

Original Research Paper

Design Optimization of the Distributed Bragg Reflectors Based on 1D Photonic Crystals Containing 2D Materials of Gallium Sulfide and Gallium Selenide for Space Solar Cells

Javad Fouladi Oskouei^{*} , Nazanin Sadeghi Dastjerdeh, and Mohadese Abasian Afarani

Department of Physics, Faculty of Science, Malayer University, Hamedan, Iran

ARTICLE INFO**ABSTRACT****Article History:**

Received July 2025

Revised 23 September 2025

Accepted 05 October 2025

Available Online 12 October 2025

Keywords:

Solar cell

One-dimensional photonic crystals

Distributed Bragg reflector

Optical characteristic matrix method

Two-dimensional gallium sulfide

Two-dimensional gallium selenide

LEO orbit

Solar cells (SCs) are the most prevalent and reliable energy generation systems for aerospace applications. Distributed Bragg reflectors (DBRs) trap the light passing through the solar cell, thereby enhancing the power conversion efficiency (PCE) of the solar cells. Therefore, precise design of these structures is of great importance. In this study, 1D photonic crystals based on 2D materials of GaS and GaSe are investigated using an optical characteristic matrix. The first one-dimensional photonic crystal structure contains several layers of two-dimensional materials gallium selenide and muscovite mica [GaSe/Mica]^N, and the second design contains several layers of two-dimensional materials gallium sulfide with the second layer identical to the first design [GaS/Mica]^N. In the designed structures, by increasing the thickness of the desired layers, the width of the photonic band gap increases and the initial and final wavelengths of the reflection window shift towards longer wavelengths. The optimized optical parameters and analyzed reflection spectra indicate a broader wavelength range for the two-dimensional material GaSe compared to GaS. To investigate the role of the designed DBR structures on the basic parameters of space solar cells, we have used the single-diode solar cell model with radiation effects in AM0 conditions for LEO orbit in BOL and EOL modes. The results obtained from this approach can be effectively utilized to improve the performance of space solar cells.

* Corresponding Author's E-mail: j.fouladi@malayeru.ac.ir

How to Cite this Article:

J. Fouladi Oskouei, N. Sadeghi Dastjerdeh, and M. Abasian Afarani, "Design optimization of the distributed bragg reflectors based on 1D photonic crystals containing 2D materials of gallium sulfide and gallium selenide for space solar cells," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 18, No. 3, pp. 51-60, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2025.1560>.

**COPYRIGHTS**

© 2025 by the authors. Published by ARI This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی طراحی بازتابنده‌های براگ توزیع یافته مبتنی بر بلورهای فوتونی یک‌بعدی حاوی مواد دوبعدی گالیم سولفید و گالیم سلناید برای سلول‌های خورشیدی فضایی

جواد فولادی اسکویی^{۱*}، نازنین صادقی دستجرده^۲ و محدثه عباسیان افارانی^۳

۱- استادیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ملایر، همدان، ایران

۲ و ۳- دانشجوی کارشناسی، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ملایر، همدان، ایران

چکیده

سلول‌های خورشیدی فراگیرترین و قابل اعتمادترین سیستم‌های تولید انرژی برای کاربردهای هوافضا هستند. بازتابنده‌های براگ توزیع یافته باعث به دام افتادن نور عبوری از سلول خورشیدی می‌شوند که در نتیجه راندمان تبدیل توان سلول‌های خورشیدی را بهبود می‌بخشند. بنابراین طراحی دقیق این ساختارها بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش، بلورهای فوتونی یک‌بعدی مبتنی بر مواد دوبعدی GaS و GaSe بر اساس ماتریس مشخصه اپتیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. ساختار اول بلور فوتونی یک‌بعدی شامل چندلایه‌هایی از مواد دوبعدی گالیم سلناید و میکای مسکویت [GaSe/Mica]^N و طراحی دوم حاوی چندلایه‌هایی از مواد دوبعدی گالیم سولفید با لایه دوم یکسان با طراحی اول [GaS/Mica]^N است. در ساختارهای طراحی شده با افزایش ضخامت لایه‌های مورد نظر پهنای گاف بانندی فوتونی افزایش یافته و طول موج اولیه و نهایی پنجره بازتابی به سمت طول موج‌های بلندتر انتقال پیدا می‌کند. پارامترهای نوری بهینه‌سازی شده و طیف‌های بازتابی بررسی شده بیانگر محدوده طول موجی پهن‌تر ماده دوبعدی GaSe نسبت به GaS می‌باشد. برای بررسی نقش ساختارهای DBR طراحی شده بر پارامترهای اساسی سلول‌های خورشیدی فضایی، از مدل سلول خورشیدی تک دیودی با اثرات تابشی در شرایط AM0 برای مدار LEO در حالت‌های BOL و EOL استفاده کرده‌ایم. از نتایج به دست آمده از این رهیافت می‌توان به‌طور مؤثری برای بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی فضایی بهره برد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۶ تیر ۱۴۰۴

بازنگری ۰۱ مهر ۱۴۰۴

پذیرش ۱۳ مهر ۱۴۰۴

اولین انتشار ۲۰ مهر ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

سلول خورشیدی
بلور فوتونی یک‌بعدی
بازتابنده براگ توزیع یافته
روش ماتریس مشخصه اپتیکی
گالیم سولفید دو بعدی
گالیم سلناید دو بعدی
مدار LEO

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: j.fouladi@malayeru.ac.ir

How to Cite this Article:

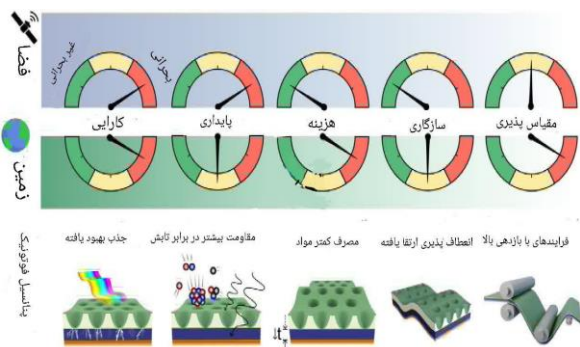
J. Fouladi Oskouei, N. Sadeghi Dastjerdeh, and M. Abasian Afarani, "Design optimization of the distributed bragg reflectors based on 1D photonic crystals containing 2D materials of gallium sulfide and gallium selenide for space solar cells," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 18, No. 3, pp. 51-60, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2025.1560>.



COPYRIGHTS

© 2025 by the authors. Published by ARI This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)





شکل ۱- نمایش شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPI) برای سیستم‌های فتولتائیک فضایی یا زمینی و ابزارهای فوتونیک برای بهبود آن‌ها [۴].

