

طراحی و شبیه‌سازی نوری یک سامانه نوین قدرت‌زای نوری گرمایی مبتنی بر گسیلنده بلور فوتونی تانتالیومی و قدرت‌زای نوری InAs

زهرا تمسکینی زاهدی^۱، کیانژند فصیحی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بندر عباس

آستادیار گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران، k.fasahi@gu.ac.ir

چکیده

در این مقاله طراحی و شبیه‌سازی نوری یک سامانه قدرت‌زای نوری گرمایی جدید ارائه شده است. در بخش گسیلنده سامانه از یک ساختار بلور فوتونی فلزی از جنس تانتالیوم و در بخش جذب‌کننده از یک قدرت‌زای نوری مسطح از جنس InAs استفاده شده است. در بخش جذب‌کننده برای بالا بردن مقدار جذب از پوشش ضد انعکاس از جنس سیلیکون نیتراید به ضخامت ۲۰۰ نانومتر استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل از تکرار شبیه‌سازی‌های عددی نشان داده شد که با تنظیم دمای بخش گسیلنده بر روی ۱۶۵۰ درجه کلوین، طول‌موج نظیر بیشینه قله تابش نزدیک به مقدار $1/7 \mu m$ بوده و مقدار بهره کوانتومی داخلی بیشینه خواهد بود. به ازای دمای ۱۶۵۰ درجه کلوین، سامانه طراحی شده دارای بهره کوانتومی داخلی و جریان اتصال کوتاه به ترتیب ۷۷٪ و 62 mA/cm^2 است. برای شبیه‌سازی نوری از روش FDTD و نیز برنامه‌های کدنویسی شده با استفاده از نرم افزار متلب استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نوری موید آن است سامانه قدرت‌زای پیشنهادی که مبتنی بر بخش گیرنده از جنس InAs است، به مانند سایر مواد با جذب بیشینه در باند میانه که در مرز تحقیقات روز قرار دارند (همچون GaSb، InGaAs و InGaAsSb)، دارای عملکرد مناسبی بوده و می‌تواند در سامانه‌های تبدیل انرژی حالت جامد به خوبی به کار گرفته شود.

کلید واژه

شبیه‌سازی نوری، بلور فوتونی، سلول قدرت‌زای نوری، سامانه قدرت‌زای نوری گرمایی

گرمایی-خورشیدی^۲ و سامانه شیمیایی گرمایی- خورشیدی^۴ طبقه‌بندی نمود [۱،۲]. این میزان از توسعه مطالعات به واسطه فراهم آمدن کنترل دقیق بر روی فرایندهای گسیل نانوموادهای فوتونیک حاصل شده است. برای تحقق مبدل‌های انرژی با کارکرد بالا، تطبیق طیفی تشعشعات گسیلی (حاصل از بخش گسیلنده نانوفوتونیک) با طیف عملکردی بخش جذب‌کننده (که دارای عملکردی مشابه یک سلول خورشیدی می‌باشد) ضروری است.

مقدمه

پس از دهه‌ها مطالعه بر روی سامانه‌های فوتونیک و نانوفوتونیک با قابلیت کارکرد در دماهای پایین و یا دمای اتاق، اکنون رشد فزاینده‌ای در زمینه مطالعات تبدیل انرژی حالت جامد در دماهای بالا ایجاد شده است. سامانه‌های تبدیل انرژی گرمایی حالت جامد را می‌توان در چهار گروه سامانه قدرت‌زای نوری گرمایی^۱، سامانه قدرت‌زای نوری گرمایی- خورشیدی^۲، سامانه

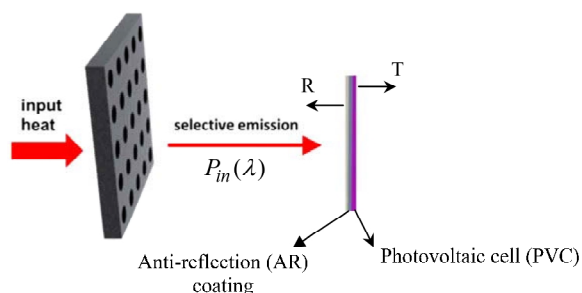
^۲ Solar-thermophotovoltaics

^۳ Solar-thermal

^۴ Solar-thermochemical energy

^۱ Thermophotovoltaics (TPV)

خورشیدی، در یک سامانه TPV سطح توان و نیز مشخصات طیفی تشعشعات ورودی، قابل کنترل است [۱۰-۱۳]. در واقع با طراحی مناسب ساختار بلور فوتونی و نیز کنترل دما، می توان مشخصات تابش گسیلی را تنظیم نمود. در ضمن با طراحی مناسب یک پوشش ضد انعکاس می توان مقدار تشعشعات انعکاسی از سطح بخش جذب کننده (قدرت زای نور) را به حداقل رسانده، میزان جذب را افزایش داد.



