لیزر در پزشکی؛ ۱۳۹۸، دورهٔ ۱۶، شمارهٔ ٤، صفحات: ۳۱-۲۵.

مقاله پژوهشی

تابش نور و ترابرد الکترونیکی در زنجیرهٔ DNA

سمیرا فتحی زاده [۱]
الهه جوانشور [۲]
سهراب بهنیا [۳]
فاطمه نعمتی [٤]

خلاصه

مقدمه: ویژگی‌های اپتوالکترونیکی مواد زیستی از زمینه‌های مطالعاتی نوظهور در حال پیشرفت است. در طی سال‌های متمادی، **DNA** به‌دلیل اینکه نسبت به جریان بار و اسپین خاصیت رسانایی از خود نشان داده است، در ساختارهای نانوالکترونیک مورد توجه قرار گرفته است.

روش بررسی: در این کار سعی کرده‌ایم از **DNA** به‌عنوان یک مولکول زیستی برای طراحی یک سویچ اپتیکی و بررسی خواص اپتیکی غیرخطی استفاده کنیم. در این راستا از توالی طبیعی ژنوم ویروس دلتای هپاتیت[1] استفاده شده است تا بتوان از خاصیت سازگاری با بدن انسان بهره برد. در این مطالعه از مدل **PBD** به‌انضمام مدل نردبانی **CL** برای بررسی سیستم با استفاده از رهیافت آشوب استفاده کرده‌ایم.

یافته‌ها: سری زمانی جریان الکتریکی عبوری نشان‌دهندهٔ رفتار غیر خطی توالی ویروس می‌باشد. همچنین با بررسی جریان برحسب دامنهٔ نور فرودی، محدوده‌هایی که در آن سیستم نسبت به جریان فرودی حساسیت بالایی دارد، مشخص می‌شود و با مطالعهٔ نمودار مشخصهٔ جریان-ولتاژ می‌توان محدوه‌ای که در آن پدیدهٔ اهمی و مقاومت دیفرانسیلی منفی آشکار می‌شود را مشخص کرد. همچنین محدودهٔ دمایی که در آن سیستم رفتار بهینه‌ای از خود به نمایش می‌گذارد، مشخص می‌شود.

نتیجه‌گیری: با تغییر فرکانس و دامنهٔ نور فرودی پاسخ الکتریکی زنجیرهٔ **DNA** به تابش نور بررسی شده است. در مقدار دامنهٔ نور $A_0 = 0.3 \left(\frac{\hbar c}{e r_0}\right)$ و $A_0 = 0.6 \left(\frac{\hbar c}{e r_0}\right)$ به‌ترتیب شاهد عبور بیشترین و کمترین جریان الکتریکی از سیستم هستیم. سری زمانی جریان عبوری از **DNA** می‌تواند رفتار این سیستم با گذر زمان را نشان دهد که با افزایش زمان اندازه‌گیری، شاهد رفتارغیرخطی سیستم خواهیم بود. با افزایش دمای محیط در حالت کلی شاهد سیر نزولی جریان عبوری هستیم تا جایی که در دمای ذوب (**۳۵۵ K**) کمترین جریان از سیستم عبور می‌کند و تقریباً می‌توان گفت سوییچ در حالت خاموش قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، نمودار مشخصهٔ **I-V** مناطق شبه اهمی و **DNA** را نشان می‌دهد که عرض این نواحی در محدوده‌های ولتاژ متفاوت تغییر می‌کند.

واژه‌های کلیدی: اپتوالکترونیک، دی‌ان‌ای، منحنی مشخصهٔ جریان-ولتاژ، مقاومت شبه‌اهمی، مقاومت دیفرانسیلی منفی

۱. استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

۳. استاد تمام، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

۴. دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

نویسندهٔ‌مسئول: سمیرا فتحی زاده تلفن: ۰۹۱۴۳۹۱۳۴۹۳

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

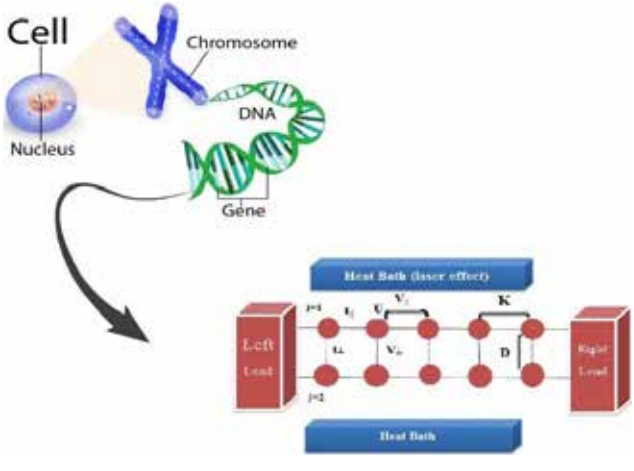
1. Hepatitis Delta Virus (HDV)

