تعیین شود :

$$\epsilon_{\text{eff}}(f) = \frac{1}{2} \left[f \cdot \epsilon_{\text{ITO}} + (1-f) \cdot \epsilon_{\text{Air}} + \frac{1}{f / \epsilon_{\text{ITO}} + (1-f) / \epsilon_{\text{Air}}} \right] \quad (10)$$

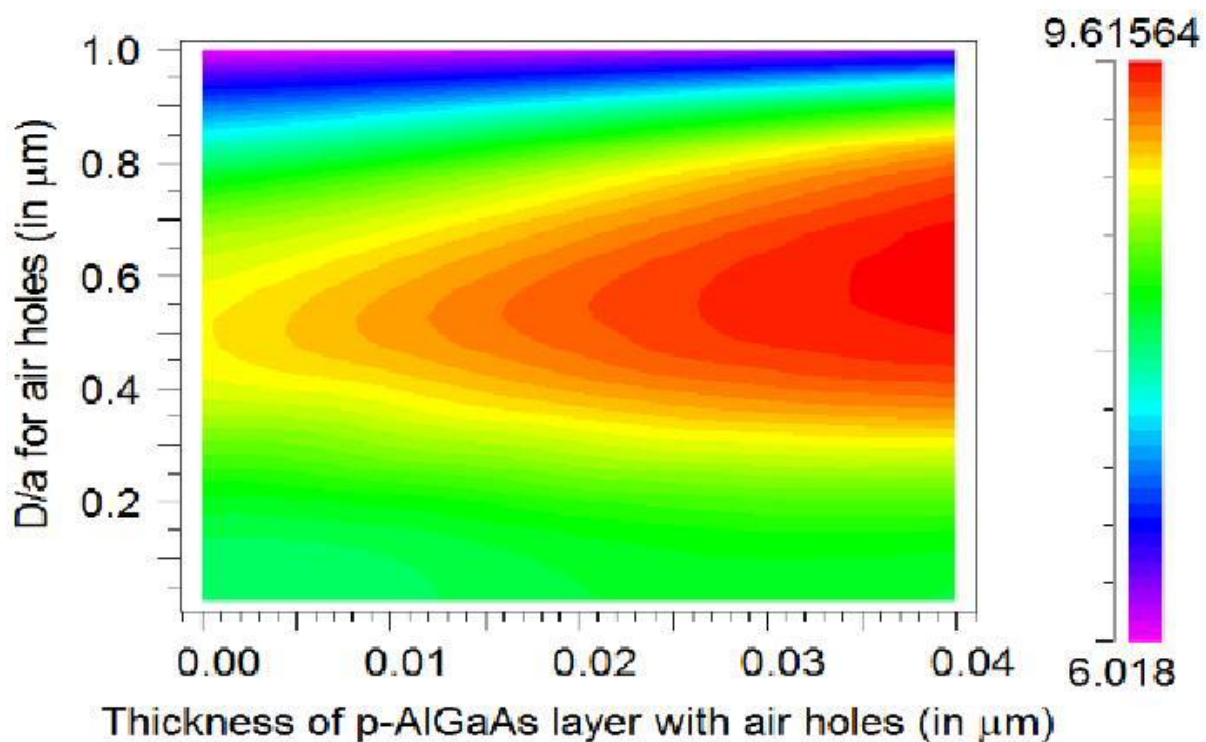
این معادله را می‌توان برای ساختار PhC در لایه P - AlGaAs زیر لایه ITO مورد استفاده قرار داد . در اینجا ، $f = \pi R^2 / ((\sqrt{3}/2) \cdot a^2)$ نسبت پر کننده برای ساختار شبکه شش ضلعی است . این امر ، اطلاعاتی را برای تطبیق شاخص موثر لایه جذبی با محیط تصادفی (که در مورد ما هوا است) فراهم می‌کند . با استفاده از مقادیر داده‌های موثر پارامترهای مورد استفاده در معادله (۱۰) ، مقدار R را می‌توان محاسبه کرد . نتایج بهینه‌سازی D در شکل ۳ نشان داده شده‌است ، که نشان‌دهنده مقدار بهینه‌شده در حدود ۲۷۵ نانومتر است ، که تقریباً نتایج شبیه‌سازی ما را تایید می‌کند .

شکل ۳ همچنین نشان می‌دهد که در صورتی که مقادیر a و D برای ساختار PhC ده درصد از مقادیر بهینه باشند ، بازده سلول تنها با ۱٪ متغیر است . بنابراین ، ما همچنین می‌توانیم استنباط کنیم که این ساختار تلرانس ساخت خوب را با توجه به یک تغییر در پارامترهای پیکربندی پیشنهادی نشان می‌دهد . بنابراین ، ساخت دستگاه پیشنهادی با استفاده از تکنیک‌های لیتوگرافی نانو وجود دارد و توانایی ارائه نتایج بهینه را دارد .



