لیزر در پزشکی ۱۴۰۰/ دوره ۱۸ / شماره (۴) / صفحات ۳۲-۲۶.

مقاله پژوهشی

طراحی ابزارهای اپتیکی برمبنای یک سیستم فتوسنتزی به منظور افزایش کارائی در فرایند جذب پرتو لیزر

پریسا حسین‌نژاد[۱]
سهراب بهنیا[۲]
سمیرا فتحی‌زاده[۳]*

۱- دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران
۲- استادتمام، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران
۳- استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

نویسندهٔ مسئول: سمیرا فتحی‌زاده

پست الکترونیکی:
s.fathizadeh@sci.uut.ac.ir

شماره تماس: ۰۴۴۳۱۹۸۰۲۲۹

چکیده

مقـدمه: امروزه پیشرفت‌های قابل توجهی در جهت استفاده از مواد بیولوژیکی تجدیدپذیر به عنوان ابزار ذخیره انرژی، به وجود آمده است. این ابزارها به عنوان راه‌حلی برای مشکل آلودگی و ناپایداری با توانایی ذخیره‌سازی انرژی به شمار می‌روند. از طرفی تبدیل گرما به توان تولیدی به صورت کاربردی بسیار قابل توجه است. بر این اساس استفاده از یک سیستم بیولوژیکی به عنوان ابزار ترموکارنت و ترموپاور می‌تواند بسیار جذاب و مورد توجه باشد.

روش بررسی: در این مطالعه، برای مطالعه توانایی تولید جریان ناشی از گرادیان دما از یک سیستم فتوسنتزی، کلروزوم، استفاده کرده‌ایم. به‌منظور اعمال حرارت روی سلول و بررسی شرایط ایجاد و هدایت جریان‌های الکتریکی ناشی از حرارت محیط از لیزر مادون قرمز استفاده می شود. سیستم تحت تابش نور لیزر قرار گرفته و گرم می‌شود که برای بررسی اثرات گرمایی ناشی از تابش لیزر از مدل‌سازی تماس مستقیم سیستم با ترموستات کوانتومی استفاده کرده‌ایم. از طرفی، به‌منظور به‌دست آوردن ضریب سی‌بک از الکترودهای فلزی استفاده کرده ایم تا بتوانیم در دو انتهای سیستم اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد کنیم.

یافته‌ها: مقدار جریان عبوری و مقدار ولتاژ تولیدی به‌ازاء گرادیان دمای متفاوت حالت صعودی داشته و حداکثر می‌تواند به مقدار ۳۶٫۶ nA و ۰٫۳ V دست پیدا کند که امکان طراحی و ساخت ابزارهایی با توان ۱۱٫۱nW را به ما می‌دهد. ضریب سی‌بک به مقداری برابر ۴۱٫۹۱۶ mV/K~ رسیده که نسبت به دیگر سیستم‌های بیولوژیکی مقدار قابل توجهی است. نمودار $I-\delta V-\delta T$ دماهای ۳۰ و ۵۰ کلوین را برای حداکثر جریان عبوری از سیستم مشخص کرده است. نمودار توزیع ترازها و بعد فرکتالی نشان‌دهنده پایداری کامل و غیرجای‌گزیده‌بودن سیستم به‌ازاء این گرادیان دما و ولتاژ است.

نتیجه‌گیری: کرموفورها به عنوان منابع جذب در محیط‌های بکارگیری پرتو لیزر می‌توانند به عنوان چشمه‌هایی برای افزایش فرایند جذب و تبدیل شار فوتونی لیزر به چشمه الکترونی و یا فونونی عمل کنند و امکان کنترل و هدایت فرایند انتقال انرژی چشمه فوتونی را به محیط‌های مورد نیاز فراهم نمایند. مطالعه حاضر به طراحی و مهندسی چشمه‌های نوری بر مبنای سیستم فتوسنتزی برای افزایش کارایی در فرایند جذب تابش لیزر می‌پردازد. مقدار جریان الکتریکی بدست آمده و توان تولیدشده برای سیستم در حدی است که قابل مقایسه با دیگر سیستم‌های بیولوژیکی و نشان‌دهنده قابلیت این سیستم‌ها به عنوان ابزار ترموکارنت و ترموپاور است. ضریب سی‌بک نیز نسبت به دیگر سیستم‌های بیولوژیکی مقدار قابل توجهی است. ازطرفی، سیستم در مقابل گرادین دمای ناشی از تابش نور و ولتاژ اعمالی به صورت پایدار و غیرجای‌گزیده رفتار می کند.

