Archive of SID

مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۶، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۵

اثر نقاط جانبی بر هدایت میان ترکیبات چهار نقطهٔ کوانتومی: مطالعه با روش تابع گرین غیرتعادلی

زهرا داریزین، میثم باقری و حمید رحیم‌پور سلیمانی

گروه فیزیک، دانشکدهٔ علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت

(دریافت مقاله:۱۳۹۴/۳/۱۹ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی:۱۳۹۴/۹/۹)

چکیده

انتقال الکترونی در ترکیبات چهار نقطهٔ کوانتومی جفت شده به الکترودهای فلزی با استفاده از روش تابع گرین غیرتعادلی بررسی و نمودارهای $I-V$ و هدایت $(\mathrm{dI/dV})$ برای ترکیباتی خاص، تحلیل می‌شود. نشان می‌دهیم که ظهور هدایت دیفرانسیل منفی، به علت توزیع نامتقارن نقاط در ناحیهٔ مرکزی و جفت نبودن برخی از نقاط به الکترودها (نقاط کوانتومی جانبی) و ایجاد اثر تداخل می‌باشد. در می‌یابیم که وجود نقاط کوانتومی جانبی بیشتر، هدایت دیفرانسیل منفی بیشتری را موجب می‌شود.

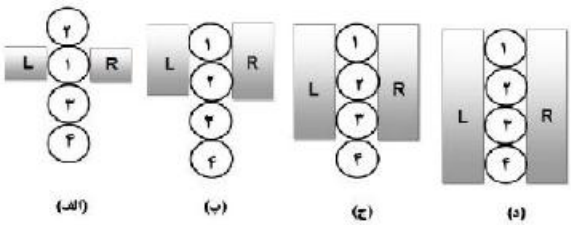
واژه‌های کلیدی: نقاط کوانتومی، انتقال، تابع گرین غیرتعادلی، هدایت منفی

۱. مقدمه

انتقال الکترونی میان دستگاه‌های نقطهٔ کوانتومی جفت شده، در طول دههٔ گذشته، عنوان مهمی برای تحقیقات نظری و تجربی بوده است [۱-۴]. ازجملهٔ پدیده‌های کشف شده، پله‌ای بودن تغییرات جریان_ ولتاژ $(I\text{-}V)$ [۵]، نوسان سد کلونی [۶]، هدایت دیفرانسیل منفی [۷]، است. هدایت دیفرانسیل منفی در ترکیبات نقطهٔ کوانتومی چندگانه، در جفت شدگی‌های متفاوت به هادی‌ها، می‌تواند اتفاق بیافتد [۸-۱۱]. از کاربردهای آن در تقویت‌کننده و نوسانگر در میکروموج، میلی‌موج و محدوده‌های بسامد تراهرتز می‌باشد [۱۲]. ما در این مقاله با بررسی انتقال الکترونی و هدایت از میان ترکیبات چهار نقطهٔ کوانتومی جفت‌شده به الکترودهای فلزی در حالت‌های اتصال متقارن و نامتقارن با استفاده از روش تابع گرین غیرتعادلی، به ظهور هدایت دیفرانسل منفی دست می‌یابیم. در ابتدا روش کار،

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱. چهار حالت از ترکیبات چهار نقطهٔ کوانتومی جفت شده به الکترودهای فلزی در دمای صفر.

توضیح و روابط مورد نیاز را معرفی و سپس در چهار حالت از ترکیب چهار نقطهٔ کوانتومی به بررسی اثرات نقطه‌های کوانتومی جانبی پرداخته و نمودارها، تحلیل‌ها ونتایج به دست آمده را بیان می‌کنیم. در انتها نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲. طرح و روش کار