شکل ۴ - نمودار منحنی برای بهینه‌سازی کارایی سلول به عنوان تابعی از ضخامت لایه ITO که دارای PhC LTS و نسبت D/a برای پیکربندی سلول لایه ۵۰ نانومتری پیشنهادی است.

سپس ، بهینه‌سازی عمق PhC در ITO و p - AlGaAs به ترتیب با نسبت D/a همانطور که در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده‌است ، انجام شده‌است . عمق PhC LTS باید طوری باشد که کوپلینگ نور به لایه فعال باید به حداکثر برسد ، با جذب ناچیز در خود لایه و به طور خاص پرتو منعکس شده از PhC به هوا باید به حداقل برسد . مجموع ضریب بازتاب از ITO, p - AlGaAs و هوا باید برای مقدار ویژه T [۱۵] صفر شود . این کار به تطبیق امپدانس بین لایه برخورد و لایه فعال کمک می‌کند و در نتیجه به بهبود تزویج نور در لایه فعال کمک می‌کند . از شکل ۴ ، این مقدار بهینه ضخامت ساختار PhC با پس‌زمینه ITO در حدود ۸۵ نانومتر یافت می‌شود ، در حالی که ضخامت بهینه الگوی PhC حک در لایه پنجره p - AlGaAs ۴۰ نانومتر است . با این حال ، همانطور که در [۳۶] پیشنهاد شد ، لایه‌های ضخیم پنجره ممکن است اثر منفی بر عملکرد الکتریکی سلول داشته باشند، بنابراین به جای استفاده از ضخامت ۴۰ نانومتر لایه p - AlGaAs ، ما این ضخامت را به ۲۰ نانومتر محدود کرده‌ایم .



شکل ۵ - نمودار منحنی برای بهینه‌سازی کارایی سلول به عنوان تابعی از ضخامت $P - Al(0.8)GaAs$ با داشتن PhC LTS و D/a برای پیکربندی سلول لایه ۵۰ نانومتری پیشنهادی .

بنابراین T از بالا ۱۰۵ نانومتر می‌شود (۸۵ نانومتر در لایه ITO و ۲۰ نانومتر در لایه p - AlGaAs می‌شود) . از شکل ۴ و ۵ می‌توان فهمید که تِلرانس خوبی برای کارایی حول مقدار بهینه‌شده T و D/a وجود دارد و تنها حدود ۱٪ کاهش در بازده سلول نهایی وجود دارد ، برای حدود ۱۰٪ تغییرات در مقادیر بهینه .

در اینجا ، بهینه‌سازی یک ضخامت حکاکی مناسب برای ساختار PhC نقش مهمی را در افزایش کارایی سلول ایفا می‌کند ، به طوری که برش هدایت‌شده را تحریک می‌کند و شبکه PhC آن‌ها را از تابش تصادفی در دسترس قرار می‌دهد [۲۱] . همان طور که قبلاً ذکر شد ، این شرط مشابه شبکه پراش است ، که نور

برخوردی عادی را به جهت مورب منحرف می‌کند و در نتیجه طول مسیر برای آن فوتون طول‌موج را افزایش می‌دهد. امواج پراش شده در نزدیکی زاویه^۲ گریز در داخل ماده منتشر می‌شوند، با یک مسیر انتشار بزرگ، در نتیجه جذب در لایه فعال در محدوده طیفی گسترده را بهبود می‌بخشد. بنابراین، نقش PhC LTS این است که میدان تابش برخوردی را به حالت‌های اسلی هدایت شده کند، بدون اینکه به طور قابل توجهی خود حالت‌ها را تغییر دهد. این امر بهینه‌سازی طراحی ما را برای سلول GaAs لایه ۵۰ نانومتری کامل تکمیل می‌کند. پارامترهای بهینه در جدول ۱ خلاصه شده‌اند.

Table 1: Summary of the optimized parameters for the proposed 50 nm GaAs active layer cell