واژه‌های کلیدی: : سیستم فتوسنتزی، ترموکارنت، ضریب سی بک، توزیع آماری ترازها، بعد فرکتالی.

مقدمه

استفاده از منابع انرژی فعلی مانند سوخت‌های فسیلی، حداکثر برای یک قرن دیگر جوابگو خواهد بود و نیاز به جایگزینی مناسب با ریسک کمتر دارد. منابعی که مشکلات سابق چون آلودگی، تولید گازهای گلخانه‌ای که تهدیدی برای سلامت انسان‌ها و گرمایش جهانی است را نداشته باشند. انرژی به عنوان جدی‌ترین مسئله قرن ۲۱ مطرح است [۱]. از طرفی، فرآیند فوسنتز به عنوان منشاء انرژی طبیعت، مسئول حفظ زندگی بر روی کره زمین بوده است. این فرایند بسیار بهینه، با ظرفیت بالا در استفاده از نور خورشید است. انرژی که در اثر فتوسنتز می‌تواند روی زمین ذخیره شود ۱۰ برابر انرژی است که انسان‌ها روزانه استفاده می‌کنند [۲]. بنابراین الهام از طبیعت برای ساختن منابع و ذخیره‌سازی انرژی بسیار قابل توجه است. تکنولوژی ترموالکتریک توانایی ذخیره مستقیم توان الکتریکی را از گرما دارد و مواد ترموالکتریک از طریق تبدیل مستقیم گرما به الکتریسیته به عنوان ابزارهای ذخیره‌کننده انرژی که دوستار محیط زیست است به شمار می‌روند. این ابزارها قابلیت تبدیل گرمای تلف‌شده را به الکتریسیته دارند، که به صورت موثر و کاربردی به عنوان ابزاری بهینه در جهت تولید و گسترش ابزارهای ساختار نانو به کار می‌روند [۳و۴]. استفاده از سیستم فتوسنتزی برای ساخت و ذخیره ی جریان الکتریکی و تعیین شرایطی است که این سیستم بتواند بهترین عملکرد خود را داشته باشند است. بدین منظور برای مطالعه توان تولیدی و قابلیت ترموکارنت یک سیستم فتوسنتزی از کلروزوم که در آنتن باکتری‌های سولفوری سبز یافت می‌شود، استفاده کردیم. تلاش ما نیز در جهت استفاده از سیستم فتوسنتزی برای ساخت و ذخیره جریان الکتریکی و تعیین شرایطی است که این سیستم بتواند بهترین عملکرد خود را داشته باشند است. تحقیقات اخیر به دنبال استفاده از انرژی فتوسنتزی و اثبات این نکته است که می‌تواند تاثیر عملی عالی در آینده نزدیک داشته باشد. بدین منظور برای مطالعه ی توان تولیدی، ضریب سی‌بک و پایداری سیستم، از یک سیستم فتوسنتزی از کلروزوم که در آنتن باکتری‌های سولفوری سبز یافت می‌شود، استفاده شده است. برهمکنش گرمایی از جمله واکنش‌هایی است که هنگام تابش لیزر بر روی سیستم‌های بیولوژیک ایجاد می‌شود وکاربرد بسزایی در لیزر پزشکی دارد. در این کار، گرادیان دما ناشی از تابش نور لیزر توسط اتصال ترموستات کوانتومی، در قالب نوسانگرهایی که به کروموفرها متصل شده‌اند، مدلسازی می‌شود. از طرفی، گرادیان ولتاژ توسط اتصال الکترودهای فلزی به دو انتهای سیستم ایجاد می‌شود و جریان عبوری از سیستم، به‌ازاء گرادیان دما و گرادیان ولتاژهای مختلف به‌دست می‌آید. براساس نمودار I-V و مشخص‌کردن نواحی شبه‌اهمی مقاومتی که سیستم در برابر عبور جریان از خود نشان می‌دهد بدست می‌آید. در ادامه نمودار ولتاژ برحسب گرادیان دما به‌دست می‌آید و میتوانیم توان تولیدی سیستم را تخمین بزنیم. براساس نمودار $I-\delta V-\delta T$ و تخمین توان تولیدی و ضریب سی‌بک، می‌توانیم با مشخص‌کردن دماهایی که جریان حداکثری از سیستم عبور می‌کند، پایداری سیستم را به ازاء این دماها با روش توزیع آماری ترازها و بعد فرکتالی مطالعه کنیم.