Fig. 1. Demonstrating key performance indicators (KPIs) for space or ground-based photovoltaic systems and photonic tools for their improvement [4].

در شکل ۱ تصویر شماتیک از شاخص‌های کلیدی عملکرد حیاتی-کارایی، پایداری، هزینه، سازگاری و مقیاس‌پذیری برای سیستم‌های فتولتائیک در هر دو زمینه فضایی (بالا) و زمینی (پایین) نمایش داده شده است. مقیاس‌های رنگی نشان‌دهنده ضرورت اولویت‌بندی هر KPI در هر محدوده خاص (زمین یا فضا) در طول طراحی و یا استقرار سیستم هستند؛ سبز نشان‌دهنده نیاز کم به بررسی است، جایی که KPI اهمیت کمتری دارد؛ زرد نشان‌دهنده نیاز متوسط است؛ و قرمز نشان‌دهنده نیاز زیاد است، جایی که پرداختن به KPI برای عملکرد بهینه بسیار مهم است. به‌عنوان مثال، هزینه برای سیستم‌های زمینی بسیار حیاتی است اما برای کاربردهای فضایی اهمیت کمتری دارد. ساختارهای فوتونیک نشان داده شده در ردیف پایین، نوآوری‌های متناسب با بهبود هر KPI را برجسته می‌کنند و نشان می‌دهند که چگونه استراتژی‌های فوتونیک می‌توانند با چالش‌های منحصر به فرد در محیط‌های زمینی و فضایی روبرو شوند. همچنین بیانگر اهمیت ویژه و کلیدی فناوری فوتونیک برای سلول خورشیدی نسل آینده‌ی فضایی و زمینی می‌باشد [۴].

در حال حاضر توجه محققان به پژوهش‌های تئوری و تجربی مبتنی بر بلور فوتونی برای بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی استفاده می‌شود. که یک سلول خورشیدی با ساختار بازتابنده براگ توزیع یافته (DBR) عملکرد سلول خورشیدی را بهبود می‌بخشد [۵].

Biswas و همکاران افزایش جذب در یک سلول خورشیدی سیلیکونی نانوکریستالی با بازتابنده براگ توزیع یافته بلور فوتونی را گزارش کرده‌اند [۶]. اخیراً، یک ساختار بلور فوتونی یک‌بعدی (1DPC) با پهنای باند وسیع در ناحیه طول موج ۵۸۰ تا ۱۲۰ نانومتر ساخته شده و به‌عنوان بازتابنده براگ توزیع یافته در یک سلول خورشیدی لایه نازک

مقدمه

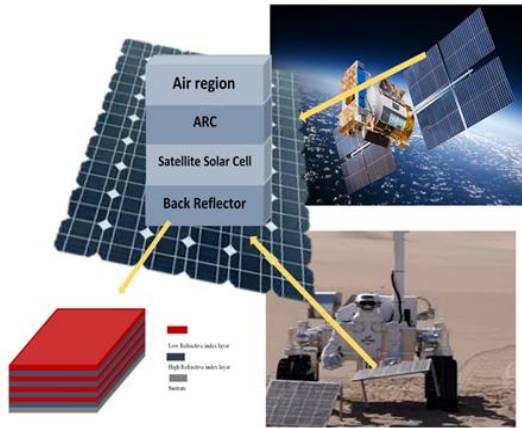
کمبود انرژی امروزه از چالش‌های بزرگ در دنیا می‌باشد. راه‌حل این بحران استفاده از انرژی تجدیدپذیر می‌باشد، استفاده از تکنولوژی سلول خورشیدی یکی از انواع جالب انرژی‌های تجدیدپذیر است که در سراسر کره زمین گسترش یافته است. مواد دوبعدی به دلیل دارا بودن ترکیبی از ۶ ویژگی‌های طراحی سبک، انعطاف‌پذیری، راندمان بالا و مقاومت در برابر شرایط محیط زیستی، مسیر را برای سلول‌های خورشیدی نسل آینده در هوافضا هموار می‌کنند. این ویژگی‌ها، آن‌ها را به‌ویژه برای تأمین انرژی ماهواره‌ها و سایر پلتفرم‌های فضایی امیدوارکننده می‌کند، در حالی که هزینه‌های کلی مأموریت‌های فضایی را کاهش داده و طول عمر عملیاتی را افزایش می‌دهند [۱-۳].

امروزه، سلول‌های خورشیدی مبتنی بر نیمه رساناهای III-V با پیوندگاه چندگانه (MJSCs) به لطف راندمان تبدیل توان بالا و پایداری تأیید شده در حین کار در مدارهای فضایی، فناوری تجاری استاندارد برای تأمین انرژی فضاپیماها می‌باشند [۴].

در دهه اخیر، مواد دوبعدی با توجه به ساختار لایه‌ای اتمی و خواص منحصر به فرد اپتیکی، الکتریکی، مکانیکی و به‌عنوان کاندیدای بالقوه برای بکارگیری در سلول‌های خورشیدی فضایی مطرح می‌باشند. از جمله مهم‌ترین دلایل اهمیت این مواد در حوزه سلول‌های خورشیدی فضایی می‌توان به: (۱) قابلیت تنظیم‌پذیری خواص آن‌ها از طریق عامل‌دار کردن، افزودن ناخالصی و سایر فرایندها، (۲) سبک بودن آن‌ها، (۳) امکان ساخت سیستم‌های انعطاف‌پذیر، و (۴) فراوانی مواد اولیه‌ای که معمولاً برای سنتز آن‌ها (C, W, Mo, S) و غیره) در پوسته زمین استفاده می‌شود. در واقع، آژانس‌های فضایی در حال حاضر در حال آزمایش و ارائه برخی از فناوری‌های مبتنی بر مواد دوبعدی برای مأموریت‌های فضایی هستند [۱].

بلورهای فوتونی از نانوساختارها یا میکرو ساختارهای متناوب طراحی می‌شوند، تا انتشار امواج الکترومغناطیسی را مهندسی کرده و حرکت فوتون‌ها را تحت تأثیر قرار دهند. بلور فوتونی یکی از بهترین گزینه‌ها برای دست‌کاری انتخابی طول‌موج بازتابی و عبوری است، که در سلول‌های خورشیدی می‌توان از آن بهره برد. زیرا افزودن لایه‌های بازتابنده براگ توزیع یافته (DBR) مبتنی بر بلور فوتونی یک بعدی (1DPCs) باعث به دام افتادن نور عبوری از سلول خورشیدی می‌شود، که در نتیجه راندمان تبدیل توان سلول‌های فتولتائیک را بهبود می‌بخشد [۲].

n_0 و n_1 ضرایب شکست محیط فرودی و زیر لایه و N تناوب لایه‌ها می‌باشد.