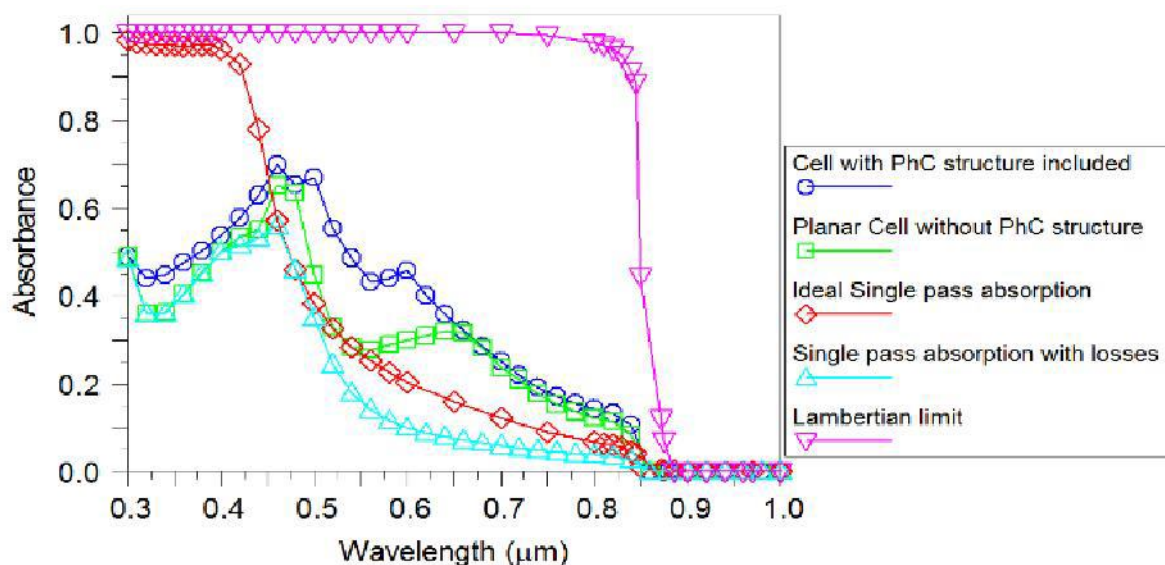
S. No.	Parameters	Values (nm)
1.	Anti-Reflection Coating (ITO having PhC structure etched)	85
2.	Thickness of p-Al(0.8)GaAs window layer (having PhC structure etched)	20
3.	Thickness of n-Al(0.35)GaAs back window layer	10
4.	Back reflecting layer of Aluminum	80
5.	Period of the PhC structure at the top (a)	500
6.	Diameter of the air holes etched in PhC structure (D)	275
7.	D/a (ratio)	0.55
8.	Thickness of the PhC structure etched from the top (etched in top ITO and p-AlGaAs)	105

5. نتایج و بحث‌ها

در این بخش، در مورد عملکرد سلول خورشیدی ۵۰ نانومتری پیشنهادی لایه نازک GaAs با PhC LTS از نظر جذب محاسبه‌شده و طیف انعکاسی، توزیع طیفی به صورت سرانه AM1.5 بحث خواهیم کرد. طیف، جذب جذبی در هر معادله (۸) و عملکرد زاویه‌ای با تغییر در زاویه نور اتفاق. نتایج با استفاده از حد Lambertian [۴، ۶] و ایده‌آل و کاربردی تک پاس عملی مقایسه می‌شوند. برای درک بهتر عملکرد در طرح پیشنهادی PhC LTS، ما نتایج را با یک سلول مرجع مقایسه کردیم.

برای شروع، طیف‌های جذب برای ضخامت لایه فعال ۵۰ نانومتری پیشنهادی PhC LTS را محاسبه کردیم و نتایج را با پیکربندی‌های مختلف همانطور که در موقعیت‌های قبلی ذکر شد، مقایسه کردیم. نمودار جذب محاسبه‌شده در شکل ۶ نشان‌داده شده‌است، که در آن به حداکثر مقدار نرمال شده تا واحد باشد، موردی که کل نور برخوردی جذب می‌شود. با شروع از یک مورد منفرد ایده‌آل، می‌توان مشاهده کرد که جذب به صورت نمایی بعد از ۴۰۰ نانومتر شروع به افت می‌کند و تقریباً بعد از ۴۵۰ نانومتر تقریباً ۵۰٪ افت می‌کند. این وضعیت حتی زمانی بدتر می‌شود که تلفات را شامل می‌شود، از جمله بازتاب از بالا، تلفات توان جمع‌آوری و اثرات shadowing در محاسبات برای یک مورد گذرا.