طرح مورد بررسی شامل دو الکترود (الکترود راست (R) و الکترود چپ (L) و ناحیهٔ مرکزی (C)) است. ناحیهٔ مرکزی شامل ترکیبات مختلف نقاط کوانتومی است که به الکترودها جفت شده‌اند. هامیلتونی کل به این شکل نوشته می‌شود:

$$H = H_{L,R} + H_C + H_T$$

$$H_{L,R} = \sum_{k,\alpha\in(L,R),\delta} \varepsilon_{k,\alpha} c^{\dagger}_{k,\alpha,\delta} c_{k,\alpha,\delta},$$

$$H_C = \sum_{j=1,\delta}^{N} \varepsilon_j d^{\dagger}_{j,\delta} d_{j,\delta} + \sum_{i,j,\delta} (t_{i,j} d^{\dagger}_{i,\delta} d_{j,\delta} + \text{H.c}), \qquad (1)$$

$$H_T = \sum_{k,\alpha\in(L,R),\delta} (V_{k,\alpha,\delta}\, c^{\dagger}_{k,\alpha,\delta}\, d_{j,\delta} + \text{H.c})$$

که در آن $c^{\dagger}_{k,\alpha,\delta}$ ، $d^{\dagger}_{j,\delta}$ عملگرهای خلق الکترون (نابودی الکترون) به ترتیب در الکترودها و ناحیهٔ مرکزی هستند. N تعداد کل نقاط کوانتومی درون ناحیهٔ مرکزی می‌باشد. $\alpha \in L,R$ مشخصهٔ الکترود چپ و الکترود راست است. ε_j ، $\varepsilon_{k,\alpha}$ بیانگر طیف‌های پیوستهٔ انرژی در الکترودها و سطوح گسستهٔ انرژی در jامین نقطهٔ کوانتومی است. $t_{i,j}$ ضریب جفت شدگی بین iامین و jامین نقطهٔ کوانتومی و $V_{k,\alpha,j}$ قدرت تونل زنی بین jامین نقطهٔ کوانتومی و الکترودها می‌باشد. شاخص اسپین σ در سطوح انرژی و ضرایب جفت‌شدگی به علت درگیر نبودن میدان مغناطیسی حذف شده است. فرض شده است که هر نقطهٔ کوانتومی یک تراز انرژی دارد. از برهم‌کنش‌های الکترون- الکترون صرف نظر شده است.

جریان در حالت پایا در یک کانال اسپینی از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$I_\sigma = \frac{e}{h}\int_{-\infty}^{+\infty} d(E_L - E_R) f) \quad T(\sigma)$$

روابط ضریب عبور و هدایت به این صورت نوشته می‌شود:

$$T_\delta(E) = \text{Tr}\left[\Gamma^L_\delta G_\delta \Gamma^R_\delta G_\delta\right]$$

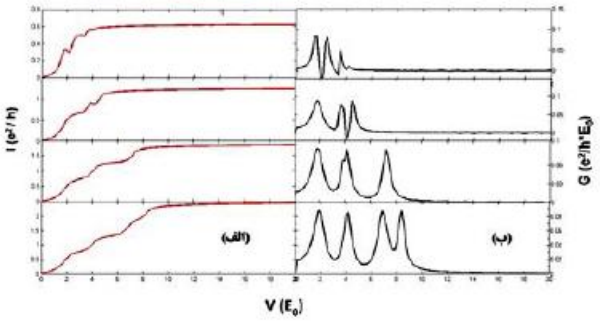
$$G = dI/dV.$$

$f_{L,R} = \left(\exp\left[(E-\mu L,R)/k_BT\right]+1\right)^{-1}$، بیانگر تابع فرمی در دو الکترود راست و چپ است، که $\mu_{L,R}$ پتانسیل‌های شیمیایی در هر الکترود هستند. Γ^L و Γ^R ماتریس‌های قدرت جفت شدگی بین الکترود و ناحیهٔ مرکزی در دو طرف چپ و راست‌اند، که می‌توانند همانند یک ماتریس ثابت عمل کنند و در محاسبات مقدار ورودی برای آن‌ها در نظر گرفته شود. G^r و G^a توابع گرین تأخیری و پیشرفته‌اند: $G^r = \left(G^a\right)^{\dagger}$ با استفاده از نظریهٔ تابع گرین غیرتعادلی و اعمال روش معادلهٔ حرکت و تبدیل فوریه، این توابع گرین به شکل ماتریسی $G^r_\sigma(E) = [E - H - \sum^r_\sigma \quad (E^1)$ نوشته می‌شود [۱۳].

