

## رسانش وابسته به اسپین یک زنجیره با ممان‌های مغناطیسی متناوب متصل به دو هادی فرو مغناطیس

مردانی، محمد<sup>۱،۲</sup>؛ ربانی، حسن<sup>۱</sup>؛ بهارلو، زهرا<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

<sup>۲</sup>مرکز پژوهشی فناوری نانو، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

### چکیده

در این مقاله به بررسی رسانش وابسته به اسپین یک زنجیره‌ی با ممان‌های مغناطیسی متناوب متصل به دو هادی فرو مغناطیس توسط روش تابع گرین در رهیافت بستگی قوی می‌پردازیم. نتایج نشان می‌دهد که در ساختار شامل اتم‌های مغناطیسی و غیر مغناطیسی در یک‌ایاخته، افزایش ممان مغناطیسی اتم‌ها و همچنین تغییر جهت این ممان‌ها در خلاف جهت ممان مغناطیسی اتم‌های هادی‌ها، رسانش را کاهش می‌دهد. رسانش این ساختار از رسانش زنجیره‌ی فرومغناطیس کمتر و از رسانش زنجیره فری مغناطیس بیشتر است.

## Spin-dependent Conductance of a Chain with Alternative Magnetic Moments Connected to two Ferromagnetic Leads

Mardaani, Mohammad<sup>1,2</sup>; Rabani, Hassan<sup>1</sup>; Baharloo, Zahra<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Faculty of Science, Shahrekord University, P. O. Box 115, Shahrekord, Iran

<sup>2</sup>Nanotechnology Research Center, Shahrekord University, 8818634141, Shahrekord, Iran

### Abstract

*In this paper, we study the spin-dependent conductance of a chain with alternative magnetic moments embedded between two ferromagnetic leads by using Green's function method at the tight-binding approach. The results show that, for a structure including magnetic and nonmagnetic atom in the unit-cell, the increasing of magnetic moment of atoms as well as flipping of the magnetic moment of atoms in the opposite direction of the magnetic moment of the lead atoms causes the decreasing of the system conductance. The conductance of this structure is lower than the ferromagnetic and is more than the ferrimagnetic chain conductance.*

PACS No. 72

در سامانه‌های با بعد پایین شده‌است [۷-۲]. به عنوان مثال با بررسی ترابرد وابسته به اسپین در یک ساختار مغناطیسی، یک فیلتر اسپینی در مقیاس نانو معرفی شده است [۳]. در این مقاله به بررسی رسانش وابسته به اسپین در یک زنجیره‌ی مغناطیسی متناوب متصل به هادی‌های فرومغناطیس می‌پردازیم. سپس به محاسبه‌ی رسانش وابسته به اسپین دو زنجیره‌ی فرو و فری مغناطیس متصل به هادی‌های فرومغناطیس پرداخته و آن‌ها را مورد مقایسه قرار می‌دهیم.

### مقدمه

ترابرد کوانتومی در سامانه‌های با بعد پایین در زمینه‌ی دانش و فن-آوری نانو، یکی از موضوعات قابل توجه در دهه‌های اخیر بوده است. از طرفی بهره‌گیری از درجه‌ی آزادی اسپین در ترکیب کردن حافظه و منطق در یک قطعه، ما را به سمت توسعه‌ی چشمگیری در زمینه‌ی ذخیره‌سازی مغناطیسی داده‌ها، شیوه‌ی پردازش قطعه و محاسبات کوانتومی هدایت می‌کند [۱]. از این‌رو از نقطه نظر تجربی و نظری توجه زیادی به مطالعه روی ترابرد وابسته به اسپین