شکل ۲- نمایش شماتیک ساختار سلول خورشیدی فضایی با لایه‌های مختلف و بلور فوتونی یک‌بعدی به‌عنوان بازتابنده براگ توزیع یافته.

Fig. 2. Schematic representation of the space solar cell structure with different layers and a one-dimensional photonic crystal as a distributed Bragg reflector.

با استفاده از روش ماتریس مشخصه اپتیکی می‌توان خواص نوری از جمله طیف عبور و بازتاب سیستم‌های لایه‌ای را به‌منظور طراحی بازتابنده‌های براگ توزیع یافته شبیه‌سازی، تجزیه و تحلیل کرد. در مقایسه با سایر تکنیک‌های محاسباتی مانند روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) و روش المان محدود (FEM)، روش ماتریس مشخصه اپتیکی تکنیکی نسبتاً ساده است که نیاز به تحلیل‌های محاسباتی پیچیده ندارد. روش ماتریس مشخصه اپتیکی معمولاً به‌عنوان یک ابزار تحلیلی کارآمد برای محاسبه انتشار موج در سامانه‌های نوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش ماتریس مشخصه اپتیکی هر لایه دی‌الکتریک را می‌توان به‌صورت زیر نوشت: [۹،۱۰]

$$M_j = \begin{pmatrix} \cos \delta_j & (-\frac{i}{\eta_j}) \sin \delta_j \\ -i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \theta_j \quad (4)$$

در اینجا λ طول موج، n_j ، d_j ، θ_j ، ضریب شکست، ضخامت اپتیکی و زاویه شکست لایه j ام است و پارامتر η_j ادیتانس اپتیکی این لایه به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_j = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_j \cos \theta_j, \text{ for TM Mode} \quad (5)$$

$$\eta_j = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \frac{n_j}{\cos \theta_j}}, \text{ for TE Mode} \quad (6)$$

سیلیکونی آمورف به کار رفته است و عملکرد نوری این دستگاه مورد بررسی قرار گرفته است [۷].

با توجه به پتانسیل بالای مواد دوبعدی (مانند گرافن، دی‌کالکوجنایدی‌های فلزها واسطه، کاربیدها، نیتريد‌ها و کربونیتريد‌های فلزها واسطه) در بهبود عملکرد و پایداری سلول‌های خورشیدی، به دلیل قابلیت اطمینان اثبات شده و هزینه مؤثرشان، سلول‌های خورشیدی GaAs به‌خاطر کارایی نسبتاً بالا و مقاومت در برابر تابش شناخته شده‌اند که آن‌ها را برای مأموریت‌هایی که با محیط‌های تابشی چالش برانگیز مواجه هستند، مناسب می‌سازد [۸].

در این مقاله بازتابنده‌های براگ توزیع یافته مبتنی بر بلورهای فوتونی حاوی مواد دوبعدی GaSe و GaS مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در بخش مدلبندی به معرفی روش ماتریس مشخصه اپتیکی برای بررسی خواص طیف بازتابی پرداخته شده و همچنین به معرفی شبیه‌سازی سلول خورشیدی فضایی و اثرات تشعشع بر افت کارایی آن پرداخته شده است. در بخش نتایج به طراحی طیف بازتابی بلور فوتونی با دوره تناوب و ضخامت‌های مختلف برای بازتابنده آینه براگ توزیع یافته مبتنی بر بلورهای فوتونی مواد دوبعدی GaS و GaSe می‌پردازیم. برای بررسی نقش ساختارهای DBR طراحی شده بر پارامترهای اساسی سلول‌های خورشیدی فضایی، از مدل سلول خورشیدی تک دیودی با اثرات تابشی در شرایط AM0 برای مدار LEO در حالت‌های BOL و EOL استفاده کرده‌ایم. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته است.

مدلبندی

طراحی بازتابنده براگ توزیع یافته

یک ساختار بلور فوتونی یک‌بعدی (1DPC) می‌تواند به گونه‌ای طراحی شود که حداکثر بازتاب را برای یک ناحیه وسیع از طول موج‌ها ($\Delta\lambda$) که در اطراف طول موج براگ (λ_B) متمرکز است، فراهم کند. این ناحیه به‌عنوان شکاف باند فوتونی شناخته می‌شود، زیرا در این بازه طول موج، میزان عبور نور تقریباً ناچیز است که طول موج براگ به‌صورت زیر تعریف می‌شود: [۹،۱۰]

$$\lambda_B = 4n_l d_l = 4n_h d_h \quad (1)$$

که در آن n_l و n_h ضرایب شکست لایه‌های متناوب با ضریب شکست پایین و بالا با ضخامت‌های d_l و d_h می‌باشند و بازتاب مربوط به ساختار به‌صورت زیر داده شده است:

$$R(\lambda_B) = \left[\frac{n_0(n_l)^{2N} - n_s(n_h)^{2N}}{n_0(n_l)^{2N} + n_s(n_h)^{2N}} \right]^2 \quad (2)$$

سوم انرژی تابشی خورشید در بازه طول موجی ۰/۴ تا ۱/۱ میکرومتر قرار دارد. سلول‌های خورشیدی سیلیکونی دارای طول موج قطع حدود ۱/۱ میکرومتر هستند؛ بنابراین، پرتوهایی با طول موج کمتر جذب شده و آن‌هایی که طول موج بیشتری دارند، از سلول عبور کرده و در لایه زیرین به گرما تبدیل می‌شوند [۱۲].

به منظور بررسی اثرات تابش و دمای سلول، محاسبه دوره تناوب و طول زمان روشنایی (T_L) و خورشید گرفتگی (T_E) مدار ضروری می‌باشد. زمان خورشید گرفتگی ماهواره از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۲].

$$T_E = T \cdot \frac{1}{180} \cdot \cos^{-1} \left[\frac{\left(1 - \left(\frac{R_E}{a}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}}{\cos \beta} \right] \quad (۱۴)$$

در رابطه بالا، $T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}}$ پریود مدار، $R_E = 6372 \text{ km}$ و $\mu = \frac{km^3}{s^2}$ و $a = R_E + \text{Altitude}$ به ترتیب شعاع مدار بوده و β زاویه بردار خورشیدی با صفحه مداری ماهواره در زمانی است که ماهواره در نزدیک‌ترین فاصله از خورشید قرار دارد. تنها برای β قابل استفاده است که از مقدار استانه شروع خورشید گرفتگی $\beta^* = \sin^{-1} \left(\frac{R_E}{a}\right)$ کمتر است. تغییرات دما، مشخصه‌های سلول خورشیدی مانند جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و توان خروجی را در کوتاه مدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. ضریب حرارتی جریان، مثبت و کوتاه و ضریب حرارتی ولتاژ، منفی و از نظر قدر مطلق بزرگ تر است. رابطه تغییرات توان با دما به صورت رابطه زیر است [۱۲].

$$P(T) \approx P_0 \cdot (1 + \gamma(T - T_0)) \quad (۱۵)$$

مقدار نرخ تغییرات توان به تغییرات دما (γ) برای سیلیکون با فرض P_0 در دمای مرجع استاندارد تقریباً برابر 0.046°C^{-1} است. میزان کاهش توان خروجی برابر مدار (1100 Km) LEO با حداکثر دمای 80°C برابر ۲۵ درصد است [۱۲].