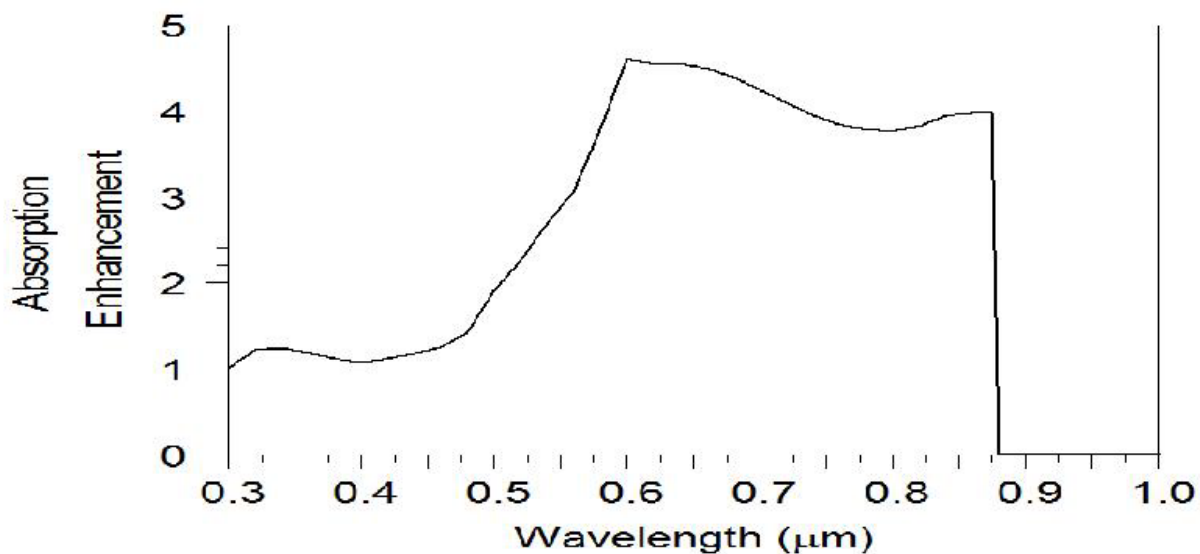
حال، مورد سلول مرجع داشتن LTS مسطح را در نظر بگیرید. از این شکل می‌توان مشاهده کرد که بعد از ۴۵۰ نانومتر، جذب در سلول مرجع افزایش یافته است، زیرا بعد از این طول موج اثر LTS ظاهر شده است زیرا ضخامت لایه فعال در خودش برای جذب کل طیف آن فراتر از این دامنه به دلیل مقدار کم ضریب جذب کافی نیست. همچنین به خاطر ARC در بالا، انعکاس نیز کاهش یافته است. سپس، در مورد سلول پیشنهادی PhC LTS که توسط خطوط آبی تیره در شکل نشان داده شده است، می‌توانیم مشاهده کنیم که افزایش در جذب برای تقریباً کل دامنه طول موج به عنوان PhC LTS در طراحی ما به دست می‌آید، نه تنها برای به دام انداختن فوتون های طول موج بالا بلکه برای به حداکثر رساندن کوپلینگ نور برخوردی با کاهش انعکاس از بالا. این ساختار از طریق ساختارهای PhC به عنوان ساختار الگو که تطبیق امپدانس بهتری را فراهم می‌کند، به دست آمده است. برای ساختار الگو، شکل خط تشدید گسترش می‌یابد برای افزایش انرژی، با توجه به این واقعیت که یک جذب درونی بالاتر، ویژگی‌های کندتر و گسترده‌تری را در طیف‌های جذب تولید می‌کند [۲۰، ۲۳]. در اینجا، افزایش جذبی تقریباً در حدود ۶۷۰ نانومتر را به اندازه فراتر از این محدوده متوقف می‌کند، اثر BR غالب می‌شود و هم سلول مرجع PhC و هم سلول مرجع دارای AI BR یکسان از ضخامت برابر هستند. از شکل، می‌توان مشاهده کرد که اگر چه ما می‌توانیم به کارایی بالاتر عملی با ساختار پیشنهادی دست یابیم، اما هنوز هم این کارایی تحت کارایی محدود Lambertian است.



شکل 6 محاسبه طیف جذبی برای سلول لایه فعال ۵۰ نانومتری GaAs با داشتن PhC LTS دو بعدی و مقایسه آن با ساختار پیشنهادی دیگر بدون هیچ الگو و حد Lambertian.

سپس، در شکل ۷، ضریب افزایش جذب را ثابت کردیم، F که طبق معادله (۸) محاسبه شد. این نمودار به وضوح نشان می‌دهد که در جذب در لایه فعال سلول GaAs به دلیل PhC LTS پیشنهادی و آن هم در کل محدوده طیف برخورد افزایش وجود دارد. این افزایش بعد از ۴۵۰ نانومتر برای دلیلی فراتر از این مقدار

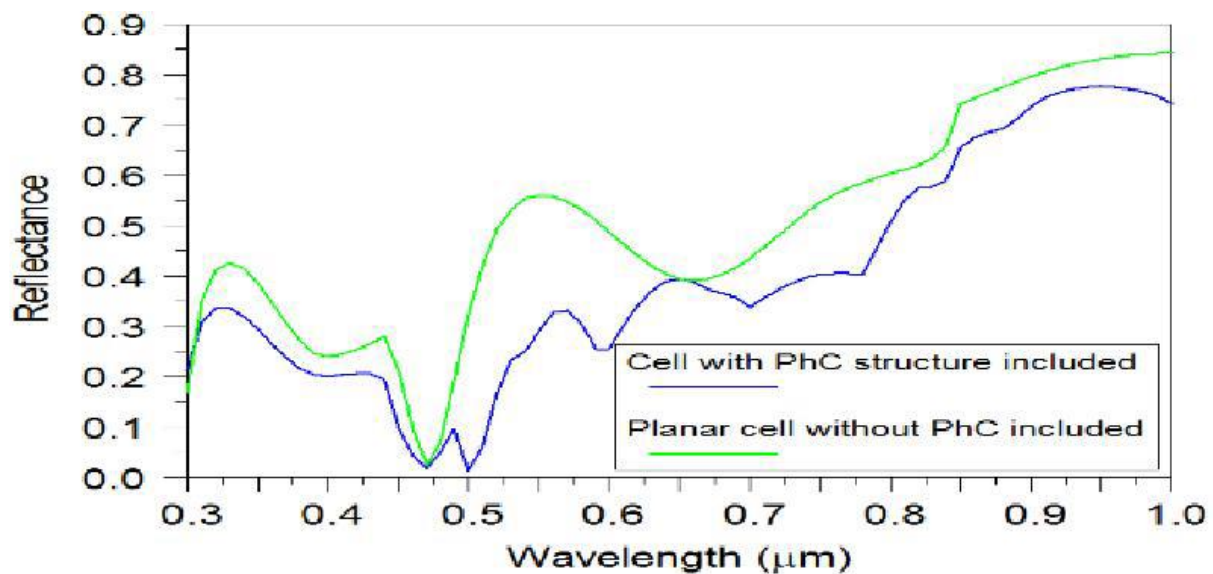
مشخص می‌شود، اثر LTS غالب می‌شود و عمدتاً مسئول هدایت، تزویج و انحراف فوتونی برای جذب در لایه فعال است.



