

aashokri@tpnu.ac.ir :

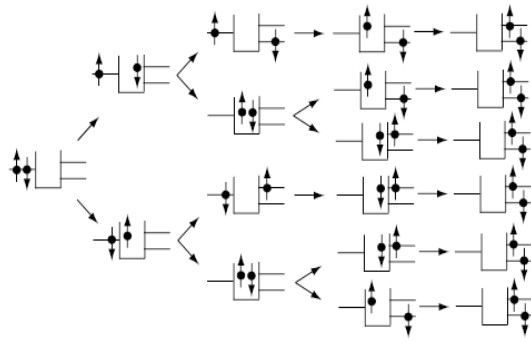
(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۹/۱۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۵/۱)

() ()

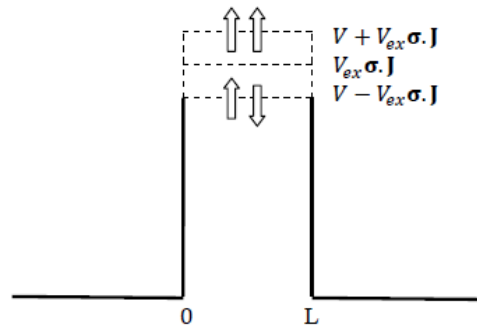
ساختارها شاخه جدیدی به نام اسپیترونیک را به وجود آورده است. در الکترونیک از بار حاملها برای انتقال اطلاعات استفاده می‌شود، در حالی که مبحث اصلی اسپیترونیک یا همان الکترونیک اسپینی، کنترل همدوسی اسپین‌ها در محیط‌های جامد با بهره‌گیری از خصوصیات اسپین و بار حاملها برای پردازش و ذخیره‌سازی اطلاعات است. محققان اسپیترونیک تلاش می‌کنند تا با استفاده از قواعد حاکم بر برهم‌کنش و تغییرات «اسپین الکترون» روش‌های جدیدی برای ساخت سیستم‌هایی معادل با مدارهای الکترونیکی به خصوص برای محاسبه و ذخیره اطلاعات بیابند.

ترتیب‌بندی مقاله به این صورت است: ابتدا یک سیستم مزوسکوپیکی مانند سیم‌های کوانتومی متصل به دو الکتروند نیم‌بی‌نهایت ایده‌ال در نظر می‌گیریم سپس با نوشتن هامیلتونی

پیشرفت در فناوری نانو، ساخت ادوات مزوسکوپیکی شبه یک بعدی را مهیا کرده است به طوری که ترابرد الکتریکی حاملها در آن یکی از خواص جالب مورد بررسی است. یکی از اثرات مهمی که در خواص ترابرد الکتریکی در نانو مقیاس‌ها نقش عمده دارد، پراکندگی الکترون از عوامل مختلف در درون ساختار مورد نظر است. به واسطه تشخیص‌ناپذیری الکترون و برهم‌کنش کولنی بین الکترون عبوری و الکترون مقید، پراکندگی به شدت به اسپین کل وابسته است. با پیشرفت روزافزون فناوری ساخت ادوات نیم‌رسانا، سیم‌ها و نقطه‌های کوانتومی، امکان مطالعه پراکندگی الکترون‌های عبوری از تک الکترون مقید فراهم شده است. مطالعه بر روی ترابرد الکتریکی وابسته به اسپین و استفاده از درجه آزادی اسپینی الکترون‌ها در نانو



شکل ۲. نمودار شماتیک حرکت دو الکترون از یک چاه پتانسیل.



شکل ۱. تأثیر پتانسیل تبدلی بر ارتفاع سد پتانسیل.

حرکت می‌کنند و جمله آخر، V_{ex} پتانسیل تبدلی می‌باشد که به دلیل اسپین دو الکترون ایجاد می‌شود و به صورت نمادین در شکل ۱ نشان داده شده است، و چگونگی حرکت دو الکترون در شکل ۲ نشان داده شده است.

پس از حل معادله هامیلتونی، ویژه تابعها در نواحی اول، دوم

و سوم را به ترتیب با ψ_1 ، ψ_2 و ψ_3 نشان می‌دهیم [۲ و ۳]

$$\psi_{1\sigma} = A_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} e^{ikx} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + B_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} e^{-ikx} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + A_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} e^{ikx} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + B_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} e^{-ikx} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\psi_{2\sigma} = C_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} e^{ikx} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + D_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} e^{-ikx} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + G_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} e^{ikx} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} + F_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} e^{-ikx} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\psi_{3\sigma} = t_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} e^{ik'x} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + r_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} e^{-ik'x} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + t_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} e^{ik'x} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + r_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} e^{-ik'x} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

بردارهای موج عبارت‌اند از:

$$k_{1\sigma} = \sqrt{\frac{\gamma m^*}{\hbar^2} \left(E - V_{dir} - V_{ex} (J+1) + V_a \left(\frac{x_i}{L} \right) \right)}, \quad (6)$$

$$k_{2\sigma} = \sqrt{\frac{\gamma m^*}{\hbar^2} \left(E - V_{dir} - V_{ex} (J) + V_a \left(\frac{x_i}{L} \right) \right)}, \quad (7)$$

$$k_{\sigma} = k'_{\sigma} = \sqrt{\frac{\gamma m^*}{\hbar^2} E}, \quad (8)$$

به طوری که V_a ولتاژ بایاس است. با اعمال شرایط مرزی پیوستگی توابع موج و مشتقات آنها می‌توان ماتریس انتقال کل را محاسبه کرد. برای سادگی جرم‌ها را یکسان و مرزها را در

مناسب بین دو الکترون (الکترون عبوری و الکترون مقید) در یک سیم کوانتومی دارای برآمدگی، که با تعریف یک پتانسیل در یک ناحیه محدود عملی می‌شود، و حل آن (ویژه بردار و ویژه مقدار در هر ناحیه) با اعمال شرایط مرزی مربوطه عبوردهی الکترون‌ها بررسی می‌شود. محاسباتمان مبتنی بر ماتریس انتقال بوده و جریان الکتریکی و رسانش الکتریکی سیستم مورد نظر از لاندائور-بوتیکر^۱ تعیین می‌شود. محاسبات عددی بر روی یک سیم کوانتومی برآمده در غیاب میدان مغناطیس و حضور ولتاژ خارجی انجام می‌شود. سپس وابستگی به دما، عرض سد پتانسیل، ارتفاع سد پتانسیل و ولتاژهای متفاوت بررسی می‌گردد و در پایان یک نتیجه‌گیری مختصر خواهیم کرد.