اثرات تشعشع بر عملکرد سلول خورشیدی

گذر زمان کارایی سلول خورشیدی تحت تاثیر پرتوهای کیهانی پرنانرژی قرار گیرد و باعث افت در سلول می‌شود. طیف وسیع ذرات و امواج پرنانرژی پرتوهای فوتونی، الکترونی، پروتونی، نوترونی، یونی، الفای، ایکس، گاما، ریزه شهاب سنگ‌ها و الودگی‌های کیهانی است. در این بخش فقط پرتو الکترونی و پرتو پروتونی هستند که باعث کاهش کارایی سلول خورشیدی به ویژه در مدار LEO می‌گردند. بنابر دلایلی چون انتقال انرژی کم، ابعاد ریز الکترون‌ها باعث می‌شود اثر جابه‌جایی الکترون بسیار کم باشد. در نتیجه پرتوهای پروتونی مهم‌ترین عامل افت در سلول‌های خورشیدی است پرتوهای

در اینجا ϵ_0 و μ_0 به ترتیب ضریب گذردهی خلاء و نفوذپذیری هستند. با استفاده از این مفاهیم پایه، می‌توانیم روش ماتریس مشخصه اپتیکی کل ساختار بلور فوتونی را به صورت زیر بیان کرد:

$$M = M_1 \cdot M_2 \cdots M_N = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \quad (۷)$$

ضرایب بازتاب و عبور را به صورت زیر می‌توان تعیین کرد:

$$r = \frac{\eta_0(m_{11} + m_{12}\eta_m) - (m_{21} + m_{22}\eta_m)}{\eta_0(m_{11} + m_{12}\eta_m) + (m_{21} + m_{22}\eta_m)} \quad (۸)$$

$$t = \frac{2\eta_0}{\eta_0(m_{11} + m_{12}\eta_m) + (m_{21} + m_{22}\eta_m)} \quad (۹)$$

در اینجا η_0 و η_m به ترتیب پارامتر ادمیتانس اپتیکی مربوط به لایه‌های اول و آخر هستند. ما می‌توانیم به طور مستقیم از این روابط، بازتابندگی R و عبور T را تعیین کنیم:

$$R = |r|^2 \quad (۱۰)$$

$$T = \frac{\eta_m}{\eta_0} |t|^2 \quad (۱۱)$$

با محاسبه این دو پارامتر اخیر می‌توان بازتابنده براگ توزیع یافته را به منظور به کارگیری در سلول‌های خورشیدی با ویژگی‌های جذب و بازتاب مناسب طراحی کرد. ضرایب شکست برای ساختارهای به کار رفته در این پژوهش به صورت زیر می‌باشند [۱۱].

$$n_{Gas} = \sqrt{7.12996 + \left(\frac{0.26073}{\lambda^2 - 0.04627}\right) + \left(\frac{127.335}{\lambda^2 - 258.431}\right)} \quad (۱۲)$$

$$n_{Gase} = \sqrt{10.6409 + \left(\frac{0.3788}{\lambda^2 - 0.1232}\right) + \left(\frac{7090.7}{\lambda^2 - 2216.3}\right)} \quad (۱۳)$$

ضریب شکست لایه میکا دوبعدی نیز براساس مرجع [۱۱]، ۱/۵۵ انتخاب شده است.

سلول خورشیدی سیلیکونی فضایی

عملکرد سلول‌های خورشیدی در آغاز ماموریت (BOL)

بازدهی اولیه سلول‌های خورشیدی به عوامل مختلفی از جمله نوع سلول، شدت تابش در مدار و دمای محیط سلول وابسته است. تقریباً دو

$$I(\varphi, G, T) = I_{SC}(\varphi, G, T) - I_{SAT}(\varphi, G, T) \left(e^{\frac{V(\varphi, G, T) + R_S I(\varphi, G, T)}{nV_T}} - 1 \right) \quad (20)$$

$$I_{SAT}(\varphi, G, T) = I_{SC}(\varphi, G, T) \cdot e^{-\frac{V_{OC}(\varphi, G, T)}{nV_T}} \quad (21)$$

مقدار جریان و ولتاژ سلول در نقطه ماکزیمم توان (I_m, V_m) در هر تابش، دما و شار تشعشی از روابط (۲۲) و (۲۳) مقدار توان ماکزیمم (P_{max}) از $P_{max}(\varphi, G, T) = V_m(\varphi, G, T)I_m(\varphi, G, T)$ می‌آیند [۱۸، ۱۹].

$$I_m(\varphi, G, T) = I_{mr} \frac{G}{G_r} + \frac{dI_{SC}}{dT} |_{BOL} (T - T_r) - K_J \log_{10} \left(1 + \frac{\varphi}{\varphi_J} \right) \quad (22)$$

$$V_m(\varphi, G, T) = nV_T \ln \left(1 + \frac{I_{SC}(\varphi, G, T) - I_m(\varphi, G, T)}{I_m(\varphi, G, T)} \left(e^{\frac{V_{OC}(\varphi, G, T)}{nV_T}} - 1 \right) - R_S I_m(\varphi, G, T) \right) \quad (23)$$

بحث و نتایج

بازتابنده براگ توزیع یافته کارآمد عملکرد یک سلول خورشیدی را افزایش می‌دهد و از این رو طراحی کامل آن از اهمیت زیادی برخوردار است. در شکل ۳ طیف بازتابی بلور فوتونی (بالا) GaS/Mica (پایین) GaSe/Mica با دوره تناوب‌های مختلف و ضخامت لایه گالیم سولفید و گالیم سلناید ۴۷ نانومتری به‌عنوان آینه براگ توزیع یافته نمایش داده شده است. با توجه به شکل با افزایش تعداد دوره تناوب از ۲ تا ۸ در هر دو ساختار گاف باندی فوتونی به گاف کامل‌تر تبدیل می‌شود و درصد بازتاب به ۹۹ درصد می‌رسد و همچنین گاف باندی فوتونی پهن‌تر می‌شود. به‌دلیل پهن‌تر بودن گاف در بلور فوتونی گالیم سلناید نسبت به گالیم سولفید محدوده طول موجی بیشتری را پوشش می‌دهد $PBG_{GaSe} > PBG_{GaS}$. به‌منظور انتخاب حالت بهینه برای طراحی بازتابنده براگ توزیع یافته، بلور فوتونی با دوره تناوب ۸ را انتخاب می‌کنیم که دارای بیشترین پهنای گاف و به‌عبارتی بیشترین میزان بازتابندگی در محدوده وسیع‌تری از طول موج‌ها است. پهنای گاف مورد نظر برای ساختار اول و دوم به ترتیب ۱۷۷ و ۲۸۵ نانومتر می‌باشد.