مقدمه

در میان پیشرفت‌های برجستهٔ اخیر، لیزر[1] جایگاهی رفیع به خود اختصاص داده است. سازوکارهای متفاوتی نظیر برهمکنش گرمایی به هنگام پرتودهی نور لیزر بر بافت بیولوژیک روی می‌دهد[۱]. برهمکنش گرمایی به کلیهٔ آثاری اطلاق می‌شود که افزایش دمای موضعی پارامترهای متغیر در آن باشد. این آثار گرمایی می‌توانند به‌وسیلهٔ لیزرهای پالسی یا موج پیوسته ایجاد شوند[۲]. برهمکنش گرمایی از جمله واکنش‌هایی است که هنگام تابش لیزر برروی سیستم‌های بیولوژیک ایجاد می‌شود و در لیزر پزشکی به‌ویژه در جراحی لیزری[2] کاربرد به‌سزایی دارد. ازطرفی نور لیزر دارای خواص منحصر به فردی مانند تک‌رنگ بودن، تکفام بودن و درخشندگی در واحد زاویهٔ فضایی با شدت‌های متفاوت است که به‌طور گسترده‌ای در علوم پزشکی و زیستی به‌کار برده می‌شود [۳]. اخیراً تحقیقات تجربی بسیاری روی مواد آلی از جمله گرافن برای بررسی خواص اپتیکی و تحقق برنامه‌های الکترونیکی و نوری با قابلیت‌های مکانیکی پیشرفته مانند الکترودهای شفاف انعطاف‌پذیر یا دستگاه‌های حسگر لمسی با مساحت بزرگ صورت گرفته است [۴و۵]. مولکول‌های زیستی از خود خواص الکتریکی و نوری نشان می‌دهند[۶]. در این مطالعه دی-اکسی‌ریبونوکلئیک‌اسید[3] (دی‌ان‌ای) به‌عنوان یک مولکول زیستی با قابلیت سازگاری با سیستم‌های بیولوژیک و به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای مطالعهٔ پدیدهٔ اپتوالکترونیک در سوییچ‌های نوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. DNA دارای خواص مواد منحصر به فردی است که دانشمندان مواد، نانوتکنولوژیست‌ها و مهندسان را جذب خود کرده است[۷]. مولکول DNA از یک مارپیچ دو رشته‌ای تشکیل شده است که هر رشته شامل یک مجموعهٔ پلیمری از نوکلئوتیدهاست و هر نوکلئوتید از سه قسمت قند، بازهای آلی و گروه فسفات تشکیل شده است[۸]. در این پژوهش لیزر مادون قرمز به‌عنوان یک منبع نوری نقطه‌ای، جهت تابش نور روی DNA مورد استفاده قرار می‌گیرد. خواص اپتیکی DNA در سال‌های اخیر توجه وسیعی را به خود معطوف کرده است و تبدیل به یک گرایش در فوتوبیولوژی شده است[۹]. دستگاه‌های مولکولی با قابلیت پاسخ‌دهی فتوالکتریکی می‌توانند با اعمال محرک‌های خارجی مانند نور و حرارت در زمینهٔ سوییچ‌های نوری و سنسورهای زیستی مورد استفاده قرار گیرند[۱۰]. با اعمال یک ولتاژ خارجی، سیستم می‌تواند بین حالات روشن و خاموش سوییچ کند. ضروری است که بر مبنای یک مدل ریاضی نسبت به مطالعهٔ خواص اپتیکی اقدام شود. تاکنون مدل‌های متفاوتی برای مدل‌سازی معرفی شده است که در این مطالعه از ترکیب مدل پیارد-بیشاپ-داکسیوس(PBD)[4][۱۱] به انضمام مدل نردبانی CL[5][۲۱] برای مطالعهٔ سیستم استفاده شده است. در این پژوهش به‌دلیل غیرخطی بودن سیستم از رهیافت سیستم‌های دینامیکی غیرخطی برای تحلیل سیستم استفاده شده است[۱۳]. در این راستا معادلات تحول سیستم از هامیلتونی آن استخراج می‌شوند. در این مقاله محدودهٔ دامنهٔ نوری، فرکانس نوری و همچنین دمای مناسب برای رانش مناسب جریان الکتریکی بررسی شده است و همچنین با رسم نمودار جریان-ولتاژ، شاهد شکل‌گیری محدوده‌هایی شبه‌اهمیک و محدوده‌هایی با مقاومت دیفرانسیلی منفی (NDR) هستیم. پدیدهٔ NDR به حالتی گفته می‌شود که در آن با افزایش ولتاژ، شاهد کاهش جریان باشیم. این پدیده قبلاً در مطالعهٔ رفتار سوییچ مولکولی مشاهده شده است[۱۴]. در این مقاله از توالی ژنوم ویروس دلتای هپاتیت ATGAGCCAAGTTCCGAACAAGGATTC GCGGGGAGGATAGATCAGCGCCCGAGAGG (GGTGA) با تعداد ۶۰ جفت باز استفاده شده است[۱۵].