طبق مدل الکترون تقریباً آزاد، هامیلتونی دو بعدی دو الکترون در راستای رشد (x) برای سیستم را می‌توان به صورت

$$H = \frac{-\hbar^2}{2m^*} \left[\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \right], \quad x < -\frac{L}{2}, x > \frac{L}{2}, \quad (1)$$

$$H = \frac{-\hbar^2}{2m^*} \left[\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \right] + V_{dir} + V_{ex} \sigma \cdot J, \quad (2)$$

$$x \in \left[-\frac{L}{2}, \frac{L}{2} \right]$$

نوشت [۱]. در روابط (۱) و (۲)، جمله اول مربوط به انرژی جنبشی دو الکترون است، m^* جرم مؤثر الکترون است که در کل اتصالات، برابر با جرم الکترون آزاد، m فرض شده است، و فرض می‌کنیم که دو الکترون در یک پتانسیل مؤثر V_{dir}

۱. Landauer Buttiker

در این عبارت f_L و f_R به ترتیب تابع توزیع فرمی-دیراک مربوط به ناحیه چپ و راست است که با هم اختلاف پتانسیل V_a دارند. رسانندگی الکتریکی^۴ عبارت است از [۹ و ۱۰]

$$G = \frac{\langle I \rangle}{V} = g_s \frac{e^2}{h} \int T(E) \left(-\frac{\partial f(E)}{\partial E} \right) dE. \quad (16)$$

در رابطه بالا g_s بیانگر درجه تبهگنی اسپینی می‌باشد در صورت وجود تبهگنی $g_s = 2$ و در غیر این صورت $g_s = 1$ می‌باشد [۲ و ۳]، در صورتی که $G_0 = g_s \frac{e^2}{h}$ در نظر بگیریم، داریم $G/G_0 = \int T(E) \left(-\frac{\partial f(E)}{\partial E} \right) dE$ و میزان افت و خیز انرژی عبارت است از [۱۱]

$$S = \frac{e^2}{\pi \hbar} \sum_n \int dE \left(T_n(E) \left[1 - T_n(E) (f_L - f_R)^2 \right] \right). \quad (17)$$

عامل فانو F یک عامل اندازه‌گیری انحراف از نوفه شلیکی پواسون است. نسبت نوفه شلیکی به نوفه پواسون را عامل فانو می‌نامیم که بیانگر میزان همبستگی الکترون است و به صورت زیر می‌باشد [۱۲]

$$F = \frac{\frac{e^2}{\pi \hbar} \sum_n \int dE \left(T_n(E) \left[1 - T_n(E) (f_L - f_R)^2 \right] \right)}{2 \frac{e^2}{\pi \hbar} \int dE \left(T(E) (f_L(E) - f_R(E)) \right)}. \quad (18)$$

در محاسبات عددی از مقادیر زیر برای اتصالات GaAs استفاده می‌کنیم: $m^* = 0.067 m_0$ ، $V_{ex} = -0.025 \text{ eV}$ ، $V_0 = 0.012 \text{ eV}$ ، $V_a = 0.0027 \text{ eV}$ و $G_0 = 2e^2/h$.

در ابتدا عبور الکترون‌ها از یک سد پتانسیل به صورت $V_{dir} = V_0 \cos \frac{\pi x}{L}$ ، برای ۴ عرض سد پتانسیل ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ نانومتری با استفاده از روابط (۹) تا (۱۱) در شکل ۳ قابل مشاهده است. در تمامی نمودارها حالت تک‌تایی^۵ رفتار چاه

$x = \pm \frac{L}{2}$ در نظر می‌گیریم.

$$M_L \times \begin{pmatrix} A_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} \\ B_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} \\ A_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} \\ B_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} \end{pmatrix} = M_L \times \begin{pmatrix} C_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} \\ D_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} \\ G_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} \\ F_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$M_R \times \begin{pmatrix} C_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} \\ D_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} \\ G_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} \\ F_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} \end{pmatrix} = M_R \times \begin{pmatrix} t_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} \\ r_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} \\ t_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} \\ r_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} A_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} \\ B_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} \\ A_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} \\ B_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} \end{pmatrix} = M_L^{-1} \times M(L, R) \times M_R \times \begin{pmatrix} t_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} \\ r_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} \\ t_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} \\ r_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

که در عبارت بالا

$$M(L, R) = M(L, 1) \times \prod_{i=1}^{N-1} M(i, i+1) \times M(N, R) \quad \text{می‌باشد [۴].}$$

$t_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow} = t_{\downarrow\uparrow\rightarrow\downarrow\uparrow} = t_{nsf}$ ، $t_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow} = t_{\downarrow\uparrow\rightarrow\uparrow\downarrow} = t_{sf}$ ، (۱۲) به طوری که t_{sf} و t_{nsf} به ترتیب ضرایب عبوردهی بدون چرخش اسپینی^۱ و با چرخش اسپینی^۲ می‌باشد، احتمال عبوردهی کل با بهره‌گیری از روابط ماتریسی به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۵]

$$T(E) = |t_{\uparrow\uparrow\rightarrow\uparrow\uparrow}|^2 + |t_{\downarrow\downarrow\rightarrow\downarrow\downarrow}|^2 + |t_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow}|^2 + |t_{\downarrow\uparrow\rightarrow\uparrow\downarrow}|^2 + |t_{\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow}|^2 + |t_{\downarrow\uparrow\rightarrow\downarrow\uparrow}|^2 \\ = \frac{1}{4} T_s(E) + \frac{3}{4} T_t(E). \quad (13)$$

با استفاده از نتایج بالا می‌توان درجه درهم تنیدگی^۳ (C) به صورت زیر محاسبه نمود [۶ و ۷].