پرانرژی می‌توانند عامل یونیزاسیون و شکست هسته نیز باشند. تخریب جابه‌جایی اتمی مهم‌ترین اثر ذرات برخوردکننده در شبکه بلور سلول است. عمق نفوذ الکترون‌ها و پروتون‌ها و میزان تخریب جابه‌جایی اتمی ناشی از آن‌ها به جنس سلول، انرژی و نوع ذره، سطح مقطع جابه‌جایی و شار تشعشی بستگی دارد. سطوح انرژی پرتوها در مدار LEO در مراجع [۱۲-۱۴] ارائه شده است.

ویژگی دینامیکی خروجی سلول خورشیدی در مدارهای فضایی، در طول زمان تحت تاثیر سه عامل اصلی شامل تابش (G) خورشیدی و دمای سلول (T) و میزان تشعشع (φ) دچار تغییر می‌شوند. دمای سلول نیز به‌طور مستقیم به دمای محیط و شدت تابش وابسته است. افزون بر این، ضرایب دمای جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز سلول تابعی از شار جمعی تشعشعات دریافتی هستند. دمای سلول متفاوت از دمای محیط بوده و مقدار آن مطابق رابطه (۱۶) به شرایط عملکرد نامی noct و تابش بستگی دارد [۱۵-۱۷].

$$T = T_{cell} = T_a + \left[G \cdot \frac{noct - 20}{800} \right] \quad (16)$$

برآورد شار تشعشی جمعی در جهت ایجاد شرایط انتهایی ماموریت (EOL)، در یک ماموریت ۵ ساله، و برای مدارات LEO برابر $1 \times 10^{15} \text{ e/cm}^2$ فرض می‌گردد [۱۴، ۱۷].

بجهت برابری اثرات تخریبی سه پارامتر J_{SC} ، V_{OC} ، P_{max} برای سیلیکون می‌توان روابط حاکم بر افت کارایی سلول از جهت کاهش چگالی جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدارباز و توان ماکزیمم واحد سطح سلول را برحسب شار تشعشی الکترونی معادل مطابق روابط (۱۷) تا (۱۹) نشان داد. مقادیر K_i و φ_i برای جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدارباز و توان ماکزیمم سلول سیلیکانی است [۱۵-۱۹].

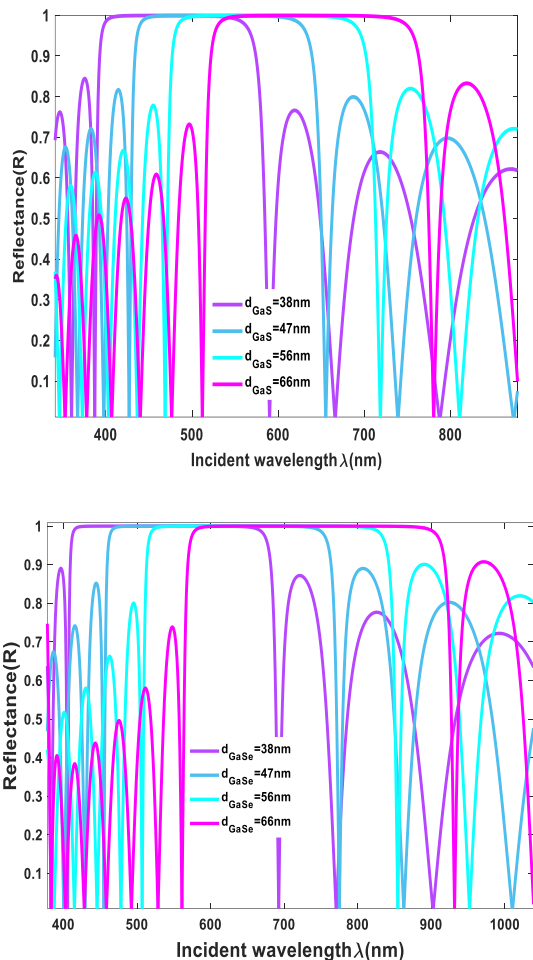
$$J_{SC}(\varphi) = J_{SC}(BOL) - K_J \cdot \log_{10} \left(1 + \frac{\varphi}{\varphi_J} \right) \quad (17)$$

$$V_{OC}(\varphi) = V_{OC}(BOL) - K_V \cdot \log_{10} \left(1 + \frac{\varphi}{\varphi_V} \right) \quad (18)$$

$$P_{max}(\varphi) = P_{max}(BOL) - K_P \cdot \log_{10} \left(1 + \frac{\varphi}{\varphi_P} \right) \quad (19)$$

حالت کلی جریان اتصال کوتاه به‌صورت $J_{SC} = J_{SC}(\varphi, G, T)$ تابع هر سه ورودی است. در BOL، $\varphi = 0$ و لذا رابطه (۲۰) برقرار است که در آن J_{SCr} جریان اتصال کوتاه در شرایط مرجع $G, T = T_r$ و بدون تشعشع ($\varphi = 0$) و $\frac{dJ_{SC}}{dT} |_{BOL}$ ضریب حرارتی جریان اتصال کوتاه در ابتدای ماموریت است [۱۸، ۱۹].

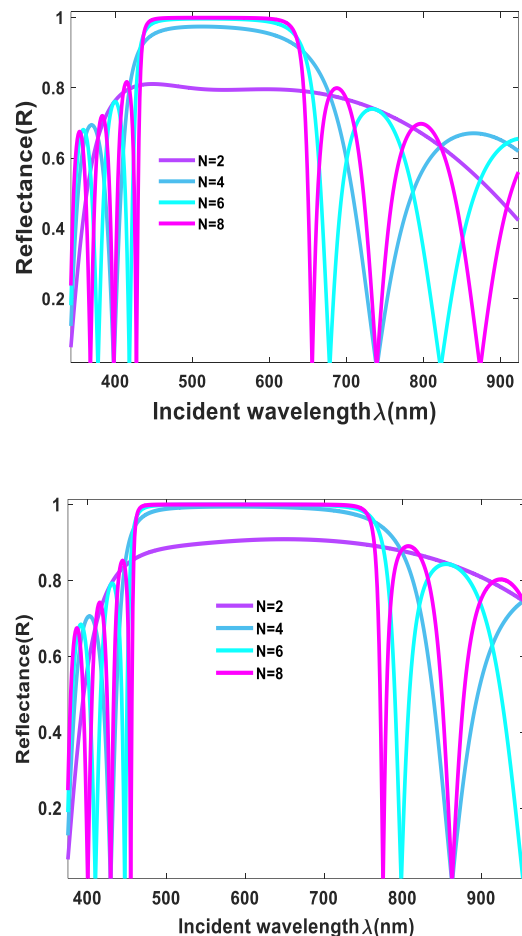
مرئی از تابش خورشید که بیش از ۴۰ درصد انرژی تابشی را به خود اختصاص داده بهترین انتخاب از دو ساختار شبیه‌سازی شده ضخامت ۴۷ نانومتری برای هر دو ساختار با بیشترین پوشش ناحیه مرئی به ترتیب با ۴۴۰ تا ۶۲۱ نانومتر است.