روش بررسی

در سال‌های اخیر، برای مطالعهٔ ساختار DNA و بررسی خواص الکتریکی آن، مدل‌های متفاوتی ارائه شده است. در سال ۱۹۹۳ پیارد، بیشاپ و داکسیوس مدل یک‌بعدی PB [۱۱] مربوط به دینامیک غیرخطی ذوب DNA را با جملهٔ غیرخطی اندرکنش بازها در یک رشته تصحیح کردند و مدل PBD را ارائه نمودند. در این کار، مدل PBD همراه با مدل CL استفاده شده است [۱۲]. تصویر شماتیکی از مدل که برای مطالعهٔ سیستم استفاده شده است در شکل ۱-الف نشان داده شده



شکل۱: الف: تصویری از سیستم مورد مطالعه: مولکول DNA متصل به الکترودهای چپ و راست و غوطه‌ور در حمام گرمایی

1. Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
2. Laser Surgery
3. Deoxyribonucleic acid
4. Peyrard-Bishop-Daouxious
5. Charge ladder

است. درنتیجه هامیلتونی کلی به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$H = H_{PBD} + H_{\ell} + H_E + H_{lead} + H_{lead-DNA} \quad (۱)$$

در رابطهٔ ۱، H_{DNA} هامیلتونی مربوط به مدل PBD، H_{CL} هامیلتونی مدل نردبانی، H_E هامیلتونی میدان الکتریکی، H_{lead} و $H_{lead-DNA}$ به‌ترتیب هامیلتونی مربوط به الکترودها و اندرکنش بین مولکول DNA با الکترودها می‌باشد. هامیلتونی H_{PBD} شامل جملات زیر است (تصویر ساده‌ای از مدل PBD در شکل ۱-ب نشان داده شده است)[۱۱]:

$$H_{DNA} = \sum_n \frac{1}{2} m \dot{y}_n^2 + V(y_n) + W(y_n + y_{n+1}) \quad (۲)$$

که $V(y_n) = D_n(e^{a_n y_n} - 1)$، پتانسیل مورس می‌باشد که به فرم است. انرژی توده‌ای بین جفت بازهای مجاور هم به‌صورت زیر معرفی می‌شود[۱۱]:

$$W(y_n, y_{n+1}) = \frac{K}{2}\left(1 + \rho \exp\left(-\alpha(y_n + y_{n+1})\right)\right)(y_{n+1} - y_n)^2 \quad (۳)$$

جملهٔ دوم در رابطهٔ ۱، (H_{CL}) مربوط به هامیلتونی مدل نردبانی می‌باشد که به‌صورت زیر بیان می‌شود[۱۲]:

$$H_{CL} = \sum_{j=1,2}\sum_i \varepsilon_{j,i}\left(c_{j,i}^{\dagger} c_{j,i} + \text{H.C.}\right) - t_{\parallel}\sum_{j=1,2}\sum_i \left(c_{j,i}^{\dagger} c_{j,i+1} + H.C\right) - t_{\perp}\sum_i \exp(-p\, y_i)\left(c_{1,i}^{\dagger} c_{2,i} + H.C\right) + \frac{U}{4}\sum_{j=1,2}\sum_i n_{j,i}^2 + V_{\parallel}\sum_{j=1,2}\sum_i n_{j,i} n_{j,i+1} + V_{\perp}\sum_i \exp(-\chi y_i) n_{1,i} n_{2,i} \quad (۴)$$

در این رابطه j و i به‌ترتیب، تعداد رشته‌ها و تعداد سایت‌ها در هر رشته می‌باشند. $(c_{j,i})c_{j,i}^{\dagger}$ عملگر خلق (فنا) یک الکترون در سایت (j,i)، $\varepsilon_{j,i}$ انرژی روی سایت الکترون، $t_{\parallel}$ انرژی پرش بین جفت بازهای مجاور، $t_{\perp}$ انرژی پرش بین جفت بازهای داخلی، p ثابت جفت‌شدگی، y_i کشش باند i ام، $V_{\parallel}$ برهمکنش کولمبی بین بازهای مجاور، برهمکنش کولمبی بین بازهای مکمل، χ معکوس طول دبای می‌باشد.