روش بررسی

برای کلروزوم ساختارهای متفاوت - ساختار سیلندری با حلقه‌هایی به فاصله یکسان که روی هم چیده‌شده تا ساختار قطبیده هلیکال پیشنهاد شده است. ما ساده‌ترین مدل شامل ۵ حلقه که ۱۸ مولکول کروموفر روی هر حلقه جای گرفته را انتخاب می‌کنیم. هامیلتونین سیستم برای این مدل، هامیلتونین فرنکل است که به شکل زیر تعریف می‌شود [۵]:

$$H_s=\sum_n \varepsilon_n a_n^+ a_n+\sum_{n\neq m} J_{nm} a_n^+ a_m \qquad (۱)$$

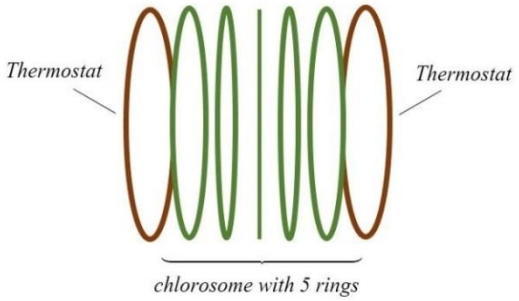
که ε_n ها انرژی برانگیختگی تک‌سایت و J_{nm} ثابت جفت‌شدگی بین سایت‌ها است. a_n^+ (a_n) عملگر خلق(فنا) ذره روی سایت n ام است. علاوه‌برآن سیستم در محیطی قرار گرفته که ناگریز از اندرکنش با محیط پیرامون خود است. مدل‌هایی که برای توصیف محیط (حمام گرمایی) به‌کار می‌روند معمولاً به صورت حمام بوزونی و فونونی تعریف می‌شود [٦]. حمام فونونی به صورت نوسان‌گرهایی که با کروموفرهای سیستم اندرکنش دارند مدل شده

است. لذا هامیلتونین حمام و هامیلتونین اندرکنش به صورت زیر تعریف می‌شود [۵]:

$$H_{bath} = \sum_q \hbar\omega_q b_q^+ b_q \qquad (۲)$$

$$H_{s-bath} = -\frac{1}{N}\sum_n \sum_q g\omega_q a_n^+ a_n (b_q e^{iqn} + b_q^+ e^{-iqn}) \qquad (۳)$$

که ω فرکانس مدهای فونونی، g ثابت جفت‌شدگی سیستم حمام و $b_n^+(b_n)$ عملگر خلق (فنا) فونون است. شکل (۱) یک توصیف کلی از سیستم مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: تصویر شماتیک از مدل مورد مطالعه