## فرمول بندی

جایگاهی و پرش در هادی‌ها چپ و راست هستند و  $h_L$  پارامتر تعویض اسپینی در نیم سیم‌ها است. همچنین هامیلتونی اتصال سامانه به هادی چپ (راست) به صورت زیر بیان می‌شود [۹]

$$H_{L(R)W} = \hat{\beta}_{LW} c_{o(n+1)}^\dagger c_{1(n)} + h.c., \quad (5)$$

که در آن  $\hat{\beta}_{LW}$  ماتریس مربوط به پرش اتصال بین سیم مرکزی و هر هادی است. تابع گرین سامانه‌ی مرکزی متصل به دو هادی به شکل زیر نوشته می‌شود [۱۰]

$$G = [\mathcal{E}I - H_W - \hat{\Sigma}_L - \hat{\Sigma}_R]^{-1}, \quad (6)$$

که در آن  $I$  ماتریس یکه و  $\hat{\Sigma}_{L(R)}$  خودانرژی سامانه‌ی مرکزی به علت وجود هادی مغناطیسی چپ (راست) است و به شکل زیر بیان می‌شود

$$\hat{\Sigma}_{L(R)} = \begin{pmatrix} \Sigma_{L(R)}^\uparrow & 0 \\ 0 & \Sigma_{L(R)}^\downarrow \end{pmatrix}, \quad (7)$$

که در آن  $\Sigma_{L(R)}^{\uparrow(\downarrow)} = \beta_{LW}^2 \exp(i\theta_L^{\uparrow(\downarrow)}) / \beta_L$  برای هادی‌های فرومغناطیسی در تقریب نزدیکترین همسایه و در رهیافت بستگی قوی داریم:  $\cos \theta_L^{\uparrow(\downarrow)} = (\mathcal{E} - \mathcal{E}_{0L} + (-)h_L) / (2\beta_L)$ . با توجه به اینکه میدان مغناطیسی با اسپین الکترون عبوری برهمکنش می‌کند، ضریب عبور الکترونی در تقریب نزدیکترین همسایه از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$T_{ss'}(\mathcal{E}) = 4 \text{Im} \sum_L \text{Im} \sum_R' |G_{i,j}|^2, \quad (8)$$

که در آن  $G_{i,j}$  درایه‌ی سطر  $i$ ام و ستون  $j$ ام ماتریس تابع گرین است و  $s'$  و  $s$  به ترتیب بیانگر اسپین الکترون وارد و خارج شده از سامانه‌ی مرکزی هستند. بنابراین برای حالتی که تعداد اتم‌های سامانه‌ی مرکزی برابر  $n$  است، چهار نوع رسانش الکترونی  $T_{\uparrow\uparrow}$ ،  $T_{\uparrow\downarrow}$ ،  $T_{\downarrow\uparrow}$  و  $T_{\downarrow\downarrow}$  وجود دارد که به ترتیب توسط چهار عنصر  $G_{2,2n}$  و  $G_{2,2n-1}$ ،  $G_{1,2n}$ ،  $G_{1,2n-1}$  مشخص می‌شوند.

## محاسبه‌ی رسانش

در شکل ۲، نمودار ضریب عبور این سامانه برای مقادیر متفاوت پارامتر تعویض اسپینی اتم‌های مغناطیسی سامانه رسم شده است. ضریب عبور حالت‌های  $T_{\uparrow\downarrow}$  و  $T_{\downarrow\uparrow}$  در این سامانه صفر و

سامانه‌ای متصل به دو هادی فرومغناطیس و متشکل از یک زنجیره شامل اتم‌های مغناطیسی و غیرمغناطیسی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. طرح‌واره‌ی چنین سامانه‌هایی در شکل ۱ نشان داده شده است. هامیلتونی این سامانه به صورت زیر توصیف می‌شود

$$H = H_L + H_{LW} + H_W + H_{RW} + H_R, \quad (1)$$

که در آن  $H_L$ ،  $H_{LW}$ ،  $H_W$ ،  $H_{RW}$  و  $H_R$  به ترتیب هامیلتونی نیم سیم چپ، اتصال نانوسیم به نیم سیم چپ، نانوسیم، اتصال نانوسیم به نیم سیم راست و نیم سیم راست هستند. در این مقاله فرض می‌کنیم که مغناطش تمام اتم‌ها در راستای محور  $z$  باشد. بنابراین هامیلتونی نانو سیم مرکزی در رهیافت بستگی قوی به صورت زیر نوشته می‌شود [۸]