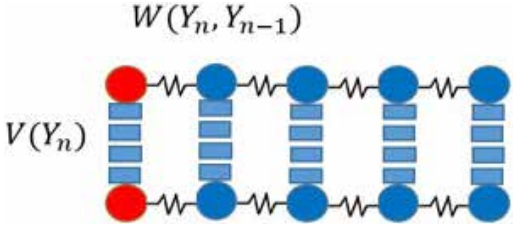
جملهٔ سوم در رابطهٔ ۱، (H_E) هامیلتونی میدان الکتریکی نور تابشی به‌صورت زیر می‌باشد[۱۱]:

$$H_E = -t_{\parallel}\sum_{j=1,2}\sum_i \left[\exp\left(\frac{ier_0}{\hbar c} A(t)\right) c_{j,i}^{\dagger} c_{j,i+1} + \text{H.C.}\right] \quad (۵)$$

در معادلهٔ فوق، r_0، e، c به‌ترتیب، فاصلهٔ ثابت بین بازهای مجاور در یک رشته، بار الکتریکی و سرعت نور می‌باشند همچنین A(t) بردار موج مربوط به میدان الکتریکی است که به‌صورت زیر بیان می‌شود[۱۱]:

$$A(t) = A_0 \cos(\omega t)\exp\left[-\frac{(t - t_c)^2}{2\tau^2}\right] \quad (۶)$$

که در آن ω، τ، A_0 فرکانس، نصف پهنای پالس و دامنهٔ موج می‌باشد. همان‌طور که گفته شد، DNA مطابق شکل ۲ بین دو الکترود ثابت شده است:



شکل۲: زنجیرهٔ مولکول DNA متصل به الکترودها

عبارات H_{lead} و $H_{lead-DNA}$ نیز هامیلتونی مربوط به الکترودها و اندرکنش آن‌ها با زنجیرهٔ DNA هستند که به‌صورت زیر بیان می‌شوند[۱۶]:

$$H_{Lead} = \sum_{j=1,2}\sum_k (\varepsilon_{L_{j.k}} + \frac{eV_b}{2})\ a_{L_{j,k}}^{+} a_{L_{j,k}} + \sum_{j=1,2}\sum_k (\varepsilon_{R_{j,k}} - \frac{eV_b}{2})\ a_{R_{j,k}}^{+} a_{R_{j,k}} \quad (۷)$$

$$H_{lead-DNA} = \sum_{j=1,2}\sum_k (t_L\ a_{L_{j,k}}^{+} c_{i,j} + t_R\ a_{R_{j,k}}^{+} c_{j,N} + H.c) \quad (۸)$$

که $\left(a_{\beta_{j,k}}\right) a_{\beta_{j,k}}^{+}$ با $\beta = L, R$، عملگر خلق (فنا) الکترون در الکترود β $\varepsilon_{\beta_{j.k}}$، انرژی روی سایت الکترودها، V_b ولتاژ بایاس و t_β عناصر ماتریس تونل‌زنی از سایت $k-$ ام الکترود β به زنجیرهٔ DNA می‌باشد. در مطالعهٔ کنونی، بیشتر جملات هامیلتونی غیرخطی هستند و حساسیت بالایی به شرایط اولیه دارند. ازطرفی تحلیل سری زمانی حاصل از معادلات تحول DNA نشان می‌دهد که تحول فضایی این مولکول همانند تحول سیستم‌های آشوبناک است. معادلات حاکم بر قسمت الکترونی با استفاده از رابطهٔ هایزنبرگ که به‌صورت زیر تعریف می‌شود، استخراج می‌شوند[۱۲]:

$$\dot{a}_n = \frac{-i}{\hbar}[a_n, \mathrm{H}] \quad (۹)$$

$$\dot{c}_n = \frac{-i}{\hbar}[c_n, \mathrm{H}] \quad (۱۰)$$

از طرفی، معادلات تحول کلاسیکی سیستم مربوط به جفت بازها را می‌توان از معادلات هامیلتونی استخراج کرد:

$$\ddot{y}_n = \frac{2a_n D_n}{m}\exp\left(-a_n y_n\right)\left(\exp\left(-a_n y_n\right) - 1\right) + \frac{kb\rho}{2m}\left[\exp\left(-b\left(y_n + y_{n-1}\right)\right)\right.$$
$$\left.(y_n - y_{n-1})^2 + \exp\left(-b\left(y_{n+1} + y_n\right)\right)(y_{n+1} - y_n)^2\right] - \frac{k}{m}\left[\left(1 + \rho\exp\left(-b\left(y_n + y_{n-1}\right)\right)\right)(y_n - y_{n-1}) - \right.$$
$$\left.\left(1 + \rho\exp\left(-b\left(y_{n+1} + y_n\right)\right)\right)(y_{n+1} - y_n)\right) - \frac{2pt_{\perp}}{m}\exp\left(-p_{\ i}\right)\left|\left\langle c_{1,i}^{\dagger} c_{2,i}\right\rangle\right| + \frac{V_{\perp}}{m}\chi\exp\left(-\chi y_i\right)\left(\left|\left\langle n_{1,i} n_{2,i}\right\rangle\right| - \frac{\left|\left\langle c_{1,i}^{\dagger} c_{2,i}\right\rangle\right|^2}{2}\right) \quad (۱۱)$$