شکل ۱. شمای کلی یک سامانه قدرت زای نوری گرمایی

حال به بیان مبانی تئوری مورد نیاز و روش های عددی به کار گرفته شده برای شبیه سازی یک سامانه قدرت زای نوری گرمایی می پردازیم. روش به کار گرفته شده در تحلیل و شبیه سازی بخش گسیلنده مبتنی بر قانون کیرشهف است که بیان می کند مقادیر جذب و گسیل یک سامانه در حال تعادل، برای تمامی فرکانس ها، جهات و قطبیدگی ها یکسان هستند. از این رو با توجه به یکسان بودن طیف های گسیلی و جذب مواد، برای به دست آوردن گسیلندگی یک ماده کافیست تا میزان جذب آن مورد بررسی قرار گیرد. به این ترتیب، ابتدا با استفاده از روش عددی FDTD و با استفاده از رابطه زیر مقدار ضریب جذب نور را به دست می آوریم [۱۴، ۲۰، ۱]:

$$\alpha(\lambda) = 1 - T(\lambda) - R(\lambda) \quad (1)$$

که در آن T و R به ترتیب توان عبوری و انعکاسی از سطح جذب کننده هستند. سپس به مانند یک مرحله پس-پردازشی، با استفاده از قانون کیرشهف مقدار توان تابشی (گسیل حرارتی)، $I(\lambda)$ ، را به دست می آوریم.

در بخش سلول قدرت زای نوری^۵، مقدار ضریب جذب نور با استفاده از رابطه (۱) قابل محاسبه است. سپس سایر پارامترهای تعیین کننده عملکرد نوری سامانه یعنی مقدار بهره کوانتومی، بهره کوانتومی داخلی و مقدار جریان اتصال کوتاه، به ترتیب با استفاده از روابط زیر محاسبه خواهند شد [۱۴]:

$$QE = \alpha(\lambda) / P_{in}(\lambda) \quad (2)$$

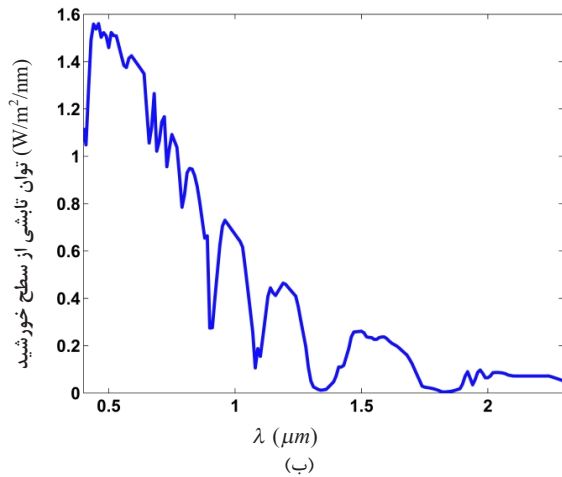
بخش گسیلنده با استفاده از ساختارهای بلور فوتونی و با استفاده از مواد با قابلیت تحمل دماهای بالا همچون تنگستن، تانتالیوم و ... ساخته می شود. بلورهای فوتونی ساختارهایی تناوبی از مواد الکترومغناطیسی اند که دارای شکاف باند نوری هست [۳]. با انتخاب دقیق پارامترهای ساختاری یک بلور فوتونی، همچون مقدار ثابت شبکه، ابعاد حفره های هوایی و نیز نوع ماده زمینه می توان ویژگی های طیفی شکاف باند نوری را کنترل نمود. بلورهای فوتونی در دماهای بالا از قابلیت گسیل تشعشعات الکترومغناطیسی نیز بهره مند هستند. همچنین با تغییر پارامترهای ساختاری یک بلور فوتونی می توان طیف گسیلی از آن را کنترل نمود. شبیه سازی یک سامانه قدرت زای نوری-گرمایی را می توان به دو بخش تقسیم نمود. بخش اول طراحی و شبیه سازی نوری و بخش دیگر طراحی و شبیه سازی الکتریکی است. در قسمت اول بخش های گسیلنده و جذب کننده نوری از نظر مکانیسم عملکرد، ابعاد فیزیکی و مواد مربوطه طراحی شده و شرایط برای جذب بهینه طیف گسیلی مهیا می شود. اهداف مورد انتظار در این مرحله به دست آوردن بهره کوانتومی و جریان اتصال کوتاه (با فرض تبدیل کامل فوتون های جذب شده به جفت الکترون و حفره) بیشتر است. در بخش شبیه سازی الکتریکی عوامل جابجایی موثر حامل ها و توان الکتریکی خروجی مورد بررسی قرار می گیرد. در این مقاله که هدف آن طراحی و شبیه سازی نوری یک سامانه قدرت زای نوری گرمایی است، از یک تیغه بلور فوتونی حفره ای از جنس تانتالیوم برای پیاده سازی بخش گسیلنده و از یک قدرت زای نوری مسطح از جنس InAs (که از طیف جذب مناسب و منطبق بر طیف گسیلی برخوردار است)، در بخش جذب کننده استفاده شده است.