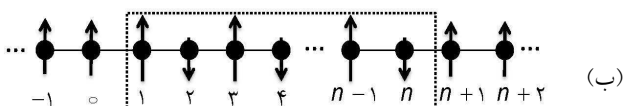
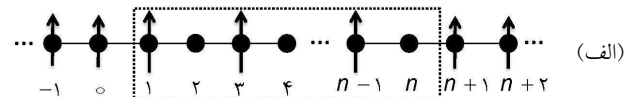
$$H_W = \sum_i^n (\hat{\mathcal{E}}_i - h_{W,i} \sigma_z) \hat{c}_i^\dagger \hat{c}_i + \hat{\beta}_W \sum_i (\hat{c}_{i+1}^\dagger \hat{c}_i + h.c.), \quad (2)$$

که در آن

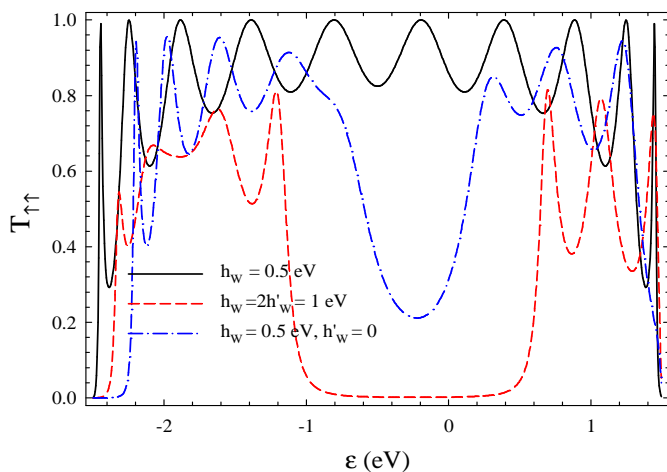
$$\hat{\mathcal{E}}_i = \begin{pmatrix} \mathcal{E}_i & 0 \\ 0 & \mathcal{E}_i \end{pmatrix}; \quad \hat{\beta}_W = \begin{pmatrix} \beta & 0 \\ 0 & \beta \end{pmatrix}; \quad \hat{c}_i^\dagger = (c_{i\uparrow}^\dagger, c_{i\downarrow}^\dagger), \quad (3)$$

همچنین  $c_i$  و  $c_i^\dagger$  عملگرهای خلق و فنا  $i$ امین اتم نانو سیم، انرژی جایگاهی اتم  $i$ ام و  $\beta$  انرژی پرش بین اتم‌های مجاور هستند. همچنین  $n$  تعداد اتم‌های سامانه‌ی مرکزی و  $h_{W,i} \sigma_z$  عملگر برهمکنش الکترون با اتم مغناطیسی است که  $h_{W,i}$  پارامتر تعویض اسپینی متناسب با مغناطش اتم  $i$ ام و  $\sigma_z$  نشانگر ماتریس پاولی هستند. هامیلتونی نیم سیم چپ (راست) نیز چنین است

$$H_L = H_R = \sum_i (\hat{\mathcal{E}}_{0L} - h_L \sigma_z) \hat{c}_i^\dagger \hat{c}_i + \hat{\beta}_L \sum_i (\hat{c}_{i+1}^\dagger \hat{c}_i + h.c.) \quad (4)$$



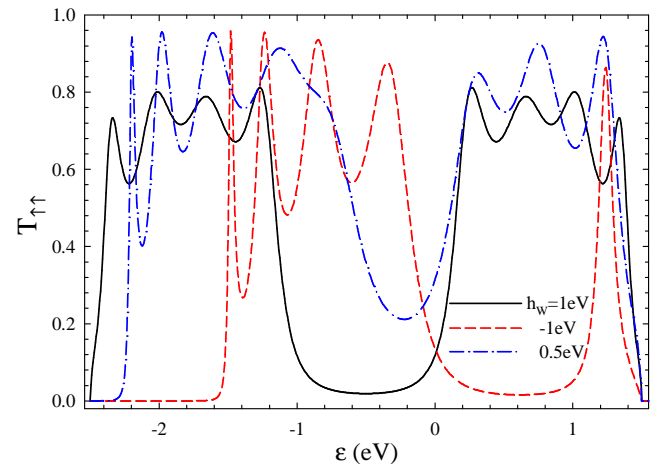
شکل ۱: طرح‌واره‌ی یک زنجیره‌ی متناوب مغناطیسی متصل به دو هادی فرومغناطیس. سامانه‌ی مرکزی در (الف) زنجیره‌ی شامل اتم‌های مغناطیسی و غیرمغناطیسی و (ب) مورد خاصی از فری مغناطیس است.