$$i\hbar\dot{c}_{i,j} = (2\varepsilon_{i,j})\ c_{i,j} - V_{j,i,i-1} c_{j,i-1} - V_{j,i,i-1} c_{j,i-1} + V_1 c_{j,i} c_{j,i+1}^{+} - t_1 c_{j,i+1} - t_{\perp}\ \exp\ (-p_{\ i})\ (c_{2,i} + c_{1,i}) +$$
$$V_{\perp}\ \exp\ (-\chi y_i)\left[c_{1,i} c_{2,i}^{+} + c_{1,i}^{+} c_{1,i}\right] c_{2,i} + \frac{U}{4}(n_{j,i} + H.C)\ c_{j,i} + \sum(\delta_{1,i} t_L a_{L,k} + \delta_{N,n} t_R a_{R,k}) \quad (۱۲)$$

$$i\hbar\dot{a}_{L,k} = \left(\varepsilon_{L,k} + \frac{ev_b}{2}\right) a_{L,k} + t_L a_1 \quad (۱۳)$$

$$i\hbar\,\dot{a}_{R,k} = \left(\varepsilon_{R,k} - \frac{ev_b}{2}\right) a_{R,k} + t_R a_N \quad (۱۴)$$

یافته‌ها

جریان الکتریکی را می‌توان از معادلات حرکت با استفاده از معادلهٔ پیوستگی بار- جریان استخراج کرد[۷]. به‌طوری‌که $i\hbar \dot{a}_{R,k} = \left(\varepsilon_{R,k} - \frac{e v_b}{2}\right) a_{R,k} + t_R a_N$ که در آن I_i عملگر جریان موضعی و $n_i = c_i^t c_i$ می‌باشد. بنابراین جریان الکتریکی عبوری از سیستم به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

(۱۵

$$I = \frac{-ie}{\hbar}\{\sum_n V_{n,n+1}(c_n^+ c_{n-1} - c_{n-1}^+ c_n) + V_{n,n+1}(c_n^+ c_{n+1} - c_{n+1}^+ c_n) + \sum_{j,k} t_L [a_{j,k,L}^+ c_{j,1} - c_{j,1}^+ a_{L,j,k}] + \sum_{j,k} t_R [a_{j,k,R}^+ c_{j,N} - c_{j,N}^+ a_{R,j,k}]$$
$$- t_l \sum_{j,n} [c_{j,n+1}^+ c_{j,n} - c_{j,n}^+ c_{j,n+1} + c_{j,n-1}^+ c_{j,n} - c_{j,n}^+ c_{j,n-1}]$$

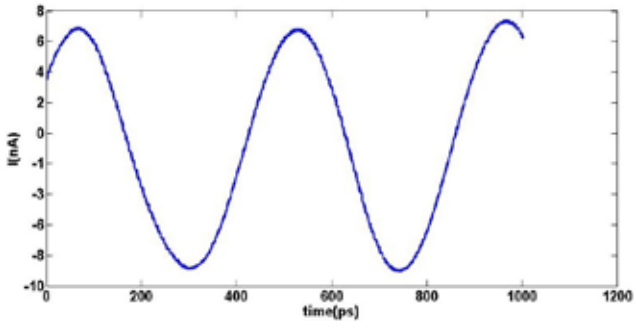
در این کار، تمامی پارامترهای سیستم مطابق مرجع [۱۲] انتخاب شده‌اند.

سری زمانی

سری زمانی جریان عبوری از سیستم می‌تواند به‌عنوان یک مشخصهٔ رفتار خطی یا غیرخطی سیستم را مشخص نماید. همان‌طور که از شکل ۳ مشاهده می‌شود، جریان نسبت به زمان به‌صورت تناوبی تقریباً منظم تغییر می‌کند. سری زمانی برای زمان کوتاه حدود ۱۰۰۰ پیکوثانیه اندازه‌گیری شده است. با ادامهٔ اندازه‌گیری می‌توان شاهد رفتار کاملاً غیرخطی و حتی نامنظم در جریان عبوری از سیستم بود.

اثر فرکانس و دامنهٔ نور فرودی

فرکانس و دامنهٔ نور اعمال‌شده از عوامل تأثیرگذار روی جریان الکتریکی عبوری از سیستم هستند که برروی فرآیند سوییچ تأثیر می‌گذارند. برای این کار ما فرکانس و دامنهٔ نور را تغییر می‌دهیم و جریان الکتریکی عبوری از DNA را مطالعه می‌کنیم. بدین منظور، دامنهٔ متغیر نور فرودی در محدودهٔ (۰-۱) در واحد $\left(\frac{\hbar c}{e r_0}\right)$ و محدودهٔ فرکانس نور فرودی در بازهٔ (۰-۵) (THz) می‌باشد. شکل ۴ تغییرات جریان را با توجه به فرکانس نور اعمال‌شده نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که برای یک فرکانس مشخص جریان به بیشترین مقدار خود می‌رسد تا جایی‌که در فرکانس $\omega = 1.5\ THz$ جریانی نزدیک به I=4 nA از زنجیرهٔ DNA عبور می‌کند. همچنین در فرکانس‌های $\omega = 1\ THz$ و $\omega = 2\ THz$ تقریباً می‌توان گفت هیچ جریانی از سیستم عبور نمی‌کند، پس می‌توان محدوده‌ای از فرکانس نور تابشی که جریان بیشینه از سیستم عبور می‌کند را به‌دست آورد.