مبانی تئوری برای تحلیل و طراحی نوری سامانه های

قدرت زای نوری گرمایی

شکل ۱ شمای کلی یک سامانه قدرت زای نوری گرمایی را نشان می دهد. در بخش جذب کننده سامانه، از ماده InAs استفاده شده است. طیف جذب این ماده در نواحی اطراف طول موج $1.7 \mu m$ دارای بیشترین راندمان تبدیل انرژی است. در چنین طول موجی، بر اساس قانون جابجایی وین، به ازای دمایی معادل با 1650 درجه کلوین می توان به بیشینه توان تابشی حاصل از یک جسم سیاه دست یافت. رسیدن به چنین دماهایی چندان دشوار نبوده و می توان از منابع مختلفی برای تامین آن استفاده نمود [۴-۹]. در بخش گسیلنده نیز از یک ساختار بلور فوتونی از جنس تانتالیوم استفاده شده است. برخلاف مبدل های قدرت زای نوری-گرمایی

⁵ Photovoltaic cell (PVC)



شکل ۲. (الف) منحنی ضریب جذب PVC سیلیسیومی مسطح با پوشش ضد انعکاس (ب) منحنی طیفی توان تابشی از سطح خورشید (AM 1.5)

حال به طراحی و شبیه‌سازی نوری سامانه قدرت‌زای نوری گرمایی می‌پردازیم. در طراحی PVC از ماده InAs استفاده شده است. منحنی طیف جذب این ماده به گونه‌ای است که در طول موج‌های نزدیک به $1/7 \mu m$ دارای بیشترین مقادیر جذب است. این طول موج، در مقایسه با طول موج‌های جذب بهینه سایر نیمه‌هادی‌های مورد استفاده در سامانه‌های تبدیل انرژی، بلندتر است. لازم به ذکر است که در سال‌های اخیر، در اغلب تحقیقات انجام شده بر روی سامانه‌های خورشیدی نقطه کوانتومی، از ماده InAs استفاده شده است [۱۷]. در شکل ۳ (الف) ساختار PVC مسطح پیشنهادی نشان داده شده است. به منظور به حداقل رساندن انعکاس از سطح قدرت‌زای نوری، به خصوص در نزدیکی طول موج جذب بهینه از یک پوشش ضد انعکاس سیلیکون نیتراید (Si_3N_4) به ضخامت $0/2 \mu m$ استفاده می‌شود. در طراحی لایه ضد انعکاس موارد زیر در نظر گرفته شده است:

- ضریب شکست مناسب برای ماده ضد انعکاس، واسطه هندسی بین ضریب شکست ماده جاذب ($n_{InAs}=3.5$) و محیط ($n_{air}=1$) است. بنابراین ضریب شکست ماده ضد انعکاسی می‌بایست در حدود $\sqrt{1 \times 3.5} \cong 1.9$ در نظر گرفته شود که به ضریب شکست ماده سیلیکون نیتراید ($2/05$) نزدیک است.
- ضخامت آن باید یک چهارم طول موج کار (یا طول موج بهینه جذب: $1/7 \mu m$) سامانه، در ماده ضد انعکاس باشد. از این رو ضخامت مناسب برای پوشش ضد انعکاس که از جنس ماده سیلیکون نیتراید انتخاب شده است، $200 \text{ nm} \cong (1/4) \times (1.7 / 2.05)$ خواهد بود.

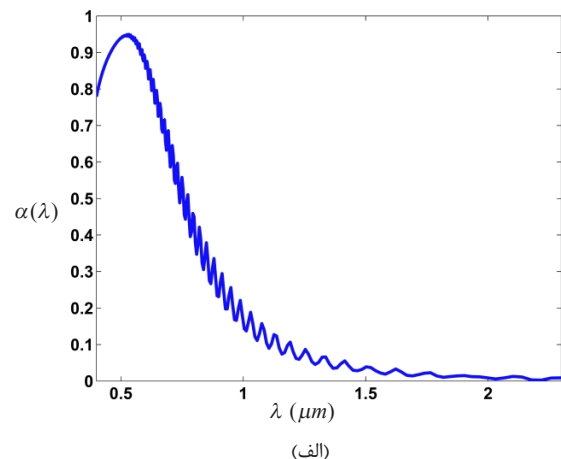
$$IQE = \frac{\int QE(\lambda)I(\lambda)d\lambda}{\int I(\lambda)d\lambda} \quad (3)$$

$$J_{sc} = \frac{e}{hc} \int QE(\lambda)I(\lambda)d\lambda \quad (4)$$

که در روابط فوق، $P_m(\lambda)$ توان گسیلی، e بار الکترون، h ثابت پلانک و c سرعت نور در خلاء است.

