مقاله پژوهشی

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

پریسا حسیننژاد^ا سهراب بهنیا^۲ سمیرا فتحی_ازاده^۳*

 ۱- دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران
 ۲- استادتهام، 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

• 5 5 3 1 9 1 9 1 9 1 9

شماره تماس:

چکیدہ

مقدمه: امروزه پیشرفتهای قابل توجهی در جهت استفاده از مواد بیولوژیکی تجدیدپذیر به عنوان ابزار ذخیره انرژی، به وجود آمده است. این ابزارها به عنوان راه حلی برای مشکل آلودگی و ناپایداری با توانایی ذخیره سازی 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 ترمو پاور می تواند بسیار جذاب و مورد توجه باشد.

روش بررسی: در این مطالعه، برای مطالعه توانایی تولید جریان ناشی از گرادیان دما از یک سیستم فتوسننتزی، 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 می شود که برای بررسی اثرات گرمایی ناشی از تابش لیزر از مدل سازی تماس مستقیم سیستم با ترموستات کوانتومی استفاده کردهایم. از طرفی، بهمنظور به دست 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 می تواند به مقدار ۲۶/۶ م ۸۸ و ۲۷ ، دست پیداکند که امکان طراحی و ساخت ابزارهایی با توان ۱۱/۱۸ را به ما می دهد. ضریب سیبک به مقداری برابر ۲۵/۹۱۶ mV/۲ رسیده که نسبت به دیگر سیستمهای بیولوژیکی مقدار قابل توجهی است. نمودار آ*G – 6*۷ 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 غیرجای گزیده بودن سیستم بهازاء این گرادیان دما و ولتاژ است.

نتیجهگیری: کرموفورها به عنوان منابع جذب در محیطهای بکارگیری پرتو لیزر می توانند 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 می پردازد. 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 سی بک نیز نسبت به دیگر سیستمهای بیولوژیکی مقدار قابل توجهی است. از طرفی، 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.

مقـدمه

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 چـون آلـودگی، تولیـد گازهای گلخانهای که تهدیدی برای سلامت انسان ها و گرمایش جهانی است را نداشته باشند. انرژی به عنوان جدیترین مسئله قرن ٢١ مطرح است [١]. از طرفي، فرآيند فوسنتز به عنوان منشاء انرژي طبيعت، مسئول حفظ زندگي بر روي كره زمين بوده است. اين فرايند 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 انسان ها روزانه استفاده می کنند [۲]. بنابراین الهام از طبيعت براي ساختن منابع و ذخيرهسازي انرژي بسيار قابل توجه است. تكنولوژي ترموالكتريك توانايي ذخيره مستقيم توان الكتريكي را از گرما دارد و مواد ترموالکتریک از طریق تبدیل مستقیم گرما به الکتریسیته به عنوان ابزارهای ذخیرهکننده انرژی کـه دوسـتار محـیط زیست است به شمار میروند. ایـن ابزارهـا قابلیـت تبـدیل گرمـای تلف شده را به الكتريسيته دارند، كه به صورت موثر و كاربردي به عنوان ابزاري بهينه در جهت توليد و گسترش ابزارهاي ساختار نانو به کار میروند [۳و۴]. استفاده از سیستم فتوسنتزی برای ساخت و ذخيره ي جريان الكتريكي و تعيين شرايطي است كه اين سيستم بتواند بهترین عملکرد خود را داشته باشند است. بدین منظ ور برای مطالعه توان تولیدی و قابلیت ترموکارنت یک سیستم فتوسنتزی از کلروزوم که در آنتن باکتری های سولفوری سبز یافت می شود، استفاده كرديم. تلاش ما نيز در جهت استفاده از سيسـتم فتوسـنتزي براي ساخت و ذخيره جريان الكتريكي و تعيين شرايطي است كه اين 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 پایـداری سیسـتم، از یک سیستم فتوسنتزی از کلروزوم که در آنتن باکتریهای سولفوری