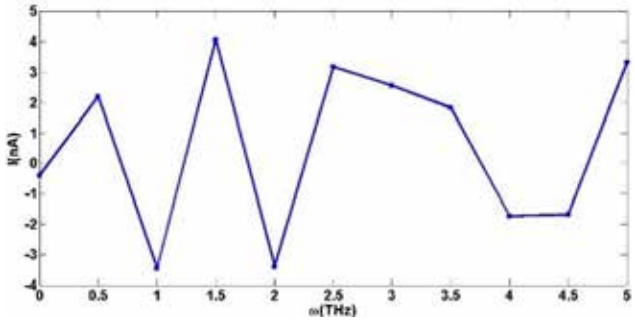


شکل۳: سری زمانی جریان عبوری از توالی ویروس

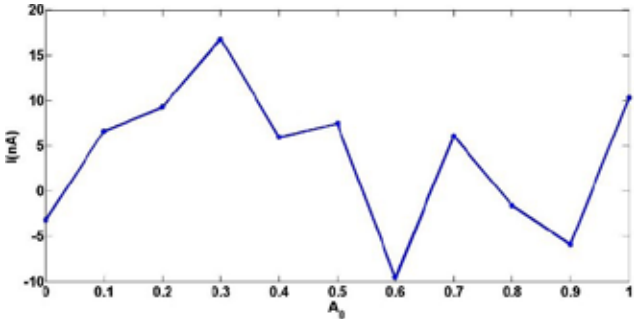
تغییرات دامنهٔ نور نیز می‌تواند عامل تأثیرگذاری در انتقال بار در زنجیرهٔ DNA باشد. با توجه به شکل ۵ بیشترین مقدار جریان تقریباً در $A_0 = 0.3 \left(\frac{\hbar c}{e r_0}\right)$ از سیستم عبور می‌کند، یعنی مناسب‌ترین محدودهٔ دامنهٔ نور برای عبور بیشترین جریان از سیستم در این محدوده می‌باشد. پس با تنظیم فرکانس و دامنهٔ نور فرودی، سیستم می‌تواند همانند یک سوییچ عمل کند.

اثر میدان الکتریکی

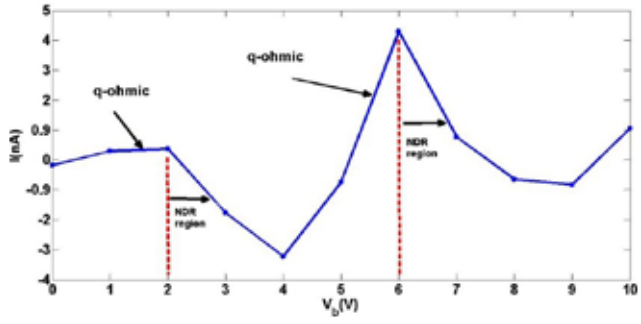
انتقال جریان در یک سیستم مولکولی زیستی از طریق تغییر ولتاژ می‌تواند کنترل شود. در مطالعهٔ اخیر تأثیر تغییرات ولتاژ را روی رسانایی الکتریکی نور در غالب منحنی مشخصهٔ جریان-ولتاژ بررسی می‌کنیم. بدین منظور توالی DNA را به الکترودهایی با ولتاژ قابل کنترل متصل می‌کنیم. ویژگی‌های نمودار I-V سیستم‌های مولکولی بیانگر پتانسیل بالای این سیستم‌ها برای کاربردهای غیرخطی، مقاومت دیفرانسیلی منفی و سوییچ جریان الکترواستاتیک و الکترومکانیک است[۱۷و۱۸]. بنابراین در شکل ۶ ناحیهٔ شبه‌اهمی و مقاوت دیفرانسیل منفی(NDR) مشخص شده است. همان‌طورکه در شکل مشخص شده است، برای یک فرکانس ثابت درابتدا شاهد رفتار شبه‌اهمی در سیستم هستیم. با افزایش



شکل۴: جریان برحسب فرکانس



شکل۵: جریان برحسب دامنهٔ موج نور فرودی



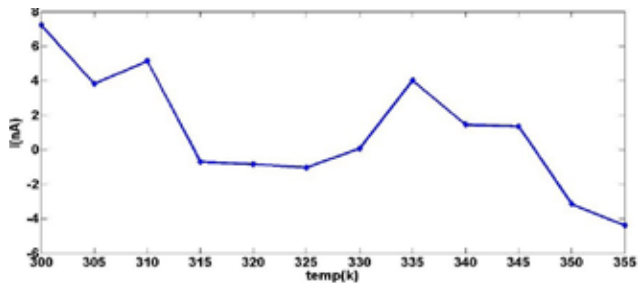
شکل۶: نمودار جریان برحسب ولتاژ برای ویروس