شکل ۴- طیف بازتابی بلور فوتونی (بالا) GaS/Mica (پایین) GaSe/Mica با ضخامت‌های مختلف لایه GaS و GaSe به‌عنوان آینه براگ توزیع یافته.

Fig. 4. Reflection spectrum of photonic crystals (top) (GaS/Mica) and (bottom) (GaSe/Mica) with different thicknesses of GaS and GaSe layers as Distributed Bragg mirrors.

برای ساختار اول و ۴۶۴ تا ۷۴۹ نانومتر برای ساختار دوم با درصد بازتابندگی ۹۹ درصد می‌باشد. برای پوشش دادن بخشی از طیف مرئی و بخش دیدگری از ناحیه مادون قرمز نزدیک از طیف تابشی خورشید نیز ضخامت ۶۶ نانومتری ساختار دوم با محدوده طول موجی ۵۷۷ تا ۹۰۲ نانومتری با درصد بازتاب ۹۹ درصد به‌دست آمد.



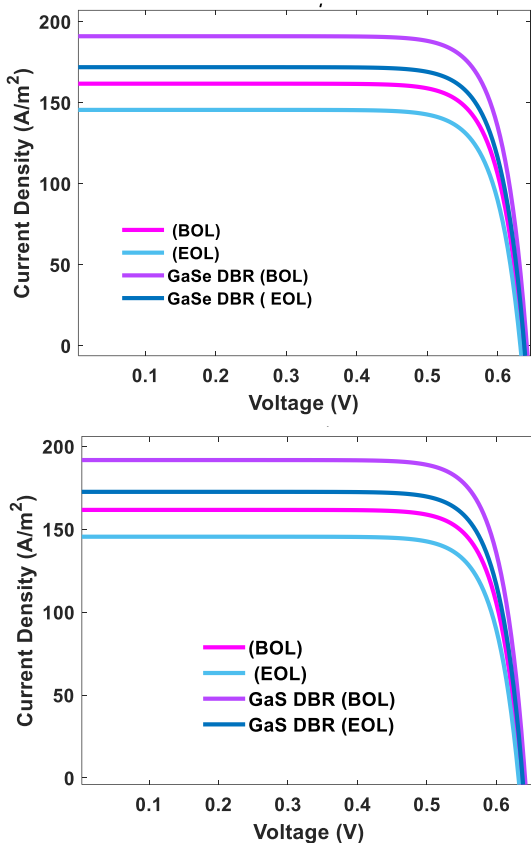
شکل ۳- طیف بازتابی بلور فوتونی (بالا) GaS/Mica (پایین) GaSe/Mica با دوره تناوب‌های مختلف به‌عنوان آینه براگ توزیع یافته.

Fig. 3. Reflection spectrum of photonic crystal (top) (GaS/Mica) bottom) (GaSe/Mica) with different periodicity as Distributed Bragg mirror.

شکل ۴ طیف بازتابی بلورهای فوتونی مورد نظر را به‌ازای دوره تناوب ۸ و ضخامت زیر لایه ۸۶ نانومتری میکا بر حسب ضخامت لایه‌های گالیم سولفید و گالیم سلناید مختلف از ۳۸ تا ۶۶ نانومتر نمایش می‌دهد. با افزایش ضخامت لایه‌های مورد نظر پهنای گاف باندی فوتونی افزایش یافته و طول موج اولیه و نهایی پنجره بازتابی به سمت طول موج‌های بلندتر انتقال پیدا می‌کند. بیشترین پهنای گاف فوتونی کامل برای ضخامت‌های ۶۶ نانومتری از هر دو ساختار به ترتیب برای ساختار اول و دوم برابر ۲۰۶ و ۳۲۵ نانومتری برای محدوده‌های طول موجی ۵۳۴-۷۴۰ و ۵۷۷-۹۰۲ نانومتری به‌دست آمد. برای انتخاب حالت بهینه برای طراحی بازتابنده براگ توزیع یافته به‌منظور پوشش دادن پنجره بازتابندگی ۴۰۰ تا ۷۸۰ نانومتری ناحیه

فوتونیکی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل ۵ برای هر دو نوع بازتابنده طراحی شده بهبود چگالی جریان نقطه بیشینه توان برای ابتدا و انتهای ماموریت ماهواره کاملا مشهود می‌باشد. میزان افت جریان نقطه بیشینه توان سلول‌های خورشیدی مورد نظر در انتهای ماموریت برای هر دو نوع بازتابنده طراحی شده در انتهای محدودیت تقریباً برابر ۱۰ درصد می‌باشد.

در شکل ۶ منحنی مشخصه P-V برای هر دو طراحی به همراه حالت بدون بازتابنده برای ابتدا و انتهای ماموریت نمایش داده شده است. با توجه به منحنی‌های مورد نظر برای دو بازتابنده طراحی شده بهبود توان بیشینه برای هر دو ساختار نسبت به حالت بدون بازتابنده برای ابتدا و انتهای ماموریت مشخص می‌باشد. همچنین میزان افت توان بیشینه برای هر دو بازتابنده در انتهای ماموریت تقریباً برابر ۱۰ درصد می‌باشد.



شکل ۵- منحنی مشخصه J-V سلول خورشیدی لایه نازک سیلیکونی فضایی با لایه DBR برای (بالا) GaSe (پایین) GaS و بدون آن در تشعشع‌های ابتدا و انتهای ماموریت مدار LEO در تابش $1000 \frac{W}{m^2}$ و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد.

Fig. 5. J-V characteristic curve of a space silicon thin film solar cell with DBR layer for (top) GaSe (bottom) GaS and without it in the radiations of the beginning and end of the LEO orbit mission at irradiance of $1000 \frac{W}{m^2}$ and temperature of 25 degrees Celsius.