شکل 7 نمودار افزایش جذب محاسبه شده برای لایه فعال ۵۰ نانومتری PhC LTS براساس معادله (۸).

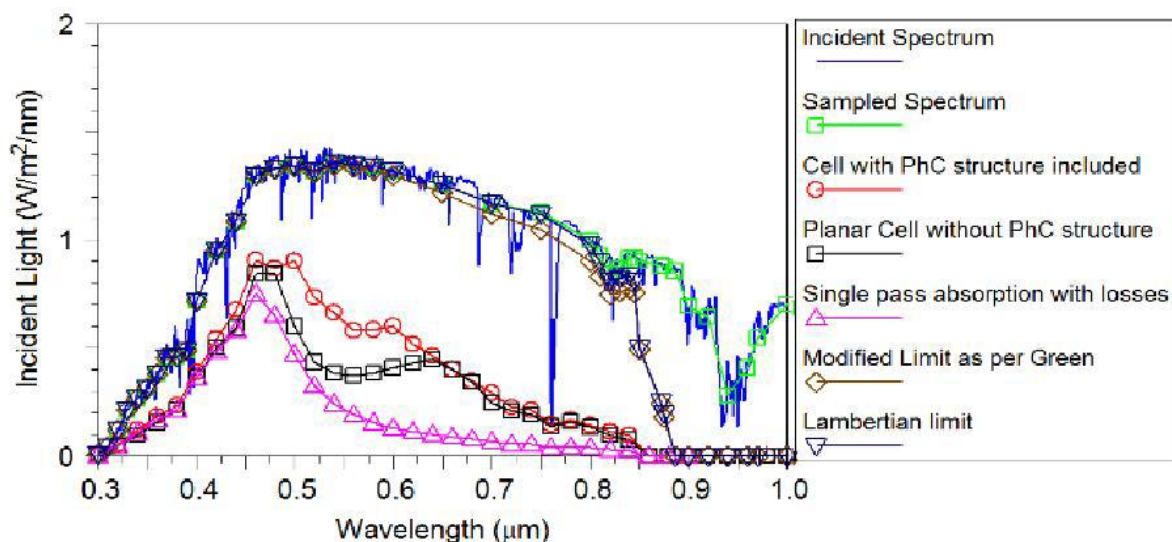
طیف‌های بازتابندگی محاسبه شده برای سلول GaAs پیشنهادی در شکل ۸ در مقایسه با سلول مرجع نشان داده شده است. در اینجا، بازتابندگی ناشی از ساختار شامل تمام دستورهای پراش است، و همانطور که از شکل مشاهده می‌شود، این بازتابندگی همیشه نسبت به سلول مرجع مسطح در مقایسه با سلول مرجع PhC LTS، کمتر است. این امر اساساً به این صورت اتفاق می‌افتد که ساختار PhC هم شرایط تطبیق امپدانس بهتر (همانطور که PhC LTS شاخص شکست موثر میانی را فراهم می‌کند) و هم به دام انداختن نور را فراهم می‌کند.

در طول موج‌های بلند، سهم انعکاس اساساً به دلیل جذب ناقص در لایه فعال است که تقریباً مکمل طیف جذبی است. در طول موج‌های کم، یک بازتاب باقی مانده وجود دارد، اما مشخص است که الگوهای میانی یک باند طیفی از بازتابندگی پایین ایجاد می‌کنند، که وسیع‌تر از سلول مرجع است. در سلول الگو برداری هنوز در هوا پراش به دلیل تعداد زیاد حالت‌های مجاز شکست وجود دارد [20]. این پراش در هوا می‌تواند با مقدار ثابت شبکه کوچک کاهش یابد، اما همانطور که قبلاً ذکر شد، تناوب ساختار PhC را نمی‌توان به مقدار بسیار کمی کاهش داد چون این امر به طور معکوس بر به دام انداختن فوتون‌های دارای طول موج بالا تاثیر می‌گذارد.



شکل 8 طیف انعکاسی نور محاسبه شده برای سلول پیشنهادی با الگوی PhC و مقایسه آن با ساختار سلول خورشیدی بدون الگو .