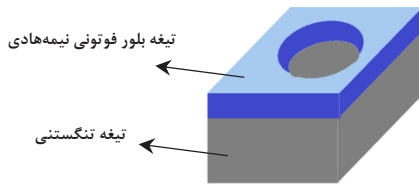
طراحی و شبیه‌سازی

برای اطمینان از صحت روند به کار گرفته شده برای تحلیل عملکرد سامانه قدرت‌زای نوری گرمایی، ابتدا یک سامانه قدرت‌زای نوری خورشیدی سیلیسیومی مسطح که بر اساس تحقیق انجام شده توسط آقای چنگ و دیگران است را در نظر گرفته [۱۵]، مقدار جریان اتصال کوتاه را مورد بررسی قرار می‌دهیم. بخش PVC از یک لایه سیلیسیومی به ضخامت $1/7 \mu m$ و یک پوشش ضد انعکاس از ماده سیلیکون نیتراید با ضریب شکست $2/05$ و به ضخامت 70 nm تشکیل شده است. شکل ۲ (ب) معرف نتیجه شبیه‌سازی عددی، مبتنی بر روش FDTD با استفاده از نرم افزار لامریکال^۶، برای محاسبه ضریب جذب PVC مسطح سیلیسیومی در محدوده طیفی 400 تا 2300 نانومتر است. با در نظر گرفتن طیف توان تشعشعی از خورشید، نشان داده شده در شکل ۲ (الف) و استفاده از روابط (۲) و (۴) و نیز برنامه محاسباتی نوشته شده در نرم افزار متلب، مقدار جریان اتصال کوتاه برابر 21 mA/cm^2 حاصل خواهد شد که به مقدار ارائه شده در مقاله بسیار نزدیک است. در ضمن برای انجام مقایسه‌های بعدی، مقدار بهره کوانتومی داخلی نیز برابر مقدار 39% محاسبه می‌شود.

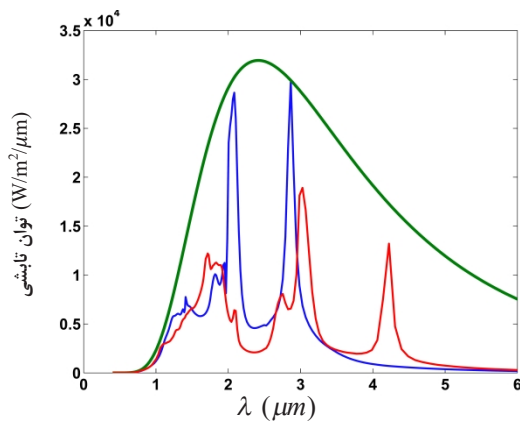


⁶ Lumerical software

برای محاسبه مقدار گسیلندگی از قانون کیرشهف، مبتنی بر رابطه (۱) و نیز شبیه سازی عددی FDTD که با استفاده از نرم افزار لامریکال انجام می پذیرد، استفاده می شود. با تنظیم مقدار متغیر دما، که از متغیرهای ورودی نرم افزار لامریکال است، می توان طیف توان تابشی از تیغه بلور فوتونی تانتالیومی (که در زیر منحنی طیف تابش جسم سیاه، در دمای مربوطه قرار می گیرد) را محاسبه نمود. منحنی گسیلندگی، معرف منحنی نرمالیزه شده طیف توان تابشی (حاصل از تقسیم منحنی طیف توان تابشی از تیغه فلزی بلور فوتونی در دمای مشخص بر منحنی طیف توان تابشی از جسم سیاه در همان دماست)، است. در ابتدا تحقیق انجام شده توسط آقای چان و دیگران [۱۸]، را مورد بررسی قرار می دهیم. تیغه ترکیبی بلور فوتونی به کار گرفته شده در این تحقیق (شکل ۴ الف)) از یک لایه فلزی تحتانی از جنس تنگستن با ضخامت $1 \mu m$ ، لایه بلور فوتونی فوقانی نیمه هادی با دو مقدار برای ثابت شبکه $2 \mu m$ و $3 \mu m$ ، ضریب شکست $2/23$ ، ضخامت $0/4 \mu m$ و شعاع حفره های هوایی برابر $0/4$ مقدار ثابت شبکه تشکیل شده است. شکل ۴ منحنی های طیف توان تابشی و نیز گسیلندگی را در دمای 1200 درجه کلوین نشان می دهد.

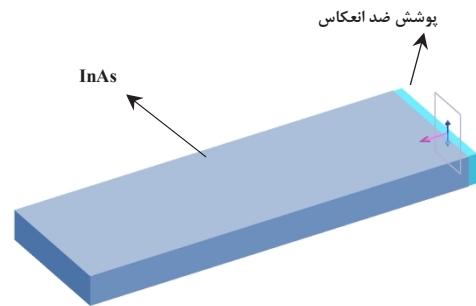


(الف)

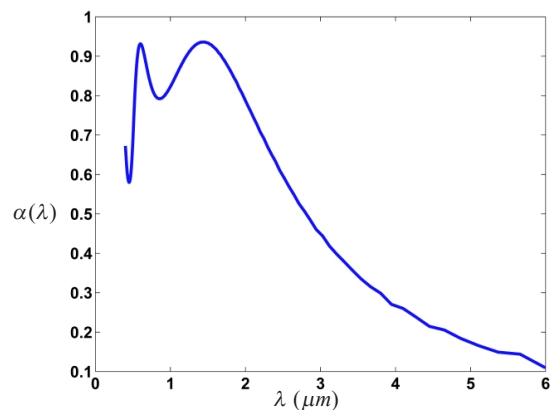


(ب)