پتانسیل اعمالی شیب نمودار I-V به منفی تغییر می‌کند. به‌عبارت دیگر شاهد بروز پدیدهٔ NDR هستیم. مجدداً با افزایش ولتاژ شاهد تکرار متناوب این نواحی هستیم. شایان ذکر است که عرض نواحی شبه‌اهمی و NDR با افزایش ولتاژ تغییر می‌کند. پس به عبارتی می‌توان بیان کرد که با تغییرات ولتاژ ، جریان در سیستم کنترل می‌شود و سیستم در محدوده‌هایی به‌عنوان سیم (محدودهٔ شبه‌اهمیک) و در محدوده‌هایی به‌عنوان سوییچ (محدودهٔ NDR) عمل می‌کند.

اثر دما

دمای محیط از عوامل تأثیرگذار در مطالعهٔ خواص انتقال بار در DNA می‌باشد. دمای محیط را به‌وسیلهٔ ترموستات می‌توان تغییر داد. به عبارتی یک ترموستات دینامیک مولکولی، حمام حرارتی را به کل سیستم یا به بخشی از آن وصل می‌کند[۱۹]. بدین منظور برای مدل‌سازی اثر دما از ترموستات نوز-هوور[۶] [۲۰] به‌عنوان منبع حرارت استفاده شده است. معادلهٔ تحول ترموستات به‌صورت $\dot{\zeta} = \frac{1}{M}\sum m\dot{y}^2 - NK_B T_0$ تعریف می‌شود که در این رابطه M ثابت ترموستات نوز-هوور است که مقدار آن M=1000، T_0 دمای ترموستات و K_B ثابت بولتزمن می‌باشد. بنابراین ما می‌توانیم طیفی از دما را به‌دست آوریم که در آن جریان حداکثر از طریق DNA عبور می‌کند(شکل ۷).

همان‌گونه‌که مشخص است، در دماهای ۳۱۰ K و ۳۵۵ K بیشترین جریان عبوری از سیستم را شاهد هستیم، بنابراین این دماها را به‌عنوان دمای ایدئال برای سیستم درنظر می‌گیریم و هچنین می‌توان بیان کرد در



شکل۷: اثر جریان برحسب دما برای ویروس

دمای اتاق حالت سوییچ سیستم روشن است و در محدودهٔ ۳۱۵ تا ۳۳۰ درجهٔ کلوین، سیستم در حالت خاموش سوییچ می‌باشد. سپس در دمای K ۳۳۰ مجدداً سوییچ روشن می‌شود و در نهایت در K ۳۴۰ خاموش می‌شود.

بحث و نتیجه‌گیری

در این کار ما سعی کرده‌ایم انتقال جریان الکتریکی و تأثیر نور تابشی را در طراحی یک سوییچ نوری برمبنای زنجیرهٔ DNA بررسی کنیم. فرکانس و دامنهٔ نور از فاکتورهای مهم در بررسی پاسخ الکتریکی DNA به نور تابشی می‌باشند. به همین منظور فرکانس و همچنین دامنهٔ نور فرودی را تغییر داده‌ایم تا محدوده‌ای از این پارامترها را که در آن حداکثر جریان الکتریکی از DNA عبور می‌کند، به‌دست آوریم. در مطالعهٔ حاضر، اثر نور فرودی از طریق تغییر پارامتر پرش الکترون بین سایت‌ها اعمال شده و از طریق جریان الکتریکی عبوری آشکارسازی شده است. مطالعهٔ مشابه در یک مولکول نشان می‌دهد که با تابش نور فرابنفش با طول‌موج ۳۰ نانومتر، حالت بستهٔ مولکول تبدیل به حالت باز می‌شود و جریان عبوری از سیستم به ۶۰ میکروآمپر در ولتاژ ۲ ولت می‌رسد[۲۱]. اینجا سری زمانی جریان عبوری از DNA می‌تواند رفتار این سیستم با گذر زمان را نشان دهد که با افزایش زمان اندازه‌گیری شاهد رفتارغیرخطی سیستم خواهیم بود. دمای محیط از عوامل تأثیرگذار برای تنظیم و کنترل انتقال بار DNA می‌باشد که نشان می‌دهد با افزایش دما در حالت کلی شاهد سیر نزولی جریان عبوری هستیم تا جایی که در دمای ذوب (۳۴۰ K) سوییچ خاموش می‌شود. از سوی دیگر، نمودار مشخصهٔ I-V مناطق شبه‌اهمی و NDR را نشان می‌دهد که عرض این نواحی در محدوده‌های ولتاژ متفاوت تغییر می‌کند. بروز این نواحی قبلاً نیز در سوییچ‌های اپتیکی مولکولی مشاهده شده است[۲۲]. همچنین با کنترل عوامل محیطی می‌توان شرایطی را ایجاد کرد که شاهد عمل سوییچ توسط DNA باشیم. برای ادامهٔ کار پیشنهاد می‌شود که اثر اسپین الکترون نیز درنظر گرفته شود تا بتوان یک سیستم سوییچ نوری برمبنای اسپین را طراحی نمود.