$$C = \frac{|\langle \Psi | \Psi_{\downarrow\downarrow} \rangle \langle \Psi | \Psi_{\uparrow\uparrow} \rangle - \langle \Psi | \Psi_{\downarrow\uparrow} \rangle \langle \Psi | \Psi_{\uparrow\downarrow} \rangle|}{\sqrt{(|t_{\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow}|^2 + |t_{\downarrow\uparrow\rightarrow\uparrow\downarrow}|^2)}}. \quad (14)$$

جریان الکتریکی برای پیکربندی‌های مختلف اسپینی در سیستم مورد نظر در دمای T بنابر فرمول لاندائور-بوتیکر [۸] برابر است با

$$I = \frac{e}{h} \int T(E) [f_L(E) - f_R(E)] dE, \quad (15)$$

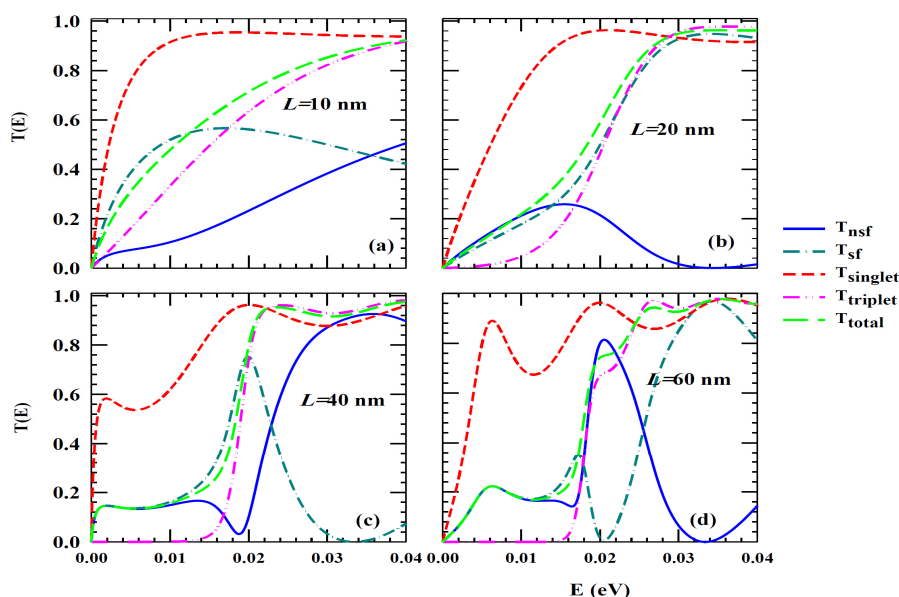
۱. spin-flip

۲. non spin-flip

۳. concurrence

۴. conductance

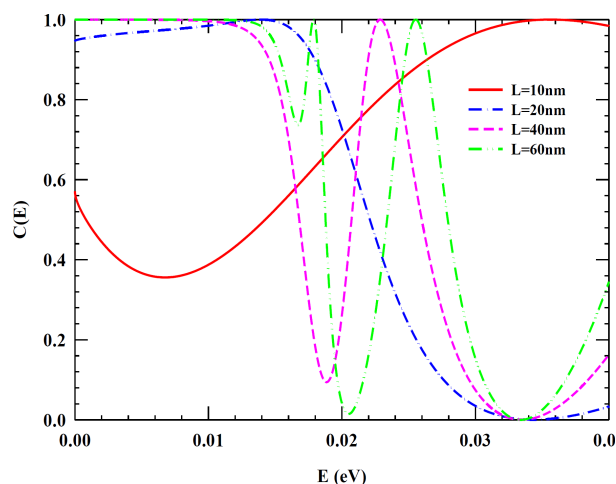
۵. singlet



شکل ۳. نمودار وابستگی ضرایب عبوردهی الکترون در حالات مختلف به انرژی الکترون فرودی برای چندین پهنای متفاوت.

انرژی بالا T_{sf} به سمت صفر میل می‌کند در حالی که T_{nsf} به سمت ۱ میل می‌کند، که این موضوع بیانگر کاهش درهم‌تنیدگی در انرژی‌های بالا می‌باشد، و در شکل ۳ به وضوح دیده می‌شود، ولی برای عرض سد پتانسیل 10° نانومتر رفتار عکس این مطلب است. با مقایسه شکل ۴ (درجه درهم‌تنیدگی) با شکل ۳ (احتمال عبوردهی) مشاهده می‌شود که بیشترین میزان درهم‌تنیدگی زمانی که این دو نمودار برهم منطبق هستند اتفاق می‌افتد. باید به این نکته توجه نمود که برای عرض سد پتانسیل 10° نانومتر در انرژی‌های پایین درهم‌تنیدگی کم می‌باشد و با افزایش انرژی، افزایش می‌یابد که این رفتار عکس حالات دیگر است.

مورد دیگری که مورد مطالعه قرار گرفته است، ترابرد الکتریکی می‌باشد که در شکل ۵ مشخص شده است. نمودار رسانندگی الکتریکی و جریان الکتریکی با افزایش پهنای سد پتانسیل رفتار پله گونه دارد، که به دلیل انتگرال گیری از احتمال عبور می‌باشد. همچنین دو قله وجود دارد که به دلیل حالت تک‌تایی و سه‌تایی حرکت الکترون بوده و در نمودار G/G_0 با افزایش پهنای سد به مقدار $1/4$ و $3/4$ مورد انتظار نزدیک‌تر می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودار G/G_0 و عامل فانو عکس یکدیگر رفتار می‌کنند. در شکل ۵، قسمت (d) میزان افت و خیز الکترون در عبور از سیستم مورد بحث نشان داده شده