جدول ۱- دامنه و پهنای ناحیه بازتاب‌کننده گاف باندی فوتونیکی (PBG) در ضخامت‌های مختلف لایه‌های بازتابنده براگ GaSe, GaS، در این مطالعه [*] و همچنین [۲۰] MgF2 نمایش داده شده است.

Table 1. The amplitude and width of the photonic band gap (PBG) reflective region have been shown in different thicknesses of the Bragg reflective layers of GaSe, GaS, in this study[*] and also MgF2 [20].

	d_1 (nm)	d_2 (nm)	PBG(nm)	ref
GaS	38	86	156	*
	47	86	177	
	56	86	194	
	66	86	206	
GaSe	38	86	255	*
	47	86	285	
	56	86	307	
	66	86	325	
MgF ₂	35	75	144	[20]
	50	75	193	
	65	75	237	
	75	75	256	

در جدول ۱ دامنه و پهنای ناحیه بازتاب‌کننده گاف باندی فوتونیکی در ضخامت‌های مختلف لایه‌های بازتابنده براگ GaSe, GaS و MgF₂ مرجع [۲۰] نمایش داده شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده بیشترین پهنای گاف ۳۲۵ نانومتر برای GaSe به‌ازای ضخامت ۸۶ نانومتر به‌دست آمده است.

به‌منظور بررسی عملکرد و میزان تاثیر ساختارهای آینه براگ توزیع یافته طراحی شده بر پارامترهای اساسی سلول‌های خورشیدی فضایی با در نظر گرفتن مدل ساده سلول خورشیدی تک دیودی سیلیکونی لایه نازک به ضخامت ۵ میکرومتری لایه سیلیکون به‌عنوان مدل پایه و بدون در نظر گرفتن اثرات تغییرات ضرایب حرارتی جریان، ولتاژ و توان در دماهای مختلف می‌باشد. صرفاً با در نظر گرفتن اثرات تشعشعی برای بررسی میزان بهبود مشخصه‌های اصلی یک سلول خورشیدی لایه نازک سیلیکونی برای ماموریت ۵ ساله با میزان شار تجمعی $1 \times 10^{15} e/cm^2$ مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور منحنی مشخصه J-V و P-V سلول خورشیدی مورد نظر با در نظر گرفتن شار تجمعی حالت‌های آغاز و پایان ماموریت ماهواره در مدار LEO یک‌بار با آینه‌های براگ توزیع یافته از مواد دوبعدی گالیوم سولفید و گالیوم سلناید و یک‌بار بدون این افزاره

آینه براگ برای ابتدای ماموریت به ترتیب ۱۸/۵۵ و ۱۸/۰۵ و انتهای ماموریت ۱۸/۶۲ و ۱۸/۰۷ می‌باشد.

جدول ۲- مقایسه نتایج اثر تشعشع‌های فضایی بر پارامترهای اصلی سلول خورشیدی فضایی لایه نازک سیلیکونی به ضخامت ۵ میکرومتر با بازتابنده براگ GaSe و GaS و بدون آن برای حالت‌های ابتدا و انتهای ماموریت در مدار LEO

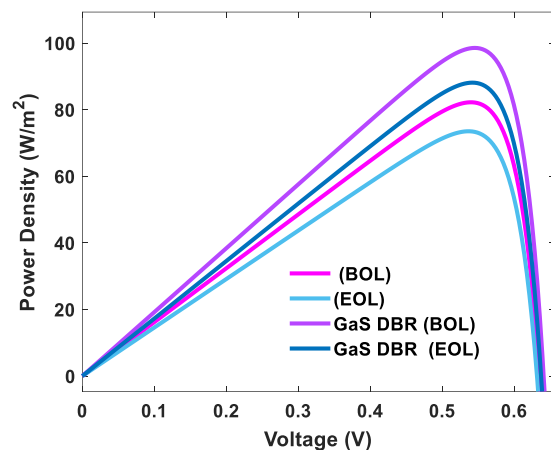
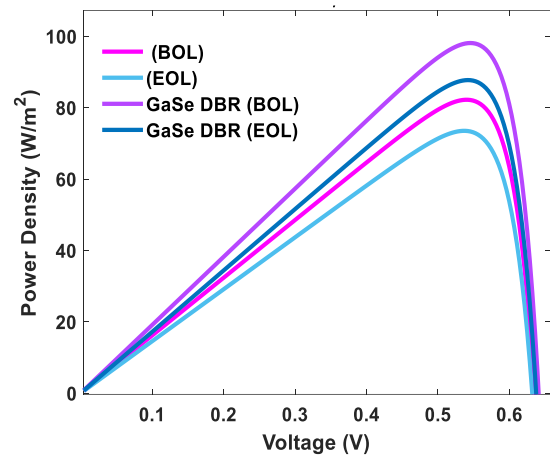
Table 2. Comparison of the results of the effect of space radiation on the main parameters of a 5 μm thick silicon thin film space solar cell with and without a GaS and GaSe Bragg reflector for the beginning and end of the mission in LEO orbit.

LEO	GaS DBR		GaSe DBR		Without DBR	
	BOL	EOL	BOL	EOL	BOL	EOL
$P_{max} (\frac{W}{m^2})$	98.5	88.1	98.1	87.7	82.2	73.5
$J_{sc} (\frac{A}{m^2})$	191.7	172.6	190.9	171.8	161.7	145.5
$V_{oc} (V)$	0.643	0.645	0.642	0.639	0.635	0.632
$J_m (\frac{A}{m^2})$	180.6	162.59	179.87	161.9	151.7	136.5
$V_m (V)$	0.545	0.541	0.545	0.541	0.541	0.538

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهند که طیف بازتابی بلور فوتونی برای آینه براگ توزیع یافته با افزایش لایه‌ها از ۲ تا ۸ در ساختار گاف باندی فوتونی به گاف کامل‌تر تبدیل می‌شود و دارای محدوده طول موجی پهن‌تر برای ماده دو بعدی GaSe نسبت به GaS می‌باشد. بیشترین پهنای گاف فوتونی کامل برای ضخامت‌های ۶۶ نانومتری از هر دو ساختار به ترتیب برای ساختار اول و دوم برابر ۲۰۶ و ۳۲۵ نانومتری برای محدوده‌های طول موجی ۷۴۰-۵۳۴ و ۹۰۲-۵۷۷ نانومتری است.