شکل ۳ (ب) معرف نتیجه شبیه سازی عددی، مبتنی بر روش FDTD با استفاده از نرم افزار لامریکال، برای محاسبه ضریب جذب PVC پیشنهادی، در محدوده طیفی $0/4 \mu m$ تا $6 \mu m$ است. بررسی منحنی نشان داده شده موید این امر است که PVC متشکل از ماده InAs دارای جذبی بهینه در طول موج های نزدیک به $1/7 \mu m$ است. از این رو چنانچه بتوان انطباق مناسبی بین بیشینه منحنی طیف توان تابشی با بیشینه منحنی جذب ایجاد نمود، می توان به بهره کوانتومی داخلی مناسبی دست یافت. این کار با تنظیم دمای بخش گسیلنده میسر خواهد بود. بر اساس نتایج حاصل از تکرار شبیه سازی های عددی می توان نشان داد که با تنظیم دمای بخش گسیلنده بر روی 1650 درجه کلوین، موقعیت بیشینه قله تابش حدود طول موج $1/7 \mu m$ قرار گرفته و مقدار بهره کوانتومی داخلی بیشینه خواهد بود. همان طور که پیش از این گفته شد با تغییر پارامترهای ساختاری یک بلور فوتونی، ساخته شده از مواد با قابلیت تحمل دماهای بالا، می توان به قابلیت گسیل تشعشعات الکترومغناطیسی با طیف توان مشخص رسید.



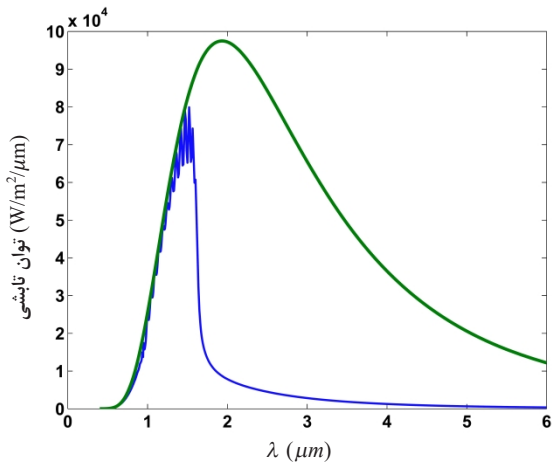
(الف)



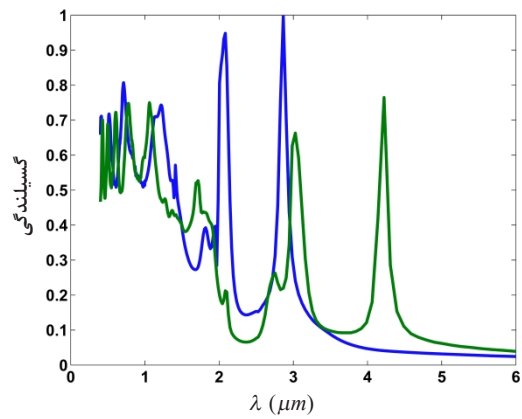
(ب)

شکل ۳. الف) ساختار PVC پیشنهادی (ب) منحنی ضریب جذب PVC

پیشنهادی با پوشش ضد انعکاس

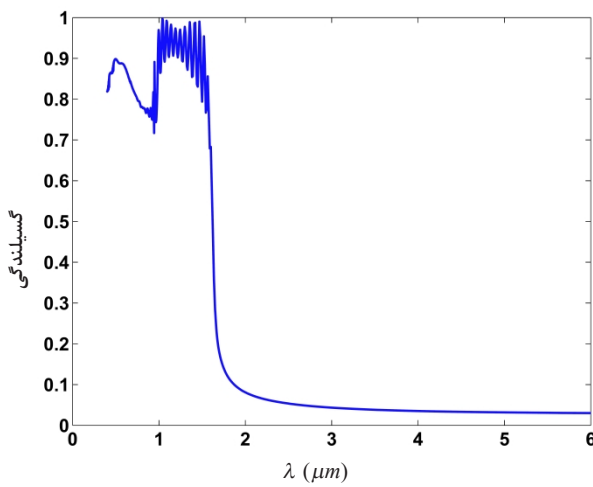


(ب)



(ج)

شکل ۴. الف) ساختار سلول واحد بخش گسیلنده (ب) منحنی طیفی توان تابشی از سطح تیغه بلور فوتونی تنگستنی در دمای ۱۲۰۰ درجه کلون به ازای ثابت شبکه‌های $2 \mu m$ و $3 \mu m$ ، ضریب شکست $2/23$ ، ضخامت $0/4 \mu m$ و شعاع حفره‌های هوایی برابر $0/4$ مقدار ثابت شبکه (ج) منحنی‌های گسیلندگی