شکل ۳: نمودار ضریب عبور حالت  $T_{\uparrow\uparrow}$  بر حسب انرژی برای زنجیره فرومغناطیس (خط توپر)، زنجیره متناوب مغناطیسی (نقطه-خط چین) به ازای  $n = 10$  و زنجیره فری مغناطیس (خط چین). در اینجا برای هر سه ساختار  $n = 10$  و  $\beta_{L(R)} = \beta_W = 1.25 \beta_{L(R)W} = 2h_{L(R)} = 1\text{eV}$  انتخاب شده‌اند.

و فری مغناطیس (شکل اب) هر کدام شامل ۱۰ اتم و متصل به هادی‌های فرومغناطیس می‌پردازیم. در شکل ۳، نمودار ضریب عبور حالت  $T_{\uparrow\uparrow}$  برای این ساختارها رسم شده است. برای رسم این نمودار همه‌ی انرژی‌های جایگاهی را برابر صفر، انرژی پرش بین اتم‌ها را در هادی‌ها و سامانه‌ی مرکزی برابر  $1\text{eV}$ ، اندازه‌ی پارامتر تعویض اسپینی اتم‌های هادی‌ها، ساختار فرومغناطیس و اتم‌های مغناطیسی ساختار متناوب مورد بررسی را برابر  $0.5\text{eV}$  و  $\beta_{L(R)W} = 0.8\text{eV}$  در نظر می‌گیریم. همچنین در زنجیره فری مغناطیس پارامتر تعویض اسپینی برای اتم‌های با جهت گشتاور مغناطیسی بالا برابر  $h_w = 1\text{eV}$  و برای اتم‌های با جهت گشتاور مغناطیسی پایین برابر  $h'_w = 0.5\text{eV}$  فرض می‌شود. اندازه‌ی پارامترها تا حد امکان برای هر سه ساختار یکسان انتخاب شده است. لازم به ذکر است که در هر سه ساختار ضریب عبور حالت-های  $T_{\uparrow\downarrow}$  و  $T_{\downarrow\uparrow}$  صفر و نمودار ضریب عبور حالت  $T_{\downarrow\downarrow}$  تصویر آینه‌ای نمودار  $T_{\uparrow\uparrow}$  نسبت به انرژی صفر است.

طبق نمودار شکل ۳، رسانش این ساختار متناوب نسبت به رسانش زنجیره فرومغناطیس کمتر است. همچنین اندازه‌ی گاف انرژی این سامانه از اندازه‌ی گاف ساختار فری مغناطیس کمتر بوده و همچنین تونل‌زنی الکترون در گاف آن بهتر صورت می‌پذیرد. به



شکل ۴: نمودار ضریب عبور بر حسب انرژی برای مقادیر مختلف پارامتر تعویض اسپینی اتم‌های سامانه‌ی مرکزی ( $h_w$ ). در اینجا  $n = 10$  و  $\beta_{L(R)} = \beta_W = 1.25 \beta_{L(R)W} = 2h_{L(R)} = 1\text{eV}$  انتخاب شده‌اند.