همچنین برای بررسی میزان تاثیر ساختارهای آینه براگ توزیع یافته طراحی شده بر پارامترهای اساسی سلول‌های خورشیدی فضایی با در نظر گرفتن مدل ساده سلول خورشیدی تک دیودی به‌عنوان مدل پایه و بدون در نظر گرفتن اثرات حرارتی صرفاً با در نظر گرفتن اثرات تشعشعی برای بررسی میزان بهبود مشخصه‌های اصلی یک سلول خورشیدی لایه نازک سیلیکونی برای ماموریت ۵ ساله با میزان شار تجمعی $1 \times 10^{15} e/cm^2$ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان دهنده ارتقا و بهبود پارامترهای اصلی (بیشینه توان، جریان بیشینه



شکل ۶- منحنی مشخصه P-V سلول خورشیدی لایه نازک سیلیکونی فضایی با لایه DBR برای (بالا) GaSe (پایین) GaS و بدون آن در تشعشع‌های ابتدا و انتهای ماموریت مدار LEO در تابش $1000 \frac{W}{m^2}$ و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.

Fig. 6. P-V characteristic curve of a space-based thin film silicon solar cell with a DBR layer for (top) GaSe, (bottom) GaS and without it in the radiations of the beginning and end of the LEO orbit mission at an irradiation of $1000 W/m^2$ and a temperature of 25 degrees Celsius.

در جدول ۲ نتایج شبیه‌سازی اثرات تشعشعی بر مشخصه‌های اصلی سلول خورشیدی فضایی در شرایط تابش $1000 \frac{W}{m^2}$ و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد در مدار LEO برای ابتدا و انتهای ماموریت با آینه DBR از دو ماده دوبعدی GaS و GaSe و بدون آن ارائه شده است. با توجه به نتایج میزان بهبود بیشینه توان برای ابتدای و انتهای ماموریت حالت بدون بازتابنده به حالت با بازتابنده براگ از نوع GaS و GaSe به ترتیب برابر ۱۹/۸ و ۱۹۴/۳۴ درصد می‌باشد. همچنین میزان بهبود پارامتر بیشینه چگالی جریان برای ابتدای ماموریت به ترتیب برابر ۱۹/۰۵ و ۱۸/۵۶ درصد و برای انتهای ماموریت ۱۹/۱۱ و ۱۸/۶ درصد می‌باشد. برای پارامتر چگالی جریان اتصال کوتاه نیز این درصد تقویت شدگی با

- vol. 43, no. 2, pp. 203-222, 1996, [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(96\)00015-3](https://doi.org/10.1016/0927-0248(96)00015-3).
- [9] A. Soman and A. Antony, "Tuneable and spectrally selective broadband reflector-modulated photonic crystals and its application in solar cells," *Solar Energy*, vol. 162, pp. 525-5302, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.061>.
- [10] K. Sankar, R. Manoharan, S. Saif, and T. P. Rose, "An optimum design of one dimensional photonic crystal for solar cell applications," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1219, Chennai, India, 2022, Art. no. 012047, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1219/1/012047>.
- [11] A. Abderrahmane, K. Senouci, B. Hachemi, and P. J. Ko, "2D gallium sulfide-based 1D photonic crystal biosensor for Glucose concentration detection," *Materials*, vol. 16, no. 13, 2023, Art. no. 4621, <https://doi.org/10.3390/ma16134621>.
- [12] M. R. Patel, *Spacecraft Power Systems*, 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2005, <https://doi.org/10.1201/9781420038217>.
- [13] *Space Environment Standards*, ECSS-E-10-4A, ESA, Noordwijk, The Netherlands, 2025.
- [14] V. L. Pisacane, *Fundamentals of Space Systems*, 2rd ed. Oxford: University Press, 2005.
- [15] B. E. Anspaugh, *GaAs Solar Cell Radiation Handbook*, National Aeronautics and Space Administration (NASA), Pasadena, California: 1996.
- [16] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2^{re} ed. John Wiley, 2003.
- [17] N. S. Fatemi, H. E. Pollard, H. Q. Hou, and P. R. Sharps, "Solar array trades between very high-efficiency multi-junction and Si space solar cells," in *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2000 (Cat. No.00CH37036)*, Anchorage, AK, USA, 2000, pp. 1083-1086, <https://doi.org/10.1109/PVSC.2000.916075>.
- [18] L. Castaner and S. Silvestre, *Modeling Photovoltaic Systems Using PSpice*, John Wiley, 2002.
- [19] A. Goetzberger, J. Knobloch, B. Voss, *Crystalline Silicon Solar Cells*, John Wiley & Sons, LTD, 1998.
- [20] H. Sayed, A. M. Ahmed, A. Hajjiah, M. A. Abdelkawy, and A. H. Aly, "Optimization of amorphous silicon solar cells through photonic crystals for enhanced optical properties," *Scientific Reports*, vol. 15, 2025, Art. no. 16529, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00443-2>.

توان، جریان اتصال کوتاه) سلول خورشیدی مورد نظر به صورت میانگین ۱۸/۷۷ درصد بهبود نسبت به حالت نبود بازتابنده‌های مورد نظر می‌باشد. از نتایج به دست آمده این رهیافت می‌توان به طور مؤثری برای بهبود کارایی سلول خورشیدی فضایی بهره برد.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] R. Verduci *et al.*, "Solar energy in space applications: Review and technology perspectives," *Advanced Energy Materials*, vol. 12, no. 12, 2022, Art. no. 2200125, <https://doi.org/10.1002/aenm.202200125>.
- [2] A. H. Aly and H. Sayed, "Enhancement of the solar cell based on nanophotonic crystals," *Journal of Nanophotonics*, vol. 11, no. 4, 2017, Art. no. 046020 <https://doi.org/10.1117/1.JNP.11.046020>.
- [3] P. You, G. Tang, and F. Yan, "Two-dimensional materials in Perovskite solar cells," *Materials Today Energy*, vol. 11, pp. 128-158, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2018.11.006>.
- [4] I. M. Santos *et al.*, "Next-generation solar-powering: Photonic strategies for Earth and space systems," *Solar RRL*, vol. 9, no. 7, 2025, Art. no. 2400061, <https://doi.org/10.1002/solr.202400666>.
- [5] S. Das, D. Pandey, J. Thomas, and T. Roy, "The role of graphene and other 2D materials in solar photovoltaics," *Advanced Materials*, vol. 31, no. 1, 2018, Art. no. 1802722, <https://doi.org/10.1002/adma.201802722>.
- [6] R. S. Dubey, S. Saravanan, and S. Kalainathan, "Performance enhancement of thin film silicon solar cells based on distributed Bragg reflector & diffraction grating," *AIP Advances*, vol. 4, 2014, Art. no. 127121, <https://doi.org/10.1063/1.4904218>.
- [7] R. Biswas, J. Bhattacharya, B. Lewis, N. Chakravarty, and V. Dalal, "Enhanced nanocrystalline silicon solar cell with a photonic crystal back-reflector," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 94, no. 12, pp. 2337-2342, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.08.007>.
- [8] A. Martí and G. L. Araújo, "Limiting efficiencies for photovoltaic energy conversion in multigap systems," *Solar Energy Materials and Solar Cells*,