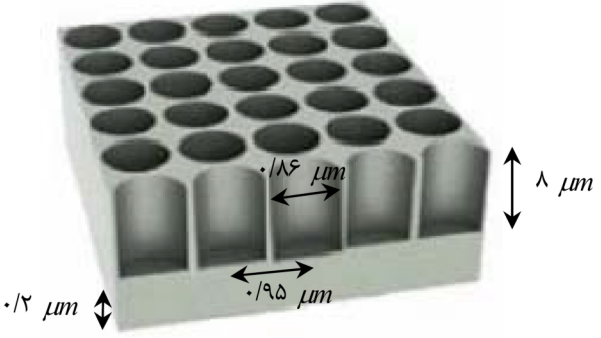


(ج)

شکل ۵. الف) ساختار بلور فوتونی فلزی بخش گسیلنده (ب) منحنی طیفی توان تابشی از سطح تیغه بلور فوتونی تانتالیومی در دمای ۱۶۵۰ درجه کلون (ج) منحنی گسیلندگی

با در نظر گرفتن طیف توان تشعشعی از گسیلنده، نشان داده شده در شکل ۵ (ب) و استفاده از روابط (۲) تا (۴) و نیز برنامه محاسباتی نوشته شده در نرم افزار متلب، مقدار بهره کوانتومی داخلی و نیز جریان اتصال کوتاه به ترتیب 77% و $62 mA/cm^2$ حاصل خواهد شد. در پایان به منظور انجام مقایسه عملکرد سامانه پیشنهادی، یک سامانه قدرت‌زای نوری گرمایی دیگر را که مبتنی بر گسیلنده بلور فوتونی فلزی تانتالیومی و جذب کننده GaSb بوده و توسط ینگ و همکاران ارائه شده است [۱۹]، را توسط شبیه‌سازی نوری مورد بررسی قرار می‌دهیم. در شکل ۶ نتیجه شبیه‌سازی عددی، برای محاسبه ضریب جذب PVC به ازای ساختاری از لحاظ ابعاد یکسان با سلول پیشنهادی و تشکیل شده از ماده GaSb، ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود منحنی طیف جذب حاصل تا حدی مشابه طیف جذب سلول

مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج مقاله مورد نظر، موید تطابق مناسب بین آنها است. طرح‌های اولیه ساختارهای گسیلنده اغلب ترکیبی و به عنوان مثال مبتنی بر ساختار فلز-نیمه هادی هستند. این گسیلنده‌ها دارای محدودیت پایداری به هنگام استفاده در دماهای بالا، ناشی از محدودیت‌های دمایی مواد به کار گرفته شده و نیز پایداری ساختار مورد استفاده هستند. در مقابل بر اساس تحقیقات اخیر، بلورهای فوتونیک فلزی در دماهای زیاد از قابلیت عملکردی بالا در گسیل جهتی و نیز گزینشی بهره‌مند هستند. در شکل ۵ الف) ساختار گسیلنده بلور فوتونی تانتالیومی مورد استفاده، نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تیغه بلور فوتونی فلزی به کار گرفته شده از جنس تانتالیوم بوده و دارای ضخامت کلی $8/2 \mu m$ ، ثابت شبکه $0/95 \mu m$ و حفره‌های هوایی استوانه‌ای شکل با شعاع $0/43 \mu m$ و ارتفاع $8 \mu m$ است. شکل ۵ (ب) و (ج) منحنی‌های طیف توان تابشی و نیز گسیلندگی تیغه بلور فوتونی تانتالیومی را در دمای ۱۶۵۰ درجه کلون نشان می‌دهد.



(الف)

InGaAs و InGaAsSb [۱۹] است، برای استفاده در سامانه‌های قدرت‌زای نوری گرمایی است.

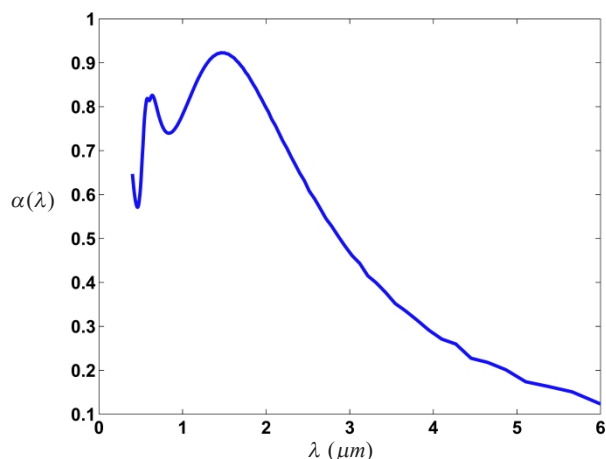
نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی و شبیه‌سازی نوری یک سامانه قدرت‌زای نوری گرمایی جدید با مشخصات مطلوب ارائه گردید. بخش گسیلنده آن از تیغه‌های بلور فوتونی از جنس تانتالیوم و بخش جذب‌کننده نیز یک قدرت‌زای نوری مسطح مبتنی بر ماده InAs تشکیل شده است. در بخش جذب‌کننده برای بالا بردن مقدار جذب از پوشش ضد انعکاس از جنس سیلیکون نیتراید استفاده شد. برای شبیه‌سازی نوری از روش FDTD و نیز برنامه‌های کدنویسی شده مبتنی بر روابط تئوری حاکم بر عملکرد سامانه استفاده شد. صحت نتایج شبیه‌سازی با مقایسه آن‌ها با نتایج موجود در سایر مقاله‌ها به اثبات رسید. به ازای دمای ۱۶۵۰ درجه کلونین، سامانه طراحی شده دارای بهره کوانتومی و جریان اتصال کوتاه به ترتیب ۷۷٪ و 62 mA/cm^2 است که نشان‌دهنده پتانسیل بالای آن برای استفاده در طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های قدرت‌زای نوری گرمایی است. به عنوان پیشنهاد برای تحقیقات بعدی نیز می‌توان به شبیه‌سازی الکترونیکی سامانه پیشنهادی پرداخت.