محاسبات را در دمای صفر انجام می‌دهیم. می‌توانیم واحد انرژی E را طوری تنظیم کنیم که بالاترین سطوح انرژی در نقاط کوانتومی باشد. پتانسیل‌های شیمیایی در دو الکترود $\mu_L = V$ ، $\mu_R = 0$ تنظیم شده است. مسیر حرکت الکترون‌ها از الکترود چپ به راست است. اعمال ولتاژ به صورت یکنواخت انجام شده است. برای بررسی اثرات نقطه‌های کوانتومی جانبی بر دستگاه، در چهار مرحله با در نظرگرفتن ترکیبات چهار نقطهٔ کوانتومی که به الکترودهای فلزی متصل شده‌اند، در نظر گرفته شده است (شکل ۱). در هر یک از حالات در نظر گرفته شده، نمودار جریان برحسب ولتاژ و نمودار هدایت برحسب ولتاژ رسم می‌شود. بررسی اثرات نقطه‌های کوانتومی جانبی در انتقال الکترونی و توزیع هدایت در هر حالت به شکل مجزا بررسی شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲. (الف) نمودار جریان برحسب ولتاژ در چهار حالت از ترکیب چهار نقطهٔ کوانتومی. (ب) نمودار هدایت برحسب ولتاژ در چهارحالت از ترکیب چهار نقطهٔ کوانتومی جفت شده به الکترودهای فلزی.

۳. بحث و نتایج

در ترکیبات مورد بررسی، ماتریس‌های جفت شدگی و H_C به صورت ماتریس‌های ۴ در ۴ نوشته می‌شود.

$$\Gamma_{L(R)} = \begin{bmatrix} \Gamma_{L(R)11} & \Gamma_{L(R)12} & \Gamma_{L(R)13} & \Gamma_{L(R)14} \\ \Gamma_{L(R)21} & \Gamma_{L(R)2} & \Gamma_{L(R)23} & \Gamma_{L(R)24} \\ \Gamma_{L(R)31} & \Gamma_{L(R)32} & \Gamma_{L(R)3} & \Gamma_{L(R)34} \\ \Gamma_{L(R)41} & \Gamma_{L(R)42} & \Gamma_{L(R)43} & \Gamma_{L(R)4} \end{bmatrix},$$

$$H_C = \begin{bmatrix} E_1 & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & E_2 & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & E_3 & t_{34} \\ t_{41} & t_{42} & t_{43} & E_4 \end{bmatrix}$$

$\Gamma_{L(R)}{}^{ii} = \Gamma_{L(R)}{}^{i=0/1} \;\; i=j \;\; \Gamma_{L(R)}{}^{ij=0/1} \;\; i \neq j$.

ضرایب t_{ij} با توجه به نحوهٔ اتصال نقاط کوانتومی به یکدیگر مقدار می‌گیرند. اگر نقاط به یکدیگر متصل باشند مقدار ۰/۳ – و در غیر این صورت برابر صفر است.

در اولین مرحله، چهار نقطهٔ کوانتومی در ناحیهٔ مرکزی به گونه‌ای به یکدیگر جفت شده‌اند که تنها یک نقطه به دو الکترود چپ و راست متصل شده‌اند شکل ۱ (۱). در این حالت، سطوح تراز انرژی نقاط به صورت زیر تنظیم می شوند.