حال به‌منظور ایجاد گرادیان دما از ترموستات استفاده می‌کنم. به‌دلیل آنکه سیستم، کوانتومی است و می‌خواهیم مطالعه‌ای به صورت کوانتومی داشته باشیم نیاز داریم که از ترموستات کوانتومی بهره ببریم. پیش از این تلاش‌هایی در جهت توصیف این نوع ترموستات انجام شده بود [۷] ولی منجربه رابطه هامیلتونی نشده بود. با استفاده از معادل کوانتومی هامیلتونی نویز، ترموستات کوانتومی ایجاد شد که مطابق شکل ۱ به‌صورت نوسان‌گرهایی به کروموفرهای حلقه اول و آخر سیستم متصل شد. یک سمت در دما اتاق ثابت نگه داشته شده و سمت دیگر در رنج دمای [۳۴۰-۲۷۳] کلوین تغییر دادیم. با توجه به اینکه ساختار فتوسنتزی در دمای بالا تر از ۳۷۰ کلوین از بین می‌رود [۸]، بیشترین گرادیان دما را تا ۳۴۰ کلوین انتخاب می‌کنیم. به‌منظور ایجاد گرادیان ولتاژ دو الکترود فلزی را به دو انتهای سیستم متصل می‌کنیم. یکی از لیدها را در ولتاژ صفر نگه‌داشته و ولتاژ الکترود دوم را در رنج V[4-0] تغییر می‌دهیم. رابطه هامیلتونی برای این الکترودها و اتصالشان به سیستم به صورت زیر است:

$$H_{lead} = \sum_k (\varepsilon_k + \frac{eV}{2}) c_k^+ c_k + \sum_{k\neq l} J_{kl} c_k^+ c_l \qquad (۴)$$

$$H_{s-lead} = \sum_{n\neq k} (J_L c_n^+ c_k + J_R c_k^+ c_n) + H.c. \qquad (۵)$$

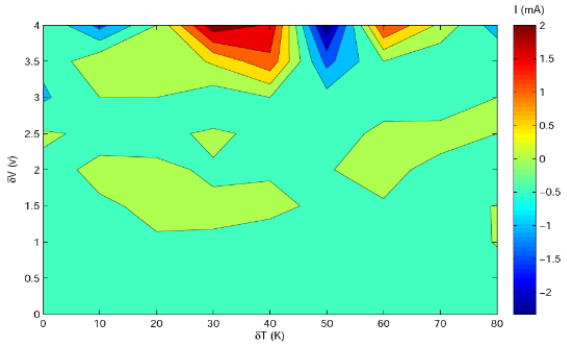
به‌منظور محاسبه جریان عبوری از سیستم در اثر گرادیان دما، با استفاده از رابطه پایستگی می‌توان جریان موضعی که از سایت n ام می‌گذرد را به صورت زیر محاسبه کرد [۹]:

$$I_n = \frac{d(eN_n)}{dt} = \frac{-ie}{\hbar}[a_n^+ a_n, H] \qquad (۶)$$

مقدار به‌دست آمده، جریان موضعی گذرنده از سایت nام را بدست می‌دهد. جریان کل الکتریکی را می‌توانیم با جمع تمام جریان‌های موضعی عبوری از سایت‌های سیستم بدست آوریم:

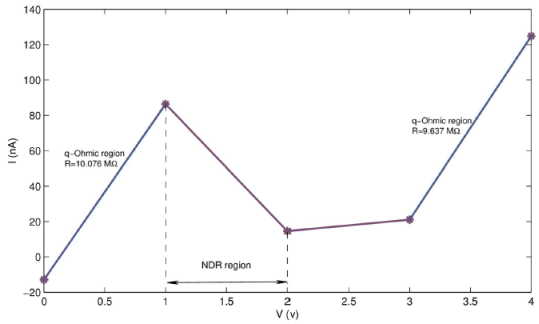
$$I = \sum_n I_n \qquad (۷)$$

جریان مورد محاسبه از طریق تعریف معادله تحول تعداد بارهای هر سایت به عنوان تابع (*function*) و با انتخاب طول گام‌های مناسب و محاسبات عددی (ODE45 در MATLAB)، می‌توانیم جریان عبوری از سیستم را بدست آوریم. نمودار جریان برحسب گرادیان دما و گرادیان ولتاژ به صورتی که در شکل ۲ نشان داده شده است، به‌دست می آید. همان‌گونه که از شکل مشخص است با افزایش گرادیان دما جزیره‌هایی با جریان معکوس ظاهر می‌شوند. شدت جریان قابل توجه در این نمودار به ازاء دو گرادیان دما ۳۰ کلوین و ۵۰ کلوین و گرادیان ولتاژ ۴ ولت اتفاق می‌افتد. بر این اساس برای این سیستم با چنین ویژگی‌هایی می‌توانیم به توان تولیدی حدود nW ۱۱۸ برسیم.