مراجع

- [1] V. Rinnerbauer, S. Ndao, Y. Yeng, W. R. Chan, J. J. Senkevich, J. D. Joannopoulos, M. Soljacic and I. Celanovic, "Recent developments in high-temperature photonic crystals for energy conversion," *Energy Environ. Sci.*, vol. 5, p. 8815 2012.
- [2] Y. Nam, Y. Yeng, A. Lenert, P. Bermel, I. Celanovic, M. Soljacic, and E. Wang. "Solar thermophotovoltaic energy conversion systems with two-dimensional tantalum photonic crystal absorbers and emitters," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, vol. 122, pp. 287–296, 2014.
- [3] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn and R. D. Meade, *Photonic Crystal: Molding the Flow of Light*. Princeton, Princeton Univ. Press, 2008.
- [4] T. J. Coutts, "A review of progress in thermophotovoltaic generation of electricity," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 3, pp. 77–184 1999.
- [5] M. Zenker, A. Heinzl, G. Stollwerck, J. Ferber, and J. Luther, "Efficiency and power density potential of combustion-driven thermophotovoltaic systems using GaSb photovoltaic cells," *IEEE Trans. Electron. Dev.*, vol. 48, pp. 367–376, 2001.

پیشنهادی مبتنی بر ماده InAs (شکل ۳ (ب)) است. با فرض استفاده از گسیلنده‌ای با ساختار یکسان با گسیلنده پیشنهاد شده و نیز به ازای دمایی یکسان (۱۶۵۰ درجه کلونین)، نتایج حاصل از شبیه‌سازی نوری برای مقادیر بهره کوانتومی داخلی و نیز جریان اتصال کوتاه به ترتیب معادل ۷۶٪ و $61/5 \text{ mA/cm}^2$ خواهند بود. نتایج مقایسه فوق در جدول ۱ خلاصه شده است.



شکل ۶. منحنی ضریب جذب PVC مبتنی بر ماده GaSb با پوشش ضد انعکاس

جدول ۱. مقایسه مشخصات (حاصل از شبیه‌سازی نوری) سامانه قدرت‌زای نوری گرمایی پیشنهادی با برخی از تحقیقات قبلی

مرجع	جریان اتصال کوتاه mA/cm^2	بهره کوانتومی داخلی	ماده مورد استفاده در PVC
[۱۵]	۲۱	۳۹	Si
[۱۹]	۶۱/۵	۷۶٪	GaSb
سامانه پیشنهادی	۶۲	۷۷٪	InAs

از مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی نوری سلول‌های خورشیدی مرسوم (مرجع [۱۵]) و سامانه‌های قدرت‌زای نوری گرمایی [۱۹] و سامانه پیشنهادی می‌توان به مزایای سامانه‌های تبدیل انرژی جدید پی برد. متأسفانه به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات کتابخانه‌ای دیگر مواد دارای جذب بهینه در باند میانه نظیر InGaAs و InGaAsSb (که در مرز تحقیقات روز قرار دارند [۲۰-۲۴])، در حال حاضر امکان مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های نوری با سایر سامانه‌های قدرت‌زای نوری گرمایی مبتنی بر مواد جذب در باند میانه وجود ندارد. با این وجود بر پایه نتایج حاصل از شبیه‌سازی نوری و به ازای استفاده از بخش گسیلنده یکسان، در دمای ۱۶۵۰ درجه کلونین، نشان داده شد که استفاده از ماده InAs در PVC دارای نتایج مطلوب، مشابه ماده GaSb، (که خود بر اساس نتایج تجربی دارای عملکردی تقریباً یکسان با مواد