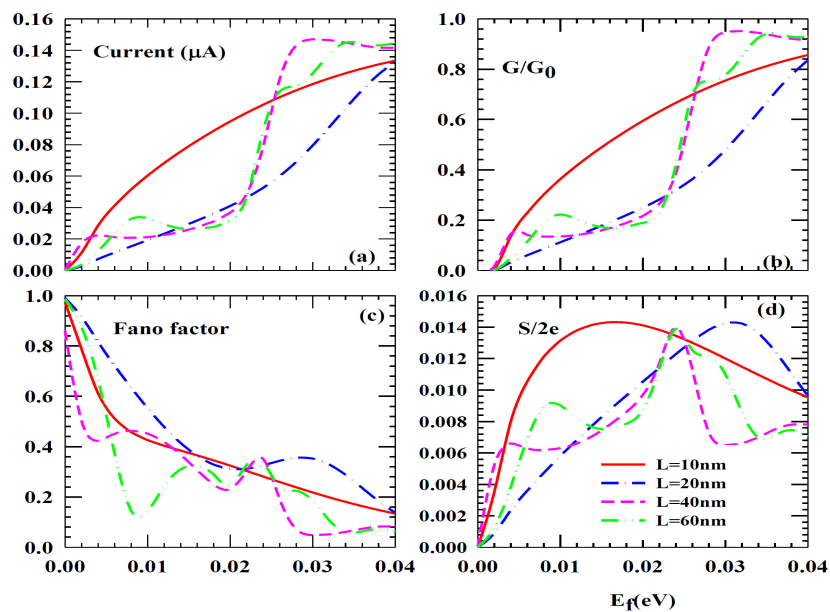


شکل ۴. نمودار وابستگی درجه درهم‌تنیدگی در حالات مختلف به انرژی الکترون فرودی برای چندین پهنای متفاوت.

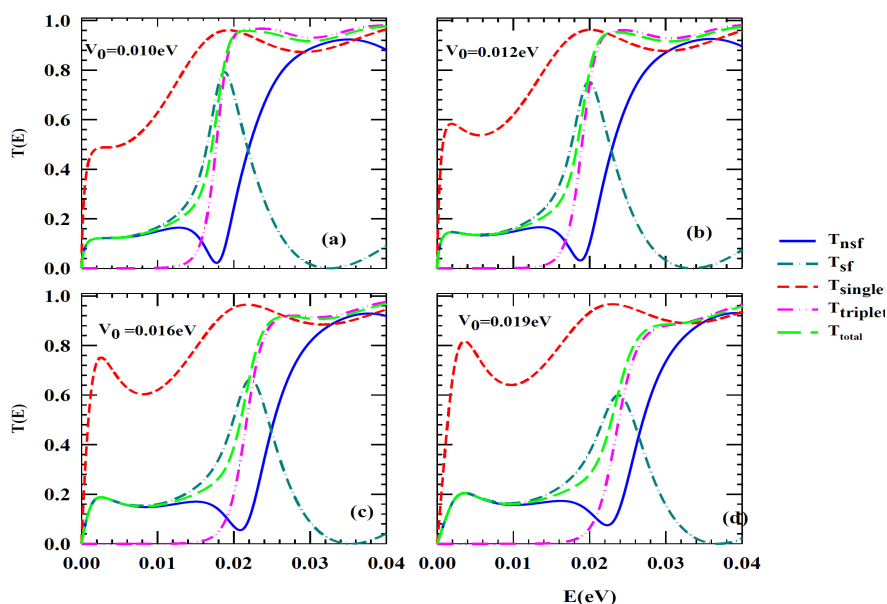
مانند و حالت سه‌تایی^۱ رفتار سد گونه دارد، که این رفتار به علت پارامترهای انتخابی در این مقاله می‌باشد.

با افزایش ارتفاع سد پتانسیل، الکترون‌ها با ترازهای بیشتری روبه‌رو می‌شوند، پس حالت تشدید افزایش می‌یابد. احتمال عبوردهی T_{nsf} و T_{sf} در انرژی‌های پایین برهم منطبق می‌باشند ولی با افزایش انرژی از یکدیگر فاصله می‌گیرند تا جایی که در حدود انرژی 0.02 eV فاصله زیاد می‌شود. در

۱. triplet



شکل ۵. نمودار وابستگی خواص ترابرد الکتريکی در حالات مختلف به انرژی الکترون فرودی برای چندین پهنای متفاوت.



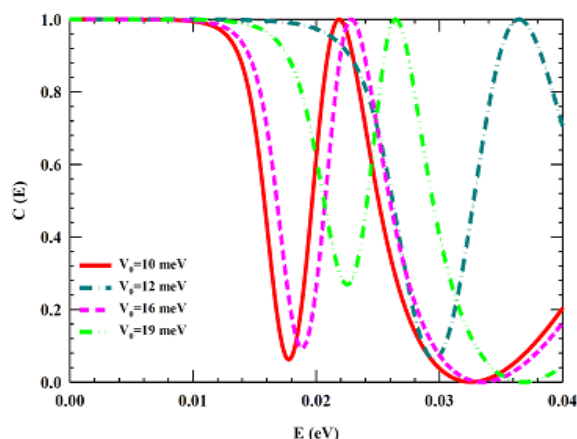
شکل ۶. وابستگی ضرایب عبوردهی الکترون در حالات مختلف به انرژی الکترون فرودی برای چندین ارتفاع متفاوت سد پتانسیل.

بیشتر از حالت سه تایی می‌باشد به طوری که تا حدود انرژی 0.1 eV تا 0.15 eV احتمال عبور سه‌تایی صفر می‌باشد، این رفتار الکترون بدین دلیل می‌باشد که افزایش ارتفاع سد پتانسیل موجب می‌گردد که الکترون به هنگام عبور، سد پتانسیل بلندتری را در مقابل خود احساس نموده و برای غلبه بر این سد پتانسیل احتیاج به انرژی بیشتری داشته و در انرژی پایین توان عبور از این سد را ندارد. ولی حالت تک‌تایی، چاه

است که با افزایش پهنای سد (چاه) پتانسیل امکان تغییر انرژی افزایش می‌یابد و دیگر الکترون با انرژی قبلی قادر به عبور از سد (چاه) پتانسیل نخواهد بود.