نمودار ضریب عبور حالت  $T_{\downarrow\downarrow}$  تصویر آینه‌ای نمودار  $T_{\uparrow\uparrow}$  نسبت به انرژی صفر است. برای رسم این نمودار همه‌ی انرژی‌های جایگاهی را برابر صفر، انرژی پرش بین اتم‌ها را در هادی‌ها و سامانه‌ی مرکزی برابر  $1\text{eV}$ ، اندازه‌ی پارامتر تعویض اسپینی اتم‌های هادی‌ها و اتم‌های مغناطیسی زنجیره را برابر  $0.5\text{eV}$  و انرژی پرش اتصال بین هادی‌ها و سامانه‌ی مرکزی را برابر  $\beta_{L(R)W} = 0.8\text{eV}$  در نظر می‌گیریم. همان‌طور که در شکل ۲، مشاهده می‌شود نمودار دارای دو گاف یکی در میان و دیگری در ابتدای بازه‌ی مجاز انرژی الکترون است که در این ناحیه‌ها رسانش به صورت تونل‌زنی انجام می‌شود. با افزایش میدان مغناطیسی اتم‌ها، رسانش در ناحیه‌ی تشدید کاهش پیدا کرده که این موضوع به علت افزایش پراکندگی اسپینی رخ می‌دهد. همچنین با افزایش میدان مغناطیسی اتم‌ها، مقدار گاف میانی افزایش و مقدار گاف واقع در ابتدای بازه کاهش پیدا کرده است. با وارون کردن جهت گشتاور مغناطیسی اتم‌های مغناطیسی سامانه، اندازه‌ی گاف میانی ثابت می‌ماند در حالیکه مقدار گاف واقع در ابتدای بازه افزایش می‌یابد. به طور کلی در این ساختار با افزایش میدان مغناطیسی و همچنین با تغییر جهت گشتاور مغناطیسی اتم‌ها در خلاف جهت گشتاور مغناطیسی اتم‌های هادی‌ها رسانش کاهش می‌یابد.

در ادامه به مقایسه‌ی رسانش این سامانه و دو سامانه‌ی مغناطیسی مورد بررسی دیگر یعنی زنجیره‌های فرومغناطیس

طور کلی می‌توان گفت رسانش الکترونی در این ساختار نسبت به ساختار فرومغناطیس کمتر و نسبت به ساختار فری مغناطیس بیشتر است.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی رسانش وابسته به اسپین یک ساختار مغناطیسی متناوب و مقایسه‌ی آن با دو ساختار دیگر پرداخته شده است. برای انجام محاسبات از روش تابع گرین در رهیافت بستگی قوی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد در ساختار متناوب مورد بررسی با افزایش میدان مغناطیسی اتم‌ها و جهت‌گیری گشتاور مغناطیسی اتم‌های سامانه در خلاف جهت اتم‌های هادی‌ها رسانش سامانه کاهش پیدا می‌کند. با مقایسه‌ی رسانش این سامانه با رسانش زنجیره‌های فرو و فری مغناطیس مشاهده می‌شود که رسانش این سامانه از رسانش زنجیره‌ی فرومغناطیس کمتر و از رسانش زنجیره‌ی فری مغناطیس بیشتر است.

## مراجع

- [1] M. Dey, S. K. Maiti, and S. N. Karmakar. *arXiv:1203.1249v3*, (2012).
- [2] M. Dey, S. K. Maiti, and S. N. Karmakar, *J App. Phys.* **109**,2 (2011) 024304.
- [3] M. Dey, S. K. Maiti and S. N. Karmakar, *Phys. Lett. A* **374** (2010) 1522.
- [4] A. Sommer, M. Ku, G. Roati, and M. W. Zwierlein, *Nature*, **472** (2011) 201.
- [5] B. Zhou, X. Chen, B. Zhou, K. H. Ding and G. Zhou, *Journal of Physics: Condensed Matter*, **23** (2011) 135304.
- [6] S. Y. Huang, W. G. Wang, S. F. Lee, J. Kwo, C. L. Chien, *Phys. Rev. Lett.*, **107** (2011) 216604.
- [7] م. مردانی، ح. ربانی و ص. سلیمانی، مجله پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۲، شماره ۲، ۱۰۳ (۱۳۹۱).
- [8] A. A. Shokri and M. Mardaani, *Solid State Commun.* **137**, (2006) 53.
- [9] M. Mardaani, K. Esfarjani, *Chem. Phys.*, **317**, (2005) 43.
- [10] S. Datta, " *Electronic Transport in Mesoscopic Systems*" ;Cambridge University Press, Cambridge, (1997).