سبز یافت می شود، استفاده شده است. برهمکنش گرمایی از جمله

واکنش هایی است که هنگام تابش لیزر بر روی سیستم های بیولوژیک ایجاد می شود وکاربرد بسزایی در لیزر پزشکی دارد. در این کار، گرادیان دما ناشی از تابش نور لیزر توسط اتصال تر موستات کوانتومی، در قالب نوسانگرهایی که به کروموفرها متصل شده اند، مدلسازی می شود. از طرفی، گرادیان ولتاژ توسط اتصال الکترودهای فلزی به دو انتهای سیستم ایجاد می شود و جریان عبوری از سیستم، به ازاء گرادیان دما و گرادیان ولتاژهای مختلف به دست می آید. بر اساس نمودار V-I و مشخص کردن نواحی شبه اهمی مقاومتی که سیستم در برابر عبور جریان از خود نشان به دست می آید و میتوانیم توان تولیدی سیستم را تخمین بر نیم. سیبک، می توانیم با مشخص کردن دماهایی که جریان حداکثری از سیستم عبور می کند، 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 می شود [۵]:

$$H_s = \sum_n \varepsilon_n a_n^+ a_n + \sum_{n \neq m} J_{nm} a_n^+ a_m \tag{1}$$

که $_{R_n}$ ها انرژی برانگیختگی تکسایت و J_{nm} ثابت جفتشدگی بین سایتها است. $_n^+(a_n)a_n^+$ 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) به کار می روند معمولاً به صورت حمام بوزونی و فونونی تعریف می شود [٦]. حمام فونونی به صورت نوسان گرهایی که با کر وموفرهای سیستم اندرکنش دارند مدل شده

۲۸ فصلنامه لیزر در پزشکی / دوره هجدهم / شماره (٤)

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

$$H_{bath} = \sum_{q} \hbar \omega_q b_q^+ b_q \tag{(Y)}$$

$$H_{s-bath} = -\frac{1}{N} \sum_{n} \sum_{q} g \omega_{q} a_{n}^{\dagger} a_{n} (b_{q} e^{iqn} + b_{q}^{\dagger} e^{-iqn}) \qquad (\mathbf{r})$$

که ۵ فرکانس مدهای فونونی، g ثابت جفتشدگی سیستم حمام و (b_n)b⁺ عملگر خلق (فنا) فونون است. شکل (۱) یک توصیف کلی از سیستم مورد مطالعه را نشان میدهد.



chlorosome with 5 rings شکل ۱: تصویر شماتیک از مدل مورد مطالعه

حال به منظور ایجاد گرادیان دما از ترموستات استفاده می کنم. به دلیل آنکه سیستم، کوانتومی است و می خواهیم مطالعه ای به صورت کوانتومی داشته باشیم نیاز داریم که از ترموستات کوانتومی بهره ببریم. پیش از این تلاش هایی 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 به صورت نوسان گرهایی به کاونتومی ایجاد شد که مطابق شکل ۱ به صورت نوسان گرهایی به تاق ثابت نگه داشته شده و سمت دیگر در رنج دمای [۳۷۲-۲۰۳] کلوین تغییر دادیم. با توجه به اینکه ساختار فتوسنتزی در دمای بالا تر از ۲۷۰ کلوین از بین می رود [۸]، بیشترین گرادیان دما را تا ۳۰ کلوین انتخاب می کنیم. به منظور ایجاد گرادیان ولتاژ دو الکترود فلزی را به دو انتهای سیستم متصل می کنیم. یکی از لیدها را در ولتاژ صفر نگه داشته و ولتاژ الکترود دوم را در رنج ۷[4-0] تغییر

طراحی ابزارهای اپتیکی بر مبنای یک سیستم فتوسنتزی بهمنظور افزایش کارائی در فرآیند جذب پرتو لیزر

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

$$H_{s-lead} = \sum_{n \neq k} (J_{L}c_{n}^{+}c_{k} + J_{R}c_{k}^{+}c_{n}) + H.c.$$
 (d)

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]:

$$I_n = \frac{d(eN_n)}{dt} = \frac{-ie}{\hbar} [a_n^+ a_n, H]$$
(9)

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

$$I = \sum_{n} I_{n} \tag{(v)}$$

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 بر حسب گرادیان دما و گرادیان ولتاژ به صورتی که در شکل ۲ نشان داده شده است، به دست 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 *Wn* ۲۸۷ برسیم.