برای اینکه درک عمیق‌تری از ترابرد الکترونی به دست آوریم، در شکل ۶ احتمال عبور الکترون را به ازای $L = 40 \text{ nm}$ نشان داده‌ایم. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود در تمامی نمودارها در انرژی‌های پایین احتمال عبور حالت تک‌تایی

کمتر از ۰/۰۱ الکترون ولت در نمودارهای ۸ (a) و ۸ (b) با افزایش ارتفاع سد پتانسیل مقدار جریان الکتریکی و رسانندگی افزایش می‌یابد، ولی در ناحیه دوم رفتار نمودارها عکس ناحیه قبل می‌باشد و در کل شیب تغییرات کندتر می‌شود. در نمودار ۸ (b) برای تمامی ارتفاع‌ها دو انرژی تشدید وجود دارد. هرچه ارتفاع سد افزایش می‌یابد قله اول به مقدار ۱/۴ نزدیکتر می‌شود، این قله زمانی اتفاق می‌افتد که الکترون در حالت تک‌تایی انرژی کافی برای عبور را پیدا کند. پارامترهای خاص در نظر گرفته در این مقاله موجب می‌شود که در حالت تک‌تایی الکترون با یک سد و حالت سه‌تایی با چاه پتانسیل روبه‌رو شود، پس می‌توان افزایش در یک قله و کاهش در قله دیگر را با این دلیل توجیه نمود. در نمودار ۸ (c) میزان انحراف از همدوسی مشخص گردیده است. نمودار ۸ (d) میزان افت و خیز انرژی الکترون را نمایش داده است که با افزایش ارتفاع سد پتانسیل میزان افت و خیز انرژی الکترون‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش ارتفاع سد پتانسیل میزان افت و خیز انرژی الکترون در حالت تک‌تایی افزایش می‌یابد. در ادامه با تغییر ولتاژ اعمالی بر سد پتانسیل به بررسی احتمال عبوردهی الکترون می‌پردازیم. زمانی که ولتاژ اعمالی صفر می‌باشد، الکترون به هنگام عبور از سد پتانسیل در ابتدا پتانسیل صفر را در مقابل خود مشاهده می‌کند، ولی با افزایش ولتاژ پتانسیلی که الکترون در مقابل خود می‌بیند افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با توجه به رابطه (۶) و (۷) پتانسیل مؤثر به صورت $V_{\text{eff}} = V_0 - \frac{1}{4}V_{\text{ex}} - V_a(x_i/L)$ برای حالت عبور سه‌تایی تعریف می‌شود. برای تحلیل تغییرات این پتانسیل مؤثر برحسب ولتاژ دو ناحیه در نظر می‌گیریم، ناحیه اول برای $0 < x < \frac{-L}{4}$ می‌باشد در این بازه V_{eff} با افزایش ولتاژ اعمالی افزایش می‌یابد ولی در ناحیه $0 < x < \frac{L}{4}$ با کاهش V_{eff} روبه‌رو می‌شویم، در نتیجه احتمال عبوردهی تک‌تایی کاهش می‌یابد. در حالت تک‌تایی پتانسیل مؤثر به صورت $V_{\text{eff}} = V_0 + \frac{3}{4}V_{\text{ex}} - V_a(x_i/L)$ می‌باشد، در این حالت نیز افزایش ولتاژ اعمالی موجب کاهش احتمال عبور حالت تک‌تایی می‌شود و تمام مواردی که برای حالت قبل توضیح دادیم در مورد

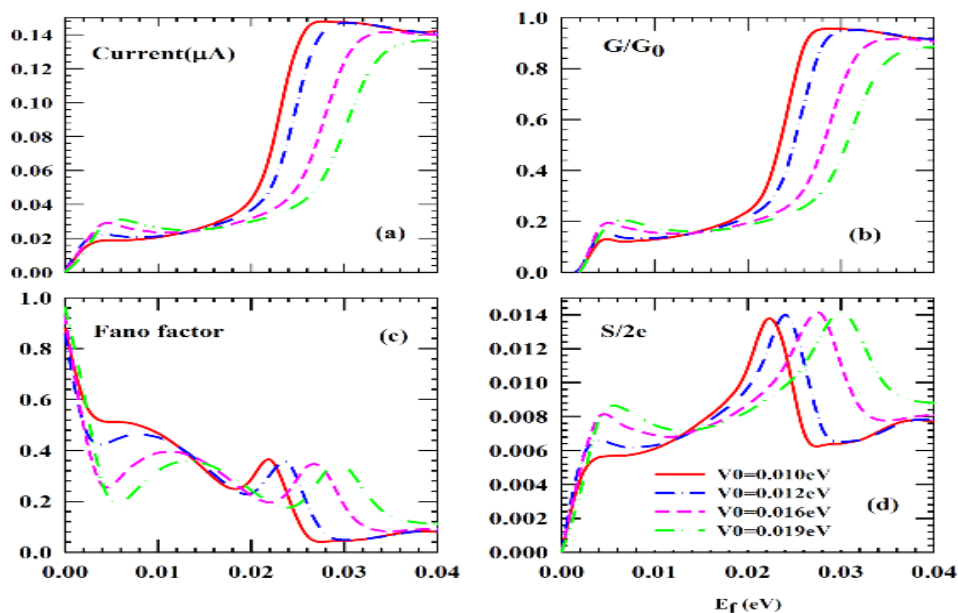


شکل ۷. وابستگی درجه درهم‌تنیدگی به انرژی الکترون فرودی برای چندین ارتفاع متفاوت سد پتانسیل.

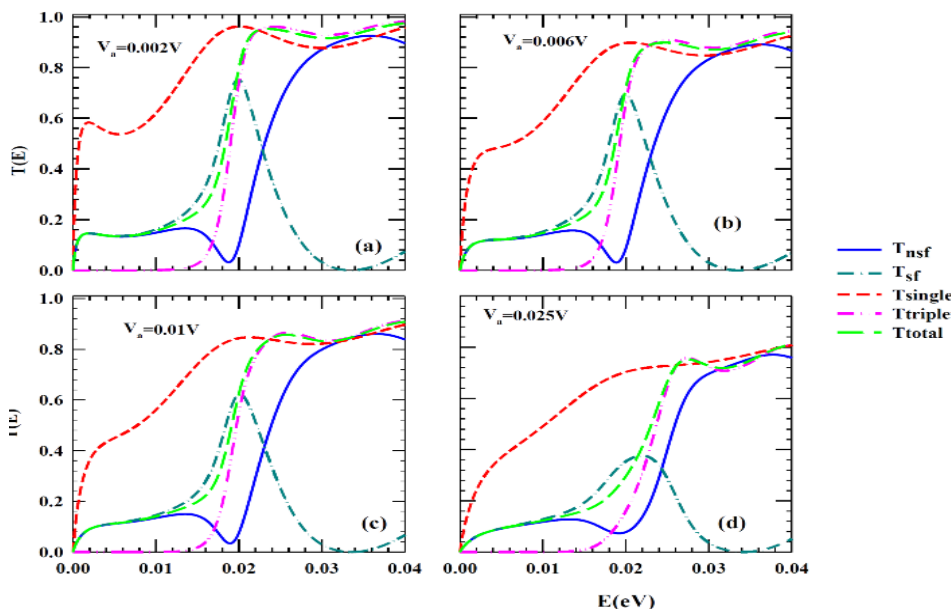
پتانسیل کم عمق‌تری را در مقابل خود احساس کرده و حتی در انرژی پایین نیز امکان عبور از این چاه پتانسیل برای آن وجود دارد. با افزایش ارتفاع سد، انرژی تشدید افزایش می‌یابد و بیشینه مقدار T_{singlet} افزایش می‌یابد، زیرا در این حالت پتانسیل مؤثر برای حالت تک‌تایی به صورت $V_{\text{eff}} = V_0 + \frac{3}{4}V_{\text{ex}}$ و برای حالت سه‌تایی به $V_{\text{eff}} = V_0 - \frac{1}{4}V_{\text{ex}}$ می‌باشد.