شکل ۲: نمودار جریان برحسب گرادیان دما و گرادیان ولتاژ. نوار جریان، شدت جریان عبوری از سیستم

نمودار جریان به ازاء گرادیان ولتاژ خارجی به‌صورتی‌که در شکل ۳ نشان داده شده است به‌دست می‌آید. نواحی شبه‌اهمی و NDR کاملا در نمودار مشخص است که بر این اساس می توانیم مقاومت سیستم را برای نواحی شبه‌اهمی به صورتی که در شکل ۳ مشخص است، محاسبه کنیم. با کمک مقاومت سیستم و جریان ناشی از گرادیان دما می‌توانیم مقدار ولتاژ تولیدی سیستم به ازاء گرادیان دما را داشته باشیم. نمودار اختلاف پتانسیل نیز همچون جریان، کاملا صعودی بوده و حداکثر پتانسیل تولیدی برابر ۰٫۳ V خواهد بود. علاوه‌برآن توان تولیدی سیستم نیز براساس مقادیر به‌دست آمده قابل محاسبه است.



شکل۳ : نمودار جریان به ازاء گرادیان ولتاژ اعمال‌شده

حال با این گرادیان دما و ایجاد پتانسیل الکتریکی می‌توانیم ضریب سی‌بک را به‌دست آوریم. شارش جریان بار با اعمال اختلاف دما اساس پدیده‌ای است که به آن اثر سی‌بک گفته می‌شود. در ناحیه خطی که متناظر با اختلاف دماهای کوچک است، پتانسیل الکتریکی به‌دست آمده متناسب با اختلاف دمای اعمالی به سیستم است. ضریب تناسب تحت عنوان ضریب سی‌بک نام‌گذاری شده است. به‌طور عملی ضریب سی‌بک از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\Delta V = S\Delta T \qquad (۸)$$

که مقدار به‌دست‌آمده برای سیستم فتوسنتزی برابر $S = 41.916mV/K$ است که نسبت به دیگر سیستم‌های بیولوژی بسیار قابل توجه است [۱۰]. در ادامه به مقایسه پایداری سیتم در دو دما پیشنهادی توسط شکل ۲ می‌پردازیم تا گرادیان دما و ولتاژی که به‌ازاء آن سیستمی پایدار با حداکثر جریان را داشته باشیم، تعیین کنیم.

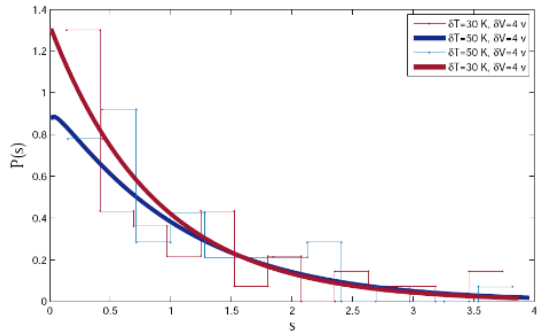
مطالعات آماری نشان می‌دهند که توزیع نزدیکترین فاصله ترازها برای سیستم‌های کاملاً منظم و پایدار به‌صورت توزیع پواسون می‌باشد:

$$P(s) = e^{-s} \qquad (۹)$$

درحالی‌که برای سیستم‌های غیرمنظم و ناپایدار توزیع به صورت ویگنر – دایسون است [۱۱]:

$$P_{WD} = \frac{\pi s}{2} e^{-\pi s^2/4} \qquad (۱۰)$$

برای به‌دست‌آوردن تابع توزیع نزدیکترین فاصله ترازی، انرژی ترازها را با کمک ویژه مقادیر ماتریس هامیلتونی به‌دست آورده، ترازهای انرژی را unfold کرده و تابع توزیع ($P(s)$) ترازهای جدید را به کمک نرم‌افزار متلب رسم می‌کنیم. به‌طوری که در شکل ۳ نشان داده‌شده نمودار توزیع ترازها به‌ازاء هر دو گرادیان دما به‌صورت پواسونی است که دلیل بر پایداری سیستم است.