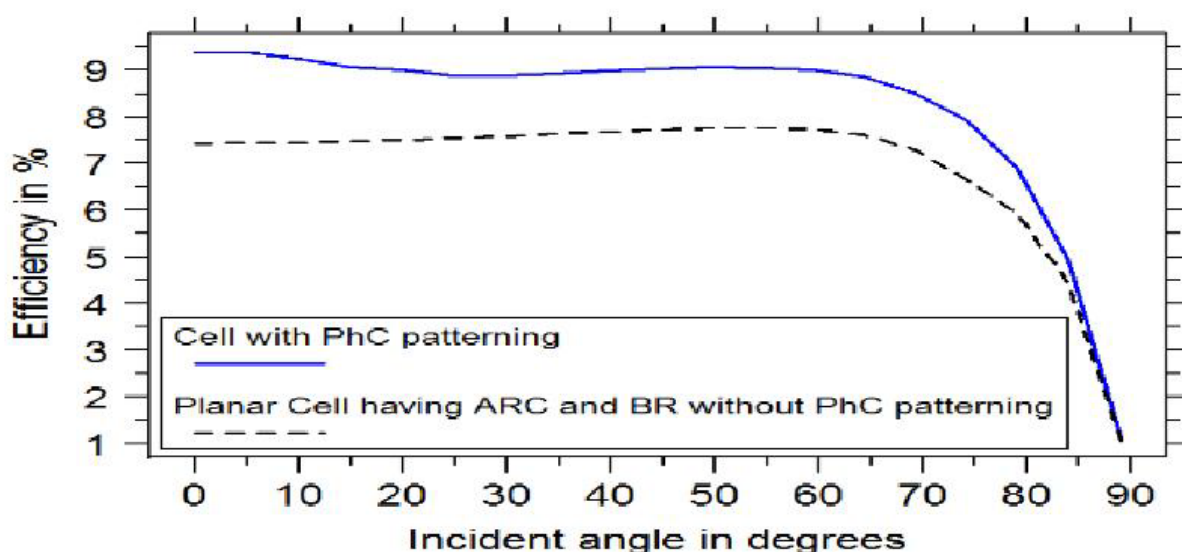
سپس ، نمودار توزیع طیفی صاف برای سلول LTS PhC پیشنهادی در شکل ۹ نشان داده شده است . همانطور که در نتایج قبلی نشان داده شد ، این شکل همچنین افزایش کارایی برای ساختار الگو را در مقایسه با سلول مرجع و مقادیر عبور منفرد نشان می دهد . دوباره ، می توان از این شکل پیش بینی کرد که اگر چه از طریق این الگوی تکراری ارائه شده ، کارایی قابل توجهی را افزایش می دهد، اما هنوز نتایج به دست آمده زیر محدوده Lambertian هستند .



شکل 9 نمودار محاسبه ی توزیع طیفی برای طیف خورشیدی AM1.5 در نظر گرفته شده برای سلول لایه فعال ۵۰ نانومتری پیشنهادی با LTS PhC و مقایسه آن با سلول مرجع دارای ضخامت لایه فعال یکسان .

ارزیابی ساختار پیشنهادی با توجه به زاویه نور فرودی انجام شده است ، و مقادیر محاسبه شده در دامنه زاویه ای تابش همانطور که در شکل 10 نشان داده شده است نشان می دهد که در مقایسه با سلول مسطح مرجع تقریباً برای کل محدوده زاویه فرودی ، عملکرد دستگاه نسبت به سلول مسطح مرجع بهبود

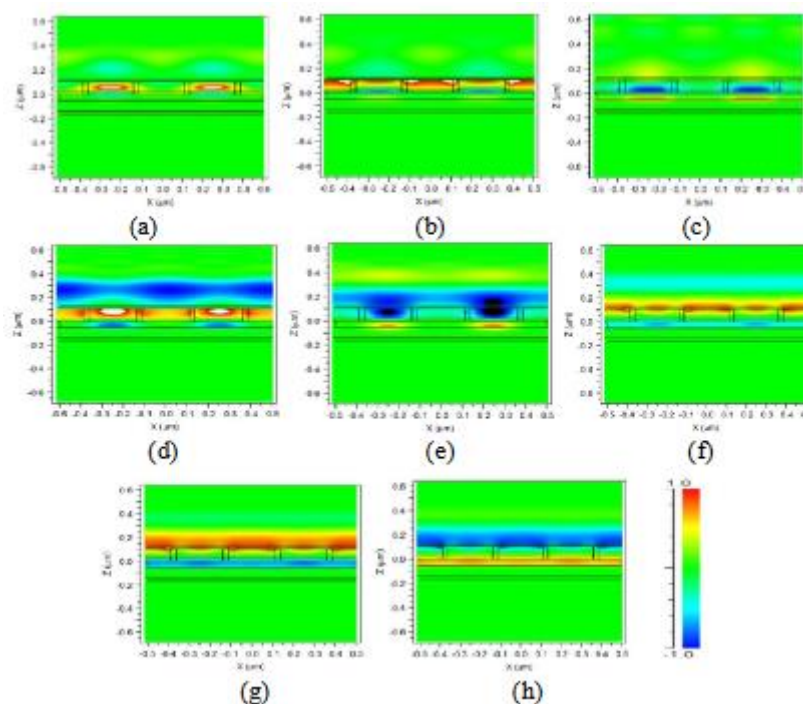
یافته‌است . نتایج حاصل می‌تواند به قابلیت پراش و کارایی کوپلینگ PhC LTS بهتری که کمک میکند نور به لایه ی فعال برای محدوده ی بزرگ برخورد هدایت شود، نسبت داده شود .