در شکل ۷ تغییرات درجه درهم‌تنیدگی الکترون‌ها را برحسب انرژی الکترون فرودی برای چهار ارتفاع سد پتانسیل رسم شده است. در شکل ۶ در تمامی نمودارها در انرژی‌های کم، نمودارهای T_{nsf} و T_{sf} ، در برهم منطبق بوده و مقادیر یکسانی را دارا می‌باشند. اگر به مقایسه این نمودارها، با رفتاری که نمودارهای C در شکل ۷ از خود نشان می‌دهد، بپردازیم مشاهده می‌کنیم که یک رابطه بسیار مهم میان این نمودارها وجود دارد، جایی که C یک می‌باشد T_{nsf} و T_{sf} به هم نزدیک‌اند، یعنی الکترون‌ها بیشتر درهم‌تنیده‌اند، و جایی که C کمینه است T_{nsf} و T_{sf} بیشترین اختلاف را با هم دارند.

شکل ۸ تغییرات ترابرد الکتریکی را بر اساس تغییر ارتفاع سد پتانسیل نشان می‌دهد. برای بررسی شکل ۸ نمودارهای مورد نظر را به دو ناحیه تقسیم می‌کنیم. ناحیه اول برای انرژی‌های زیر ۰/۰۱ الکترون ولت و ناحیه دوم بین ۰/۰۱ الکترون ولت تا ۰/۰۴ الکترون ولت می‌باشد. در انرژی‌های



شکل ۸. وابستگی خواص ترابرد الکتريکی به انرژی الکترون فرودی برای چندین ارتفاع متفاوت سد پتانسیل.

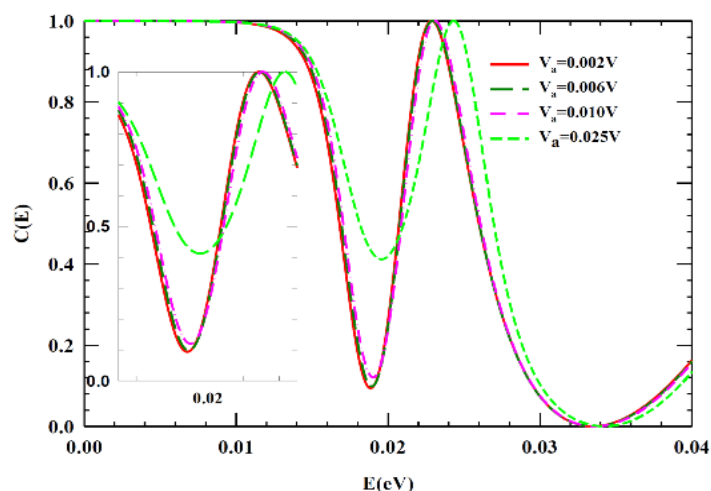


شکل ۹. وابستگی احتمال عبوردهی الکترون در حالات مختلف به انرژی الکترون فرودی برای چندین ولتاژ اعمالی متفاوت بر سد پتانسیل.

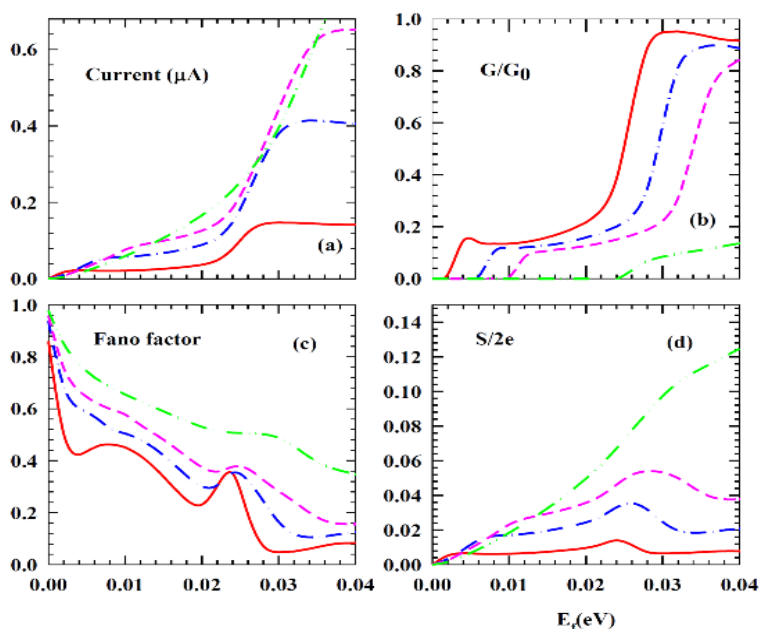
مثبت و یا منفی (سد و چاه) برای حالات مختلف (تکتایی و سه‌تایی) رفتار کند. بنابراین الکترون در حالات مختلف خود نسبت به سد و چاه پتانسیل، عبوردهی مختلفی نشان می‌دهد. مطلبی که در این نمودارها قابل توجه می‌باشد این است، که افزایش ولتاژ اعمالی بر روی انرژی تشدید بی‌تأثیر می‌باشد به طوری که تنها موجب کاهش احتمال عبور می‌گردد ولی مکان قله‌ها بدون تغییر باقی می‌ماند. شیب تغییرات تمامی نمودارها

تمامی احتمال‌های عبوردهی صادق می‌باشد. البته باید دقت نمود که این توضیحات و این رفتار پتانسیل تنها تا زمانی که $V_0 - \frac{1}{2}V_{ex}$ مثبت باشد صدق می‌کند.