شکل٤ : توزیع آماری ترازها (مقادیر عددی (خطوط نازک) و بهینه (خطوط ضخیم) برای گرادیان دما ی ۳۰ و ۵۰ کلوین با گرادیان ولتاژ ٤ ولت.

در ادامه برای تایید نتایج پایداری، از نمودار بعد فرکتالی سیستم کمک گرفته‌ایم. تحقیقاتی که دهه ۹۰ انجام‌شده نشان‌داده‌اند که توابع موج درگذار اندرسون، دامنه نوسانات قوی از خود به‌جا می‌گذارند که می‌توان با کمک مالتی فرکتالیته توابع موج توصیف شوند [۱۲].

همپوشانی این توابع با بعد فرکتالی مربوطه، یک تابع توزیع تحت عنوان $f(\alpha)$ را ایجاد می‌کند که توزیع "نماهای مقیاس" را که با α مشخص شده‌اند را نشان می‌دهد [۱۳]. محاسبه تابع توزیع به این صورت انجام می‌شود که در نقاط بحرانی ما می‌توانیم $|\psi_n|^2$ را به عنوان ویژه حالت‌های نرمالایز که شامل یک هندسه L بعدی است در نظر بگیریم که با N جعبه به سایز i احاطه شود. احتمال یافتن ذره در i امین جعبه:

$$\mu_i(l) = \sum_{n=1} |\psi_n|^2 \qquad (۱۱)$$

ممنتوم متناظر برای $|\psi_n|^2$ ها به صورت:

$$P_q(l) = \sum_{n=1} \mu_i^q(l) \qquad (۱۲)$$

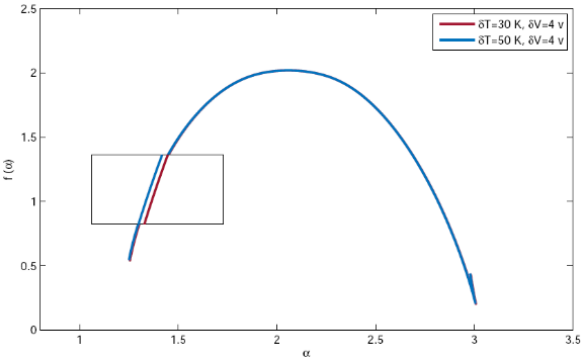
که متوسط ممنتوم‌ها به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\langle P_q \rangle \approx L^{-\tau(q)} \qquad (۱۳)$$

بعد فرکتالی $D(q)$ به‌صورت $\tau_q = D_q(q-1)$ تعریف می‌شود. در فلزات مقدار $D(q) = d$ و در مواد عایق برابر $D(q) = 0$ است. درحالی‌که در نقاط بحرانی $D(q)$ مقداری غیربدیهی نسبت به q است که نشانگر مالتی فرکتال‌بودن توابع موج است. در تابع توزیع $f(\alpha)$ از تبدیل لژاندر رابطه بعد $D(q)$ به صورت زیر به دست می‌آید [۱۲]:

$$f(\alpha) = \alpha q - \tau_q \qquad (۱۴)$$

$f(\alpha)$ بعد فرکتالی مجموعه نقاطی است که شدت ویژه توابع به‌صورت $|\psi^2 \approx L^{-\alpha}|$ باشد. به‌عبارت‌دیگر در یک سیستم مدل تعداد چنین نقاطی به صورت $L^{f(\alpha)}$ مقیاس می‌شود. نمودار $f(\alpha)$ برای فلزات به‌صورت خطی در نقطه $\alpha = d$ با $f(\alpha) = d$ خواهد بود که هرچه از فاز فلزی فاصله می‌گیرد، این خط بازتر می‌شود. ازآنجایی‌که مفهوم غیرجای‌گزیدگی در فاز فلزی و جای‌گزیدگی در فاز عایق مطرح می‌شود، بحث درباره جای‌گزیدگی / غیرجای‌گزیدگی سیستم با کمک نمودار $f(\alpha)$ صورت می‌گیرد. در این نمودار هرچقدر پهنای نمودار کم‌عرض‌تر باشد، به‌حالت غیرجای‌گزیده نزدیکتر خواهد بود. حداکثر مقدار $f(\alpha)$ برابر با بعد سیستم خواهد بود که برای سیستم سیلندری شکل ما برابر ۲ است. به‌گونه‌ای که از شکل ۴ مشخص است، پهنای نمودار برای هر دو گرادیان دما تقریبا یکسان است. اما در صورتی که بخواهیم دقیق‌تر به مقایسه بپردازیم، با اختلاف جزئی به‌ازاء گرادیان دمای ۳۰ کلوین نمودار $f(\alpha)$ کم‌عرض‌تر و لذا سیستم غیرجاگزیده‌تر خواهد بود. با استفاده از ویژه بردارهای ماتریس هامیلتونی و با کمک برنامه متلب می‌توان بعد فذکتالی سیستم را رسم کرد.



شکل ۵: نمودار بعد فرکتالی برای گرادیان دمای ۳۰ و ۵۰ کلوین با گرادیان ولتاژ ٤ ولت. پهنای نمودار گرادیان ۳۰ کلوین کمتر و نشان از غیرجای‌گزیده‌تربودن سیستم دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

با الهام از این منابع طبیعی می‌توانیم منابع انرژی با حداقل آلودگی و عملکرد قابل توجه داشته باشیم. ما یک سیستم طبیعی، سیستم فتوسنتزی کلروزوم، را برای مطالعه انتخاب کردیم تا قابلیت این نوع سیستم را به عنوان مولد و یک ابزار ترموکارنت بررسی کنیم. حداکثر جریان ایجادشده در اثر گرادیان دما برابر nA ۳۶٫۶ که امکان طراحی مولدهای انرژی سبز با حداکثر توان تولیدی nW ۱۱٫۱را به ما می‌دهد که قابل مقایسه با دیگر بایو باتری‌ها مانند سوخت‌های کربن فعال با توان $mWcm^{-2}$ ۳۸٫۵ [۱۴]، سوخت زغالی، سلول سوخت آنزیمی $mWcm^{-2}$ ۰٫۸ [۱۵] یا سلول سوختی میکروبی $mWcm^{-2}$ ۲۸-۱۶ [۱۶] است. به‌طوری‌که قبلاً نیز اشاره کردیم از طریق اعمال گرادیان دما و پتانسیل سیستم دارای توانی معادل nW 11.1 و برای نمایش ظرفیت ترموکارنت، ضریب سی‌بک حدودا S $5mV/K$ = در دمای $T_{hot} = 70\ K$ دارد که در مقایسه با دیگر سیستم‌های بیولژیک نسبتاً بالاست و نشان‌دهنده قابلیت بالای سیستم به عنوان منبع ترموکارنت است. به‌علاوه از طریق تحلیل توزیع آماری ترازها و بعد فرکتالی به مطالعه پایداری سیستم در دماهای پیشنهادشده توسط نمودار $I-\delta V-\delta T$ پرداختیم که نشان از پایداری و غیرجای‌گزیده‌بودن این سیستم می‌دهد. در ساخت این نوع ابزار لازم است که به گرادیان دمای اعمالی دقت کافی جلب شود. کلروزوم به عنوان بخشی از یک سیستم طبیعی دارای محدودیت تحمل دمای اعمالی است. طبق آزمایشات صورت گرفته، و دمای بالاتر از ۳۷۰ K [۱۷] موجب گسستگی ساختار کلروزوم می‌گردد. لذا این نوع مولد در عین بهینه‌بودن و داشتن عملکرد مناسب، از پایداری قابل قبولی برخوردار نیست. برای حل این مورد نیز می‌توان از سیستم‌های هایبریدی که به‌صورت ترکیبی و اتصال با دیگر ساختارهای طبیعی ایجاد می‌گردد بهره برد. ساختارهایی چون ترکیب کلروزوم و DNA، یا ساختار ترکیبی از کلروزوم و گرافن، یا دیگر ساختارهای طبیعی پیشنهاد جالب توجهی در تولید ابزارهایی با عملکرد و پایداری بالا می‌تواند به شمار رود.

