

بررسی ترابرد قطبیده اسپینی در یک نانو کریستال: تاثیرات میدان های الکتریکی و مغناطیسی

فاطمه آئینه وند*

گروه فیزیک، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

امیرحسین کردبچه

گروه فیزیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۸۸/۱۲/۱۲

تاریخ دریافت: ۸۷/۶/۲۱

چکیده

مقدمه: در سال های اخیر، تحقیقات تجربی و نظری گسترده ای در زمینه رسانش نانو ساختارهای مغناطیسی انجام شده است. در این راستا پدیده ترابرد اسپینی در نانو ساختارهای مغناطیسی از قبیل سیم کوانتومی مغناطیسی توجه زیادی را از لحاظ علمی و تکنولوژیکی به خود جلب کرده است. خواص رسانش الکتریکی این ساختارها، از طریق محدود کردن آن ها بین دو الکتروود فلزی و عبور جریان از میان آن مورد بررسی قرار می گیرد. در این مقاله ترابرد قطبیده اسپینی در یک نانو کریستال مغناطیسی متصل شده به دو الکتروود فلزی سه بعدی بررسی می شود.

هدف: بررسی ترابرد قطبیده اسپینی در یک نانو کریستال با لایه های مغناطیسی در حضور میدان های الکتریکی و مغناطیسی، بر اساس فرمول بندی لاندائور.

روش بررسی: در این مقاله ترابرد قطبیده اسپینی در یک سیم کوانتومی سه بعدی با لایه های مغناطیسی و با ساختار مکعبی ساده که به دو الکتروود فلزی سه بعدی با همان ساختار محدود شده است، در مدل بستگی قوی و روش تابع گرین در فرمول بندی لاندائورمورد بررسی قرار می گیرد.

نتایج: در حضور میدان مغناطیسی خارجی ترابرد اسپین های بالا و پایین در کانال های مجزایی صورت می گیرد، الکترون های با اسپین پایین سهم کمتری در ترابرد دارند و میدان الکتریکی به دلیل فرونشانی در اندازه ترابرد باعث کاهش آن می شود.

نتیجه گیری: حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی خارجی به دلیل تاثیرشان در جهت گیری ممان های مغناطیسی لایه های مغناطیسی، اثرات متفاوتی را نشان می دهد. در حضور میدان مغناطیسی خارجی ممان های مغناطیسی لایه های مغناطیسی هم جهت بوده و پیکربندی فرومغناطیس را به وجود می آورند. در غیاب میدان مغناطیسی خارجی ممان های مغناطیسی لایه های مغناطیسی غیرهم جهت بوده و پیکربندی پادفرومغناطیس را بوجود می آورند. همچنین میدان الکتریکی که در جهت عمودی برسیم وارد می شود باعث فرونشانی در اندازه ترابرد می شود، این میزان کاهش را می توان به صورت خارجی توسط همین میدان کنترل کرد.

واژه های کلیدی: ترابرد قطبیده اسپینی، نانو کریستال، میدان مغناطیسی، میدان الکتریکی، فرمول بندی لاندائور، تابع گرین.

مقدمه

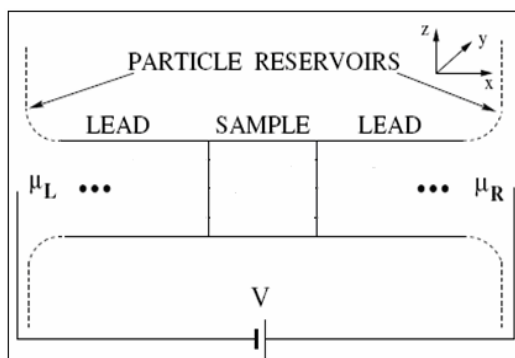
الکترونیک مغناطیسی یا اسپینی شاخه ای جوان در علم نانوالکترونیک است که بر درجات آزادی اسپین پایه گذاری شده است و هدف اصلی آن بررسی پدیده های الکترونیکی با در نظر گرفتن اسپین الکترون ها می باشد. به عبارت دیگر در گستره اسپیترونیک ترابرد را وابسته به اسپین نگریسته و حتی بر همکنش های اسپینی را در مطالعات منظور می کنند. در مواد مغناطیسی، جمعیت اکثریت اسپین ها یک راستای مشخص را برای جهت گیری بر می گزینند و با اعمال میدان مغناطیسی خارجی برای الکترون های با اسپین های بالا و پائین دو پیکره بندی مجزا بوجود می آید، در حالی که در مواد غیر مغناطیسی جهت گیری اسپین ها کاتوره ای بوده و راستای مشخصی برای مغناطش کل ماده وجود ندارد. در سال های اخیر، ترابرد قطبیده اسپینی به درون سیستم هایی با سائز محدود مورد توجه قرار گرفته است. به طوریکه امروزه شاهد پیدایش ابزارهایی که در این گستره وارد چرخه دنیای صنعتی امروز شده اند هستیم، مانند حافظه های مغناطیسی، فیلم های ریز ساختار مغناطیسی و ترانزیستور های اسپیترونیکی، این ابزارها با سرعت انتقال بالا، جایگزین مناسب و بهینه ای برای همتهای الکترونیکی خود هستند. از جمله نانو ساختارها می توان به سیم های کوانتومی اشاره کرد.^(۶-۱) در این مقاله ترابرد قطبیده اسپینی در یک سیم کوانتومی سه بعدی با لایه های مغناطیسی و با ساختار مکعبی ساده که به دو الکتروود فلزی سه بعدی با همان ساختار متصل شده است، در حضور میدان مغناطیسی خارجی و میدان الکتریکی بررسی شده است. در حضور میدان مغناطیسی خارجی ممان های مغناطیسی لایه های مغناطیسی هم جهت بوده و پیکر بندی فرومغناطیس را بوجود می آورند. در غیاب میدان مغناطیسی ممان های مغناطیسی لایه های مغناطیسی غیر هم جهت بوده و پیکر بندی پاد فرومغناطیس را بوجود می آورند.^(۷) همچنین حضور میدان الکتریکی باعث فرونشانی اندازه ترابرد در سیستم