شکل 10 مقایسه زاویه برخورد و نمودار بهر موری سلول برای یک لایه فعال ۵۰ نانومتری بر اساس ساختار سلول GaAs با ساختار سلولی GaAs و بدون الگوی PhC

از این شکل می‌توان به این شکل اشاره کرد که ساختار طراحی شده ما قادر به انجام تقریباً معادل میزان برخورد عادی تا حدود ۷۵ درجه یا بیشتر بوده و حدود ۸۰ درصد از کارایی نرمال را حفظ کرده و افزایش چشمگیر عملکرد را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که افزایش کارایی PhC LTS در نظر گرفته شده نسبت به تغییرات جهت گیری و زاویه تابش بسیار مقاوم است . این یک نتیجه مهم است ، همانطور که از طریق این روش می‌توانیم پیش‌بینی کنیم که ساختار پیشنهادی باعث افزایش کارایی مشابه نور مستقیم و پراکنده ، بدون نیاز به ردیابی انرژی خورشیدی می‌شود .

حالا ، برای درک بهتر مکانیزم جذب در طول موج نور برخوردی مختلف ، ما در شکل ۱۱ ، شدت‌های میدان الکتریکی را در ۸ طول موج مختلف برای پلاریزاسیون TE از ۳۵۰ نانومتر (فوتون انرژی بالا) تا ۸۵۰ نانومتر (فوتون انرژی کم) نشان داده‌ایم . از آنجا که هدف اصلی PhC LTS ، حداکثر نور برخوردی به زیر لایه فعال است ، لازم است که ساختار باید کم‌ترین بازتاب را از بالا ارایه دهد ، باید حداقل جذبی را داشته باشد و همچنین باید حداکثر پراش نسبت به لایه فعال را برای بهبود طول مسیر نور تصادفی داشته باشد . پدیده ذکر شده فوق می‌تواند با استفاده از شدت های میدان الکتریکی نشان داده شده در شکل ۱۱ ، توضیح داده شود .



شکل 11 شدت میدانهای الکتریکی برای دو قطبی فعال ۵۰ نانومتری PhC LTS پیشنهادی برای قطبش TE که در طول موجهای زیر محاسبه می شود: (a) ۳۵۰ نانومتر، (b) ۴۰۰ نانومتر، (c) ۴۵۰ نانومتر، (d) ۵۰۰ نانومتر، (e) ۵۵۰ نانومتر، (f) ۶۰۰ نانومتر، (g) ۷۰۰ نانومتر، (h) ۸۵۰ نانومتر. توده

شکل ۱۱ (a) شدت میدان الکتریکی را در ۳۵۰ نانومتر نشان می دهد. این نشان می دهد که برای فوتون های دارای انرژی بالا، انعکاس قابل توجهی از سطح بالا وجود دارد و بیشتر نور در خود PhC LTS باقی می ماند و تنها بخش کوچکی از نور برخوردی با لایه فعال پایین کوپل است. این دلیل اصلی برای ارزش کوچک جذب در سلول پیشنهادی در حدود ۳۵۰ نانومتر است، همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل ۱۱ (b)، شدت در ۴۵۰ نانومتر را نشان می دهد، نشان می دهد که اگرچه هنوز بازتاب از بالا و تشدید در خود سازه PhC وجود دارد، اما کمتر از حد در ۳۵۰ نانومتر و در نتیجه جفت شدگی نور نیز افزایش می یابد. حال، شکل ۱۱ (c)، حالتی را که حدود ۵۰۰ نانومتر را نشان می دهد، که در هر شکل ۶ نشان داده شده است، در بین حوزه های اصلی افزایش در جذب در مقایسه با سلول های مرجع است. به راحتی می توان از این شکل مشاهده کرد که کوپلینگ نور برخوردی از محیط برخورد تا لایه فعال قوی تر می شود و غلظت بسیار کمی نور در خود PhC و کاهش بازتاب ها.

سپس شکل ۱۱ (d) و (e) شدت های میدان الکتریکی را در ۵۵۰ نانومتر و ۶۰۰ نانومتر نشان می دهد. در اینجا نیز اگرچه جفت شدن نور به لایه فعال قوی است و جذب در مقایسه با سلول های مرجع بهتر است اما در این مناطق انعکاس بالایی دارند (که می تواند ناشی از پراش در هوا باشد) و همچنین رزونانس قوی در خود PhC LTS وجود دارد. شکل های بعدی نمودارهای شدت را در ۷۰۰، ۸۰۰، ۸۵۰ و ۸۷۵ نانومتر نشان می دهند که به ترتیب نشان دهنده افزایش طول موج، کاهش کوپلینگ و انعکاس سطح جلو غالب می شود.