References:

1. Armaroli N, Balzani V. The Future of Energy Supply: Challenges and Opportunities. Angew. Chem. Int. 2007; 46(1-2): 52-66.
2. Barber J. Photosynthetic energy conversion: natural and artificial. Chem. Soc. Rev. 2008; 38(1): 185-196.
3. Zhao L, Tan G, Hao S, He J, Pei Y, Chi H, Wang H, Gong S, Xu H, Dravid V P, Uher C, Snyder G J, Wolverton C, Kanatzidis M G, Ultrahigh power factor and thermoelectric performance in hole-doped single-crystal SnSe. Science, 2016; 351(6269): 141-144.
4. Hurtley S, Szuromi P. Nanoscale Thermoelectric Characterization. Science, 2004; 303(5659): 725.
5. Marquez A S, Chen L, Sunb K, Zhao Y. Probing ultrafast excitation energy transfer of the chlorosome with exciton-phonon variational dynamics. Phys. Chem. Chem. Phys. 2016; 18(30): 20298-20311.
6. Mohseni M, Omar Y, Engel G, Plenio M B. Quantum Effects in Biology, Cambridge University (2014).
7. Mentrup D, Schnack J. Nosé-Hoover dynamics for coherent states. Physica A 2001; 297(3-4): 337347.
8. Tang J K H, Xu Y, Muhlmann G M, Zare F, Khin Y, Tam S W. Temperature shift effect on the Chlorobaculum tepidum chlorosomes. Photosynth. Res. 2013; 115(1): 23-41.
9. Behnia S, Fathizadeh S, Ziaei J. Controlling charge current through a DNA based molecular transistor. Phys. Lett. A 2017; 381(1): 36-43.
10. Adam A M, Elsehly E M, Ataalla M, El-Khouly A, Nafady A, Diab A K. Preparation and thermoelectric power properties of highly doped p-type Sb2Te3 thin films. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2021; 1;127:114505.
11. Santos L F, Borgonovi F, Izrailev F M. Onset of chaos and relaxation in isolated systems of interacting spins: Energy shell approach. Phys. Rev. E 2012; 85(3): 036209.
12. Evers F, Mirlin A D. Anderson transitions. Rev. Mod. Phys. 2008; 80(4): 1355.
13. Hilborn R C. Chaos and Nonlinear Dynamics: An Introduction for Scientists and Engineers, 2nd Edition, Oxford University (2001).
14. Lan R, Tao S, A simple high-performance matrix-free biomass molten carbonate fuel cell without CO2 recirculation. Sci. Adv. 2016; 2(8), e1600772.
15. Zhu Z, Tam T K, Sun F, You C, Zhang Y H P, A high-energy-density sugar biobattery based on a synthetic enzymatic pathway. Nat. Commun. 2014; 5, 3026.
16. Das K S, Microbial Fuel Cells: A Path to Green, Renewable Energy. Practices and Perspectives in Sustainable Bioenergy. Green Energy and Technology. 2020; 195-206.
17. Tang J K H, Xu Y, Muhlmann G M, Zare F, Khin Y, Tam S W, Temperature shift effect on the Chlorobaculum tepidum chlorosomes. Photosynth. Res. 2013; 115, 23-41.