شدت جریان عبوری از سیستم

نمودار جریان به ازاء گرادیان ولتاژ خارجی بهصورتی که در شکل ۳ نشان داده شده است به دست می آید. نواحی شبه اهمی و NDR کاملا در نمودار مشخص است که بر این اساس می توانیم مقاومت سیستم را برای نواحی شبه اهمی به صورتی که در شکل ۳ مشخص است، محاسبه کنیم. با کمک مقاومت سیستم و جریان ناشی از گرادیان دما می توانیم 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 ۷ ۳/۰ خواهد بود. علاوه برآن توان تولیدی سیستم نیز بر اساس مقادیر به دست آمده قابل محاسبه است.



معجل . . هودار جريال به اراء حراديال ولنار اعمال مده

حال با این گرادیان دما و ایجاد پتانسیل الکتریکی میتوانیم ضریب سیبک را بهدست آوریم. شارش جریان بار با اعمال اختلاف دما اساس پدیده ای 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:

$$\Delta V = S \Delta T \tag{(A)}$$

که مقدار بهدست آمده برای سیستم فتوسنتزی برابر که مقدار بهدست آمده برای سیستم فتوسنتزی برابر S = 41.916 mV/Kبسیار 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 به صورت توزیع پواسون می باشد: $P(s) = e^{-s}$

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

$$P_{WD} = \frac{\pi s}{2} e^{-\pi s^2/4} \tag{(1)}$$

برای بهدست آوردن تابع توزیع نزدیکترین فاصله ترازی، انرژی ترازها را با کمک ویژه مقادیر ماتریس هامیلتونی بهدست آورده، ترازهای انرژی را unfold کرده و تابع توزیع ((۹(۵) ترازهای جدید را به کمک نرمافزار متلب رسم میکنیم. به طوری که در شکل ۳ نشان داده شده نمودار توزیع ترازها به ازاء هر دو گرادیان دما به صورت 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 ٥٠ کلوین با گرادیان ولتاژ ٤ ولت.

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

همپوشانی این توابع با بعد فرکتالی مربوطه، یک تابع توزیع توزیع (α) را ایجاد میکند که توزیع "نماهای مقیاس" را که تحت عنوان (α) 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 $|w_n|^2$ 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:

$$\mu_i(l) = \sum_{n=1} \left| \psi_n \right|^2 \tag{11}$$

ممنتوم متناظر برای
$$|\psi_n|^2$$
 ها به صورت:
 $P_q(l) = \sum_{n=1} \mu_i^q(l)$ (۱۲)

که متوسط ممنتومها به صورت زیر تعریف می شود: (۱۳)
$$\left\langle P_q
ight
angle pprox L^{- au(q)}$$

بعد فرکتالی D(q) به صورت $T_q = D_q(q-1)$ تعریف می شود. در فلزات مقدار D(q) = d و در مواد عایق برابر D(q) = 0 است. در حالی که در نقاط بحرانی D(q) مقداری غیربدیهی نسبت به q است که نشانگر مالتی فرکتال بودن توابع موج است. در تابع توزیع $f(\alpha)$ از تبدیل لژاندر رابطه بعد D(q) به صورت زیر به دست می آید [۱۲]:

$$f(\alpha) = \alpha q - \tau_a \tag{14}$$

بعد فرکتالی مجموعه نقاطی است که شدت ویژه توابع $f(\alpha)$ به صورت $|\psi^2 \approx L^{-\alpha}|$ به صورت $|\psi^2 \approx L^{-\alpha}|$ مقیاس می شود. نمودار $f(\alpha)$

طراحی ابزارهای اپتیکی بر مبنای یک سیستم فتوسنتزی بهمنظور افزایش کارائی در فرآیند جذب پرتو لیزر