بنابراین ، براساس نمودارهای شدت بالا ، می توان پیش بینی کرد که با این که ساختار پیشنهادی عملکرد سلول های فوق ریز GaAs را افزایش می دهد ، اما برای افزایش کارایی حتی بیشتر برای گرفتن این مقادیر به سمت موارد محدودیت دار ابتدا بایست بازتاب ها از بالا را حتی بیشتر کاهش داد ، پراش نور از بالا به سمت لایه فعال را بهبود ببخشیم و تبدیل رزونانس در ساختارهای PhC به جای تلفات به نور مفید ، با کوپلینگ بیشتر و بیشتر این نور به سمت متوسط فعال فعال . ما بهبود کارایی به دست آمده از طریق ساختار طراحی شده و بهینه را خلاصه کرده ایم و می توان از جدول ۲ یافت .

Table 2: Summary of the cell efficiency for the optimal structures with 50 nm cell thicknesses (here effi. denotes efficiency).

Active layer thickness (nm)	Single pass effi. with losses (device without LTS)	Proposed Cell effi. with PhC structure at top	Planar ref. cell without PhC structure	Total effi. Inc. (%) as compared to bare cell	Improvement in effi. by PhC design as compared to planar structure (%)	Lambertian Limit effi.
50	4.133	9.383	7.432	127.1	26.3	25.855

از این جدول ، می توان فهمید که بالای ساختار مبتنی PhC LTS که تنها ۵۰ نانومتر دارای ضخامت لایه فعال است می تواند حدود ۱۲۷ درصد افزایش راندمان در مقایسه با ساختار سلول خالی فراهم کند ، و می تواند حدود ۲۶,۳ درصد افزایش بازده را در مقایسه با سلول مرجع مسطح که به طور واضح ارزش LTS متناوب PhC برای توسعه ابزار فوق نازک آینده را پیش بینی می کند ، فراهم کند .

در این مقاله ، ما تحلیل نوری تفصیلی از طرح پیشنهادی را پیشنهاد کردیم ، اما حمل و نقل الکتریکی و وجود عیب ممکن را در نظر نگرفته ایم . در ساختارهای متناوب مانند PhC LTS ارایه شده ، و آن هم در بالای یک دستگاه قرار داده می شود، این پارامترها ممکن است حیاتی باشند .

با این حال ، خواص حمل و نقل الکترونی می تواند از ضخامت لایه فعال پایین سود ببرد . همچنین ، یک روش برای مراقبت از ویژگی های نفوذ مواد GaAs به عنوان GaAs با طول پخش کوچک دارد در نتیجه افزایش ضخامت لایه فعال فراتر از مقدار مشخص عملی نیست ، همانطور که با افزایش ضخامت ، نوترکیبی نیز افزایش خواهد یافت و در نتیجه LTS نقش مهمی را برای سلول های کوچک تر GaAs بازی می کند . بنابراین ، یک بررسی دقیق از معماری سلول واقعی شامل هر دو خواص نوری و الکتریکی بسیار مفید خواهد بود و می تواند جهت توسعه کار فعلی به سمت ساختارهای واقعی سلول باشد .

6. نتیجه گیری

در نتیجه ، این مقاله یک بهینه سازی طراحی نوری برای سلول لایه فعال ۵۰ نانومتری GaAs با داشتن PhC LTS دو بعدی در بالا توسط Al BR ارائه می دهد . نتایج بدست آمده افزایش کارایی قابل توجهی برای

ساختار پیشنهادی را نشان می‌دهد. نتایج همچنین با محدودیت‌های Lambertian برای به دام انداختن نور و همچنین آن‌هایی که دارای یک پاس تک صفحه‌ای و سلول مسطح مرجع هستند مقایسه شده‌اند و عملکرد بهبود یافته را برای سلول PhC LTS بر حسب جذب، انعکاس و تغییر زاویه برخورد نشان می‌دهند. جالب توجه است که توجه داشته باشید که ساختار طراحی شده تقریباً ۸۰ درصد از بازده نرمال را حتی برای زاویه بالای برخورد حفظ می‌کند و در نتیجه بهبود عملکرد زاویه‌ای قابل توجهی را ارائه می‌دهد. این بهبود در بهره‌وری اساساً به تطبیق شاخص بهتر، به دام انداختن فوتون‌های پرنرژی و پراش نور ناشی از برخورد به لایه فعال ناشی از PhC LTS پیشنهاد شده بستگی دارد. همچنین نشان داده شده است که این وسیله تیرانس ساخت خوبی فراهم می‌کند در نتیجه می‌تواند عملاً تحقق یابد.