با توجه به دو رابطه مربوط به V_{eff} برای حالات مختلف سیستم مورد نظر مشاهده می‌شود که با انتخاب پارامترهای مختلف از قبیل ارتفاع سد (چاه) پتانسیل V_0 ، پتانسیل تبادل V_{ex} و ولتاژ اعمالی V_a ، پتانسیل مؤثر V_{eff} می‌تواند به صورت



شکل ۱۰. نمودار درجه درهم تنیدگی به انرژی الکترون فرودی برای چندین ولتاژ اعمالی متفاوت بر سد پتانسیل.



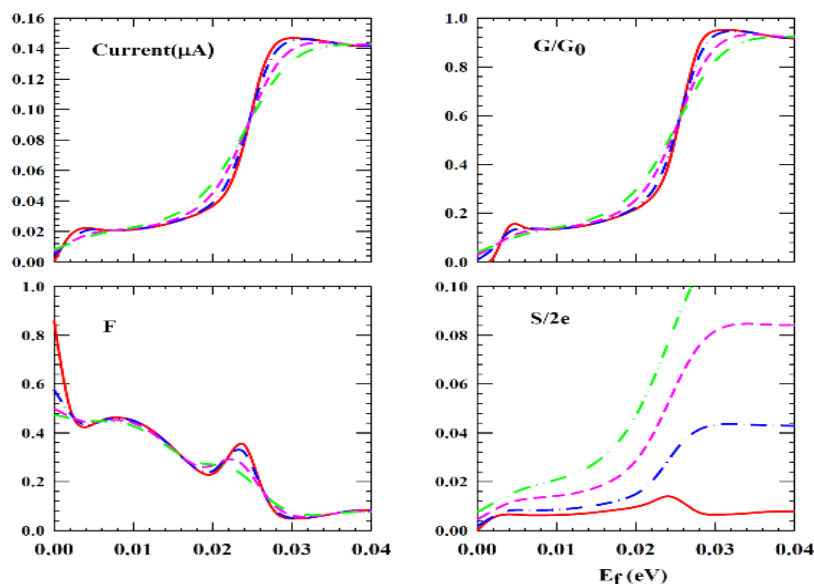
شکل ۱۱. وابستگی خواص ترابرد الکتریکی به انرژی الکترون فرودی برای چندین ولتاژ اعمالی متفاوت بر سد پتانسیل.

کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۹ انتخاب این پارامترهای خاص برای این سیستم موجب کاهش عبوردهی الکترون با افزایش ولتاژ اعمالی بر سیستم می‌گردد. در شکل ۹ احتمال عبور T_{sf} در تمامی ولتاژها در یک انرژی خاص دارای گاف می‌باشد (مقدار آن صفر است). در واقع T_{nsf} و T_{sf} خاصیت پادشدیدی دارند. در شکل ۱۰ به مقایسه درجه درهم تنیدگی در ولتاژهای مختلف پرداختیم، این نمودارها نیز این موضوع است را تأیید می‌کند که با افزایش بایاس روند تغییرات عرضی ثابت می‌باشند تنها در مقادیر متفاوت است. در تمامی نمودارها تا حدود انرژی

کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۹ انتخاب این پارامترهای خاص برای این سیستم موجب کاهش عبوردهی الکترون با افزایش ولتاژ اعمالی بر سیستم می‌گردد. در شکل ۹ احتمال عبور T_{sf} در تمامی ولتاژها در یک انرژی خاص دارای گاف می‌باشد (مقدار آن صفر است). در واقع T_{nsf} و T_{sf} خاصیت پادشدیدی دارند.

در شکل ۱۰ به مقایسه درجه درهم تنیدگی در ولتاژهای مختلف پرداختیم، این نمودارها نیز این موضوع است را تأیید می‌کند که با افزایش بایاس روند تغییرات عرضی ثابت می‌باشند تنها در مقادیر متفاوت است. در تمامی نمودارها تا حدود انرژی

در شکل ۱۲ نمودار وابستگی دمایی ترابرد الکتریکی برحسب انرژی فرمی رسم شده است، این نمودار در دمای



شکل ۱۲. نمودار وابستگی خواص ترابرد الکتریکی به انرژی الکترون فرودی برای چندین دمای متفاوت سد پتانسیل.

پایین (وابسته به ولتاژ) رفتار خاصی دارد که در ولتاژهای کمتر این حساسیت برداشته می‌شود. این شکل نشان می‌دهد که هر دو حالت تک‌تایی و سه‌تایی برای الکترون وجود دارد و الکترون با یک سد دو برابر رو به رو می‌شود که دارای مقداری انرژی تشدید است که در حالت عبوردهی کامل ایجاد می‌شود. جزئیات بیشتر زمانی ست که اسپین و پتانسیل کولنی را در نظر بگیریم. برای پارامترهای در نظر گرفته شده در این مقاله و چاه پتانسیل خیلی ضعیف، دو حالت مقید برای یک الکترون وجود دارد، با افزایش دما این حالت مقید کم می‌شود و با افزایش پتانسیل کولنی یک سری نوارهای مجازی ایجاد می‌شوند. در صورتی که اگر برهم‌کنشی وجود نداشته باشد الکترون در یکی از این چهار حالت قرار دارد. با توجه به شکل ۱۲ (d) یک آستانه انرژی فرمی برای رسانندگی وجود دارد. هر چه دما افزایش یابد این مقدار کمتر می‌شود و الکترون برای آغاز رسانندگی به انرژی کمتری احتیاج دارد. هر چه دما کمتر باشد سیستم منظم‌تر است.