برای فلزات به صورت خطی در نقطه $b = \alpha$ با $b = (\alpha)$ f خواهد بود که هرچه از فاز فلزی فاصله میگیرد، این خط بازتر می شود. از آنجایی که مفهوم غیر جای گزیدگی در فاز فلزی و جای گزیدگی در فاز عایق مطرح می شود، بحث درباره جای گزیدگی /غیر جای گزیدگی سیستم با کمك نمودار (α) f صورت می گیرد. در این نمودار هرچقدر پهنای نمودار کم عرض تر باشد، به حالت غیر جای گزیده نزدیکتر خواهد بود. حداکثر مقدار (α) f برابر با بعد سیستم نزدیکتر خواهد بود. حداکثر مقدار (α) f برابر با بعد سیستم تقریبا یکسان است. اما در صورتی که بخواهیم دقیق تر به مقایسه بیردازیم، با اختلاف جزئی به ازاء گرادیان دمای ۳۰ کلوین نمودار استفاده از ویژه بردارهای ماتریس هامیلتونی و با کمک برنامه متلب می توان 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.

بحثونتيجهگيري

با الهام از این منابع طبیعی میتوانیم منابع انرژی با حداقل آلودگی و عملكرد قابل توجه داشته باشيم. ما يک سيستم طبيعي، سيستم فتوسنتزى كلروزوم، را براي مطالعه انتخاب كرديم تا قابليت اين نوع سیستم را به عنوان مولد و یک ابزار ترموکارنت بررسی کنیم. حداکثر جریان ایجادشده در اثر گرادیان دما برابر nA /۶ ۳۶ که امکان طراحی مولدهای انرژی سبز با حداکثر توان تولیدی nW ۱/۱۱را به ما میدهد که قابل مقایسه با دیگر بایو باتریها مانند سوختهای كربن فعال با توان mWcm⁻² (۱۴]، سوخت زغالي، سلول سوخت آنزیمی ، MWcm⁻² یا سلول سوختی میکروبی ۲۸-۱۲ mWcm-2 [۱۶] است. به طوری که 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 دارد که در مقایسه با دیگر $T_{hot} = 70~K$ دارد که در مقایسه با دیگر = 5mV/Kسیستمهای 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 كلروزوم مىگردد. لذا اين نوع مولد در عين بهينهبودن و داشتن عملكرد مناسب، از پايداري قابل قبولي برخوردار نيست. برای حل این مورد نیز می توان از سیستم های هایبریدی که به صورت ترکیبی و اتصال با دیگر ساختارهای طبیعی ایجاد می گردد بهره برد. ساختارهایی چون ترکیب کلروزوم و DNA، یا ساختار ترکیبی از كلروزوم و گرافن، يا ديگر ساختارهاي طبيعي پيشنهاد جالب توجهي در توليد ابزارهايي با عملكرد و يايداري بالا مي تواند به شمار رود.

طراحی ابزارهای اپتیکی بر مبنای یک سیستم فتوسنتزی بهمنظور افزایش کارائی در فرآیند جذب پرتو لیزر

References:

- 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.
- 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 singlecrystal SnSe. Science, 2016; 351(6269): 141–144.
- Hurtley S, Szuromi P. Nanoscale Thermoelectric Characterization. Science, 2004; 303(5659): 725.
- 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).
- Mentrup D, Schnack J. Nose-Hoover dynamics for coherent states. Physica A 2001; 297(3–4): 337347.
- 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.
- Behnia S, Fathizadeh S, Ziaei J. Controlling charge current through a DNA based molecular transistor. Phys. Lett. A 2017; 381(1): 36–43.

- 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.
- 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.
- Evers F, Mirlin A D. Anderson transitions. Rev. Mod. Phys. 2008; 80(4): 1355.
- Hilborn R C. Chaos and Nonlinear Dynamics: An Introduction for Scientists and Engineers, 2nd Edition, Oxford University (2001).
- 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 highenergy-density sugar biobattery based on a synthetic enzymatic pathway. Nat. Commun. 2014; 5, 3026.
- 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.
- 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.