6. Nosé -Hoover

References:

1. Braun D, Libchaber A. Trapping of DNA by Thermophoretic Depletion and Convection. Physical Review Letters, 2002; 89(18): 188103.

2. Teixeira, G R, da Silva Marciano, R da Silva Sergio, L P Polignano, G A C Guimaraes, O R Geller, M da Fonseca, A D S. Infrared Laser Effects at Fluences Used for Treatment of Dentin Hypersensitivity on DNA Repair in Escherichia Coli and Plasmids. Optics & Laser Technology, 2014; 64: 46-52.

3. Barnes FS. Applications of Lasers to Biology and Medicine. Proceedings of the IEEE, 1975; 63(9): 1269-78.

4. Bae S, Kim H, Lee Y, Xu X, Park J S, Zheng Y, Kim Y J. Roll-to-Roll Production of 30-inch Graphene Films for Transparent Electrodes. Nature Nanotechnology, 2010; 5(8): 574.

5. Chakraborty S, Marshall OP, Folland TG, Kim YJ, Grigorenko AN, Novoselov KS. Gain Modulation by Graphene Plasmons in Aperiodic Lattice Lasers. Science, 2016; 351(6270): 246-8.

6. Keiser G. Biophotonics: Concepts to Applications. Boston: Springer, 2016.

7. Palmer MC, Takahashi M, Westman HF. WKB Analysis of Relativistic Stern–Gerlach Measurements. Annals of Physics, 2013; 336: 505-16.

8. Mashaghi A, Katan, A. A physicist's View of DNA. arXiv preprint arXiv, 2013; 1311: 2545.

9. Watson JD, Crick FH. Letters to Nature: Molecular Structure of Nucleic Acid. Nature, 1953; 171(4356): 737-8.

10. Shi Y, Zhang C, Zhang H, Bechtel J, Dalton L, Robinson B, Steier W. Low (Sub-1-Volt) Halfwave Voltage Polymeric Electro-Optic Modulators Achieved by Controlling Chromophore Shape. Science, 2000; 288(5463): 119-22.

11. Dauxois T, Peyrard M, Bishop AR. Dynamics and Thermodynamics of a Nonlinear Model for DNA Denaturation. Physical Review E. 1992; 47(1): 684.

12. Zhang LL, Xie SJ, Kang DW. Role of Photoresponse of π Electrons in Light-Driven DNA Dissociations. Physical Review E, 2017; 96(2): 022414.

13. Marquetand P, Nogueira J, Mai S, Plasser F, González L. Challenges in Simulating Light-Induced Processes in DNA. Molecules, 2016; 22(1): 49.

14. Guisinger, NP, Greene ME, Basu R, Baluch AS, Hersam MC. Room Temperature Negative Differential Resistance through Individual Organic Molecules on Silicon Surfaces. Nano Letters, 2004; 4(1): 55-9.

15. Maizels MR, Tetteh KK A, Loukas A. Toxocara Canis: Genes Expressed by the Arrested Infective Larval Stage of a Parasitic Nematode. International Journal for Parasitology, 2000; 30 (4): 495-508.

16. Behnia S, Fathizadeh S, Akhshani A. DNA Spintronics: Charge and Spin Dynamics in DNA Wires. The Journal of Physical Chemistry C, 2016; 120 (5): 2973-83.

17. Rueckes T, Kim K, Joselevich E, Tseng GY, Cheung L, Lieber CM. Carbon Nanotube-Based Nonvolatile Random Access Memory for Molecular Computing. Science, 2000; 28 (5476): 994.

18. Collier CP, Wong EW, Belohradsk M, Raymo FM, Stoddart JF, Kuekes PJ, Williams RS, Heath JRA [2] Catenane-Based Solid State Electronically Reconfigurable Switch. Science,

2000; 289(5482): 1172.

19. Evans DJ, Morriss GP. Statistical Mechanics of Nonequilibrium Liquids, Academic Press, London, 1990.

20. Behnia S, Fathizadeh S, Akhshani A. DNA in a Dissipative Environment: A Charge Transfer Approach. Journal of the Physical Society of Japan, 2015; 84(8): 084002.

21. Vollhardt D. Characteristic Crossing Points in Specific Heat Curves of Correlated Systems. Physical Review Letters, 1997; 78(7): 1307.

22. Chen F, He J, Nuckolls C, Roberts T, Klare JE, Lindsay S. Controlled growth of Si nanowire arrays for device integration, Nano Letters, 2005; 5(3): 457-60.