$E_1 = 1+V/2$ $E_2 = 2$ $E_3 = 3/5$ $E_4 = 4$ به علت اتصال تنها یک نقطهٔ کوانتومی در ناحیهٔ مرکزی به دو الکترود راست و چپ و ایجاد تنها یک تراز مؤثر، روند افزایشی جریان برحسب ولتاژ به صورت تک‌پله‌ای است (شکل ۲ (الف)). هنگامی که الکترون وارد نقطهٔ کوانتومی ۱ می‌شود، سه مسیر برای ادامهٔ حرکت ایجاد می‌شود (پدیدهٔ تداخل): ۱- ورود به الکترود راست ۲- ورود به نقطهٔ کوانتومی دوم ۳- ورود به نقطهٔ کوانتومی سوم. وقتی با تغییر ولتاژ، سطح پتانسیل شیمیایی الکترود چپ برابر با سطح تراز انرژی نقطهٔ کوانتومی دوم شود ($\mu L = V = E_2 = 2$)، یعنی در $V = 2$، الکترون مسیر ورود به نقطهٔ دوم را انتخاب کرده، ولی به علت متصل نبودن نقطهٔ دوم به هیچ الکترود و نقطه‌ای، الکترون در این نقطه به دام می‌افتد و اثر ضد تشدید رخ می‌دهد، که موجب افت لحظه‌ای جریان و ایجاد دره در نمودار I-V می‌شود. هنگامی که سطح پتانسیل شیمیایی الکترود چپ برابر با سطح تراز انرژی نقطهٔ کوانتومی سوم شود ($\mu L = V = E_3 = 3/5$)، الکترون مسیر ورود به نقطهٔ سوم را انتخاب کرده و اثر ضد تشدید و درهٔ دوم رخ می‌دهد. وقوع هر پله در نمودار I-V موجب یک قله در نمودار هدایت می‌شود. در محدودهٔ ولتاژی که جریان مقدار ثابتی است و به حالت اشباع رسیده، هدایت صفر می‌باشد. نابرابر بودن توزیع قله‌ها و دره‌ها در نمودار هدایت به علت توزیع نامتقارن نقاط کوانتومی در اتصال به الکترودها و در واقع حضور سه نقطهٔ کوانتومی جانبی در ناحیهٔ مرکزی است.

حال در مرحلهٔ دوم، نقاط به گونه‌ای به یکدیگر جفت شده‌اند که از چهار نقطهٔ کوانتومی در ناحیهٔ مرکزی، دو نقطه به الکترودهای راست و چپ متصل شده‌اند (شکل ۱ (۲)). در این صورت خواهیم داشت:

$E_1 = 1+V/2$, $E_2 = 2+V/2$, $E_3 = 3.5$, $E_4 = 4$

در این حالت به علت ایجاد دو تراز مؤثر، نمودار I-V از حالت تک‌پله‌ای به دوپله‌ای تبدیل می‌شود (شکل ۲ (الف) (۲)). هنگامی که الکترون وارد نقطهٔ کوانتومی دوم می‌شود، سه مسیر برای ادامهٔ حرکت پیش می‌آید. وقتی سطح پتانسیل شیمیایی الکترود چپ برابر با سطح تراز انرژی نقطهٔ کوانتومی سوم شود ($\mu L = V = E_3 = 3/5$)، الکترون وارد این نقطه می‌شود. یعنی در ولتاژ ۳/۵ اثر ضد تشدید و در نتیجه دره در نمودار دو پله‌ای جریان ایجاد می‌شود. درحالت اول و دوم در ولتاژهایی که جریان افت می‌کند، مشتق آن نسبت به ولتاژ منفی و درنتیجه اثر هدایت دیفرانسل منفی رخ می‌دهد.

در مرحلهٔ سوم، از چهار نقطهٔ کوانتومی متصل به هم در

www.SID.ir

Archive of SID

ناحیهٔ مرکزی، سه نقطهٔ کوانتومی به الکترودهای چپ و راست جفت شده شکل ۱ (۳) و در حالت چهارم، هر چهار نقطه به الکترودها متصل‌اند (۱–۴).در این صورت:

حالت (۳)

$$E_1 = 1+V/2,\ E_2 = 2+V/2,\ E_3 = 3/5+V/2,\ E_4 = 4$$

حالت (۴)

$$E_1 = 1+V/2,\ E_2 = 2+V/2,$$
$$E_3 = 3/5+V/2\ ,\ E_4 = 4+V/2.$$

در حالت (۳) و (۴) نمودار I-V، سه‌پله‌ای و چهارپله‌ای می‌شود. متصل نبودن نقطهٔ کوانتومی چهارم به الکترودها و درنتیجه تبدیل شدن آن به نقطهٔ کوانتومی جانبی، موجب گیر افتادن الکترون در این نقطه و ایجاد اثر ضد تشدید هنگامی که $L = V = E_4 = 4$) μ) است، می‌شود. این امر موجب افت جریان و ایجاد درهٔ کوچک در نمودار I-V و یک درهٔ کوچک قبل از قلهٔ اصلی دوم در نمودار G-V و باعث ناهمگونی کوچکی در توزیع هدایت می‌شود (شکل ۲ (الف) و (ب) (۳)).

در حالت چهارم، به علت توزیع متقارن هر چهار نقطهٔ کوانتومی، قله‌های هدایت برابرند و هیچ ناهمگونی در روند تغییرات هدایت ایجاد نمی‌شود (شکل ۲ (الف) و (ب) (۴)).

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله با بررسی انتقال الکترونی از میان ترکیبات چهار نقطهٔ کوانتومی با روش تابع گرین غیرتعادلی، تغییرات جریان با افزایش ولتاژ و توزیع هدایت (dI/dV) تحلیل شده است. با بررسی هدایت در حالت‌های در نظر گرفته شده، می‌توان به این نتیجه رسید که عدم تقارن در توزیع نقاط کوانتومی و وجود نقاط جانبی در ناحیهٔ مرکزی موجب ظهور هدایت دیفرانسیل منفی و همچنین بیشتر شدن عدم تقارن و نقاط جانبی، دلیلی بر بیشتر شدن هدایت دیفرانسل منفی می‌باشد. تقارن در اتصال نقاط کوانتومی و عدم وجود نقاط جانبی درناحیهٔ مرکزی، تقارن در توزیع هدایت را به دنبال دارد.

مراجع

1. E Taranko, M Wiertel, and R Taranko, *J. Appl. Phys.* **111** (2012) 023711.
2. Z L He, D Zhang, P Li, J Y Bai, and Y F Bai, *Indian J. Phys.* **88** (2014) 6.
3. B B Brogi, S Chand and P K Ahluwalia, *Physica* B: *Condensed Matter* **461** (2015) 110.
4. H Rabani, M Mardani, and M Talebi, *Iranian Journal of Physics Research*, **15**, 1 (2015) 89.

۴. ح ربانی، م مردانی و م طالبی، مجله پژوهش فیزیک ایران، ۱۵، ۱ (۱۳۹۴) ۸۹.

5. J B Barner and S T Ruggiero, *Phys. Rev. Lett.* **59** (1987) 807.
6. M A. Reed, J N. Randall, R J Aggarwal, R J Matyi, T M Moore, and A Wetsel, *Phys. Rev. Lett.* **60** (1988) 535.
7. Y Q Feng, R Q Zhang, K S Chan, H F Cheung, and S T Lee, *Phys. Rev.* B **66** (2002) 045404.
8. C Shyam, R K Moudgil, and P K Ahluwalia, *Physica* B: *Condensed Matter* **405** (2010) 239.
9. D Weinmann, W H ausler, and B Kramer, *Phys. Rev. Lett.* **74** (1995) 984.
10. M Ciorga, M Pioro-Ladriere, P Zawadzki, P Hawrylak and A S Sachrajda, *Appl. Phys. Lett.* **80** (2002) 2177.
11. A Thielmann, M H Hettler, J K onig, and G Sch on, *Phys. Rev.* B **71** (2005) 045341.
12. M C Rogge, F Cavaliere, M Sassetti, R J Haug, and B Kramer, *New J. Phys.* **8** (2006) 298.
13. T C L G Sollner, P E Tannenwald, D D Peck, and W D Goodhue, *Appl. Phys. Lett.* **45** (1984) 1319.
14. Z Z Sun, R Q Zhang, W Fan, and X R Wang, *J. Appl. Phys.* **105** (2009) 043706.

www.SID.ir