در این مقاله، به اثرات پراکندگی وابسته به اسپین روی درهم‌تنیدگی الکترون‌ها و خواص ترابرد الکتریکی خصوصیات

اسپینی جریان‌های خروجی از اتصالات، مانند چگالی جریان‌های وابسته به اسپین، نوفه شلیکی و عامل فانو در سیستم مزوسکوپیکی مانند سیم‌های کوانتومی متصل به دو الکتروود نیمه بی‌نهایت آرمانی پرداختیم. مهم‌ترین ساختار مد نظر، اتصالات GaAs بودند. این ساختار، بنا بر خواصی که از خود نشان می‌دهند، به عنوان یک سیم کوانتومی تقریباً کامل می‌باشد. بررسی اثرات عوامل محیطی همچون ولتاژ اعمالی به دو سر اتصال، اثر دما، عمق سد پتانسیل و عرض سد پتانسیل روی عبوردهی و جریان خروجی و رسانندگی الکتریکی و به خصوص نوفه شلیکی و عامل فانو دانش لازم برای طراحی ادوات الکترونیکی وابسته به بار و اسپین در مقیاس نانو و رایانه‌های کوانتومی و در کلیه صنایع مرتبط با فن‌آوری پیشرفته الکترونیک و مخابرات با کیفیت مطلوب را به دست می‌دهد. این سامانه مانند یک صافی برای عبور الکترون عمل می‌کند. با افزایش عرض سد پتانسیل میزان احتمال عبوردهی و میزان انرژی تشدید افزایش می‌یابد. تا زمانی که احتمال عبوردهی T_{nsf} و T_{sf} با یکدیگر برابر می‌باشند، درجه درهم‌تنیدگی بیشترین مقدار خود را دارد و زمانی که فاصله این دو احتمال افزایش یابد، درجه درهم‌تنیدگی کاهش می‌یابد. با افزایش انرژی، T_{nsf} به سمت یک میل می‌کند در صورتی که T_{sf} تا حد صفر کاهش می‌یابد و به تبع آن، درجه

پایین (وابسته به ولتاژ) رفتار خاصی دارد که در ولتاژهای کمتر این حساسیت برداشته می‌شود. این شکل نشان می‌دهد که هر دو حالت تک‌تایی و سه‌تایی برای الکترون وجود دارد و الکترون با یک سد دو برابر رو به رو می‌شود که دارای مقداری انرژی تشدید است که در حالت عبوردهی کامل ایجاد می‌شود. جزئیات بیشتر زمانی ست که اسپین و پتانسیل کولنی را در نظر بگیریم. برای پارامترهای در نظر گرفته شده در این مقاله و چاه پتانسیل خیلی ضعیف، دو حالت مقید برای یک الکترون وجود دارد، با افزایش دما این حالت مقید کم می‌شود و با افزایش پتانسیل کولنی یک سری نوارهای مجازی ایجاد می‌شوند. در صورتی که اگر برهم‌کنشی وجود نداشته باشد الکترون در یکی از این چهار حالت قرار دارد. با توجه به شکل ۱۲ (d) یک آستانه انرژی فرمی برای رسانندگی وجود دارد. هر چه دما افزایش یابد این مقدار کمتر می‌شود و الکترون برای آغاز رسانندگی به انرژی کمتری احتیاج دارد. هر چه دما کمتر باشد سیستم منظم‌تر است.

در این مقاله، به اثرات پراکندگی وابسته به اسپین روی درهم‌تنیدگی الکترون‌ها و خواص ترابرد الکتریکی خصوصیات

پتانسیل تبادلگی کاهش یافته و احتمال عبور افزایش یابد. در نمودار جریان الکتریکی و رسانندگی الکتریکی دارای دو قله می باشند که مربوط به دو حالت تک تایی و سه تایی می باشد و با افزایش ارتفاع سد جریان و رسانندگی و به تبع آن جریان الکتریکی، رسانندگی الکتریکی افزایش یابد. افزایش ولتاژ با پارامترهای کنونی مقاله یک حالت سد و چاه را ایجاد کرده و همین امر موجب کاهش رسانندگی با افزایش ولتاژ می شود ولی باعث افزایش نوفه و افزایش جریان می شود. بدین ترتیب، با کنترل فاکتورهای مؤثر مطرح شده می توان به ابزاری مطلوب، با چگالی جریان های وابسته به اسپین و عامل فانو و نوفه شلیکی دست یافت.

درهم تنیدگی به شدت کاهش می یابد. با افزایش عرض سد پتانسیل رسانندگی الکتریکی و جریان الکتریکی به مقدار پیش بینی شده (۱/۴ و ۳/۴) برای حالت تک تایی و سه تایی نزدیک تر می شوند. میزان همبستگی الکترون ها که با عامل فانو معرفی گردید با افزایش انرژی کاهش می یابد و دارای رفتاری عکس رسانندگی می باشد، زیرا هرچه همبستگی الکترون ها بیشتر باشد امکان عبور الکترون و رسانندگی کاهش می یابد. نوفه نیز با افزایش عرض سد پتانسیل نوسان بیشتری خواهد داشت. در یک ارتفاع سد ثابت با توجه به روابط و پارامترهای این مقاله ارتفاع سد حالت تک تایی نسبت به حالت سه تایی کمتر می باشد، از طرف دیگر افزایش ارتفاع سد پتانسیل موجب می شود که تأثیر

7. W K Wootters, *Phys. Rev. Lett.* **80** (1998) 2245.
8. R Landauer, *IBM J. Res. Dev.* **32** (1988) 306.
9. J H Jefferson, A Ramšak, and T Rejec, *J. Phys.: Condens. Matt.* **20** (2008) 164206.
10. P F Bagwell and T P Orlando, *Phys. Rev. B* **40** (1989) 1456.
11. Ya M Blanter and M Büttiker, *Physics Reports* **336** (2000) 1.
12. A Ramšak and J H Jefferson, *Phys. Rev. B* **71** (2005) 161311.

1. T Rejec, A Ramsak, and J H Jefferson, *Phys. Rev. B* **67** (2003) 075311.
2. I A Shelykh, N G Galkin, and N T Bagraev, *Phys. Rev. B* **74** (2006) 085322.
3. M Rosenau da Costa, I A Shelykh, and N T Bagraev, *Phys. Rev. B* **76** (2007) 201302R.
4. H Xu, *Phys. Rev. B* **47** (1993) 9537.
5. T Rejec, A Ramšak, and J H Jefferson, *J. Phys. Matter* **12** (2000) L233.
6. C H Bennett, D P DiVincenzo, J A Smolin, and W K Wootters, *Phys. Rev. A* **54** (1996) 38.