- Compounds in All-Oxide Device Libraries,” ACS Comb. Sci., vol. 16, pp. 53–65, 2014.
- [15] T. K. Chong, J. Wilson, S. Mokkapat, and K. Catchpole, “Optimal wavelength scale diffraction gratings for light trapping in solar cells,” J. Opt. A, vol. 14, p. 024012, 2012.
- [16] S. O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Prentice-Hall, 2001.
- [17] Y. Okada, T. Morioka, K. Yoshida, R. Oshima, Y. Shoji, T. Inoue, and T. Kita “Increase in photocurrent by optical transitions via intermediate quantum states in direct-doped InAs/GaNAs strain-compensated quantum dot solar cell,” J. Appl. Phys., vol. 109, p. 024301 2011.
- [18] D. L. C. Chan, M. Soljacic and J. D. Joannopoulos, “Thermal emission and design in 2D-periodic metallic photonic crystal slabs,” Opt. Express., vol.14, pp. 8785-8796, 2006.
- [19] Y. X. Yeng, W. R. Chan, V. Rinnerbauer, J. D. Joannopoulos, M. Soljacic, and I. Celanovic, “Performance analysis of experimentally viable photonic crystal enhanced thermophotovoltaic systems,” Opt. Express., vol. 21, pp. 1035–1051, 2013.
- [20] C. A. Wang, H. K. Choi, S. L. Ransom, G. W. Charache, L. R. Danielson, and D. M. Depoy, “High-quantumefficiency 0.5 eV GaInAsSb/GaSb thermophotovoltaic devices,” Appl. Phys. Lett., vol. 75, pp. 1305–1307, 1999.
- [21] O. V. Sulima and A. W. Bett, “Fabrication and simulation of GaSb thermophotovoltaic cells,” Sol. Ener. Mater. Sol. Cells., vol. 66, pp. 533–540, 2001.
- [22] R. R. Siergiej, B. Wernsman, S. A. Derry, R. G. Mahorter, R. J. Wehrer, S. D. Link, M. N. Palmisiano, R. L. Messham, S.Murray, C. S.Murray, F. Newman, J. Hills, and D. Taylor, “20% efficient InGaAs/InPAs TPV cells,” in AIP Conference Proceedings: Thermophotovoltaic Generation of Electricity 5th Conference, pp. 414–423, 2003.
- [23] C. S. Murray, C. J. Crowley, S. Murray, N. A. Elkouh, R. W. Hill, and D. E. Chubb, “Thermophotovoltaic converter design for radioisotope power systems,” in AIP Conference Proceedings: Thermophotovoltaic Generation of Electricity 6th Conference, pp. 123–132, 2004.
- [24] W. Chan, R. Huang, C. A. Wang, J. Kassakian, J. D. Joannopoulos, and I. Celanovic, “Modeling low-bandgap thermophotovoltaic diodes for high-efficiency portable power generators,” Sol. Ener. Mater. Sol. Cells., vol. 94, pp. 509–514, 2010.
- [6] B. Wernsman, R. G. Mahorter, R. R. Siergiej, S. D. Link, R. J. Wehrer, S. J. Belanger, P. M. Fourspring, S. Murray, F. Newman, D. Taylor, and T. Rahmlow, “Advanced thermophotovoltaic devices for space nuclear power systems,” in AIP Conference Proceedings: Space Technology and Applications International Forum, pp. 1441–1448 2005.
- [7] R. W. Kaszeta, Y. X. Yeng, M. Ghebrebrhan, J. D. Joannopoulos, M. Soljacic, and I. Celanovic, “Advanced radiative emitters for radioisotope thermophotovoltaic power systems,” in 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion / Ninth Thermophotovoltaic World Conference, 2010.
- [8] N. P. Harder and P. Wurfel, “Theoretical limits of thermophotovoltaic solar energy conversion,” Semicond. Sci. Technol., vol. 18, pp. 151–157 2003.
- [9] V. M. Andreev, A. S. Vlasov, V. P. Khvostikov, O. A. Khvostikova, P. Y. Gazaryan, S. V. Sorokina, and N. A. Sadchikov, “Solar thermophotovoltaic converters based on tungsten emitters,” J. Sol. Ener. Eng., vol. 129, pp. 298–303, 2007.
- [10] M. Ghebrebrhan, P. Bermel, Y. X. Yeng, J. D. Joannopoulos, M. Soljacic, and I. Celanovic, “Tailoring thermal emission via Q-matching of photonic crystal resonances,” Phys. Rev. A, vol. 83, p. 033810, 2011.
- [11] Y. X. Yeng, M. Ghebrebrhan, P. Bermel, W. R. Chan, J. Joannopoulos, M. Soljacic, and I. Celanovic, “Enabling high temperature nanophotonics for energy applications,” Proc. Natl. Acad. Sci., pp. 109, 2280, 2011.
- [12] M. Araghchini, Y. X. Yeng, N. Jovanovic, P. Bermel, L. A. Kolodziejski, M. Soljacic, I. Celanovic, and J. D. Joannopoulos, “Fabrication of two-dimensional tungsten photonic crystals for high-temperature applications,” J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 29, p. 061402, 2011.
- [13] V. Rinnerbauer, S. Ndao, Y. X. Yeng, J. J. Senkevich, K. F. Jensen, J. D. Joannopoulos, M. Soljacic, I. Celanovic, and R. D. Geil, “Large-area fabrication of high aspect ratio tantalum photonic crystals for high-temperature selective emitters,” J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 31, p. 011802, 2013.
- [14] A. Y. Anderson, Y. Bouhadana, H. Barad, B. Kupfer, E. Rosh-Hodesh, H. Aviv, Y. R. Tischler, S. Ruhle, and A. Zaban, Quantum “Efficiency and Bandgap Analysis for Combinatorial Photovoltaics: Sorting Activity of Cu–O