می شود، بنابراین با مقداری که به میدان الکتریکی نسبت داده می شود، به عنوان یک عامل خارجی، میزان تراپرد در سیستم رامی توان کنترل کرد. محاسبات مان براساس روش تابع گرین در فرمول بندی لاندائور است. (۱۳-۸)

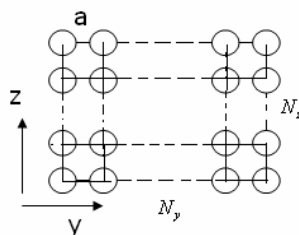
نتایج و بحث

سیستم مورد مطالعه یک سیم کوانتومی سه بعدی با لایه های مغناطیسی و ساختار مکعبی ساده می باشد که به دو الکتروود کریستالی فلزی با همان ساختار محدود شده است. شکل ۱:

(الف)



(ب)



شکل ۱- الف) نمایی دو بعدی از یک سیم کوانتومی سه بعدی متصل به الکتروود های کریستالی
 ب) نمایی از یک لایه اتمی در جهت [۰،۰،۱].

مطابق شکل، سیم مورد مطالعه ردیفی از لایه های اتمی در جهت [۰،۰،۱] می باشد که آن را X می نامیم. محور های عمودی Y و Z در صفحه این لایه ها، در جهات [۰،۱،۰] و [۱،۰،۰] قرار گرفته اند. هر لایه اتمی، N_y اتم در جهت محور Y و N_z اتم در جهت محور Z دارد. تعداد لایه ها در جهت [۰،۰،۱] یعنی N_x ، طول سیم را مشخص می کند که در واحد ثابت شبکه یعنی a می باشد. رفتار الکترون در سیستم با هامیلتونی تک الکترونی در مدل بستگی قوی و روش تابع گرین در فرمول بندی لاندائور توصیف می شود. همه انرژی ها در واحد انتگرال هم پوشانی نسبت به انرژی فرمی که در تراز صفر قرار دارد اندازه گیری می شود. هامیلتونی چنین سیستمی به صورت زیر است:

$$H = H_L + H_{wL} + H_w + H_{wR} + H_R \quad (1)$$

$$H_{L(R)} = \alpha_{L(R)} \sum_n (c_n^+ c_{n+1} + h.c) \quad (2)$$

$$H_{wL(R)} = \alpha_{wL(R)} (c_{0,N+1}^+ c_{1,N+1} + h.c.) \quad (۳)$$

$H_{L(R)}$ هامیلتونی مربوط به الکترودهای چپ و راست، $H_{wL(wR)}$ هامیلتونی مربوط به اتصال اتم های سیم و الکترودهای ناحیه تداخلی، $c_n^+ c_{n+1}$ عملگر آفرینش (نابودی) الکترون در در حالت شبه وانیر سایت n ام، $\alpha_{L(R)}$ انتگرال پرش مربوط به نزدیک ترین همسایه ها در الکترودها و $\alpha_{wL(wR)}$ انتگرال پرش مربوط به ناحیه تداخلی سیم - الکترودها می باشند. هامیلتونی سیم مکعبی با لایه های مغناطیسی به صورت زیر است:

$$H_w = \sum_{mn\sigma;q} (E_{0,mn\sigma} - h_n \cdot \sigma_z) c_{mn\sigma;q}^+ c_{mn\sigma;q} + \sum_{mn\sigma;q} \alpha_{mn\sigma;q} (c_{mn\sigma;q}^+ c_{mn\sigma;q+1} + h.c.) \quad (۴)$$

در رابطه (۴) h میدان مولکولی در سایت n ام، σ_z مولفه Z عملگر اسپین پائولی که ویژه مقادیر آن برای اسپین های بالا و پایین ۱ و -۱ می باشد. q اندیس سایت در جهت محور x ، $\alpha_{mn\sigma;q}$ انتگرال هم پوشانی در جهت محور x و $E_{0,mn\sigma;q}$ انرژی های جایگاههای اتمی در صفحه عمود بر راستای انتشار می باشد به گونه ای که:

$$E_{0,mn\sigma} = 2\alpha_{wy} \cos\left(\frac{n\pi}{N_y + 1}\right) + 2\alpha_{wz} \cos\left(\frac{m\pi}{N_z + 1}\right) \quad (۵)$$

در رابطه (۵) $m(n)$ تعداد مد های عرضی در سطح مقطع yz و $\alpha_{wy(z)}$ انتگرال هم پوشانی می باشند. در غیاب اثرات گرمایی و بار، احتمال انتقال الکترون ها از الکترودهای چپ به الکترودهای راست با انرژی E در ترم های تابع گرین به صورت زیر است:

$$T = Tr(\Gamma_L G \Gamma_R G^+) \quad (۶)$$

که $G = (E - H_w - \Sigma_L - \Sigma_R)^{-1}$ المان های ماتریسی تابع گرین میباشد. $\Gamma_{L(R)} = i[\Sigma_{L(R)}(E + i\eta) + h.c.]$ جفت شدگی بین سیم و الکترودها را در ناحیه تداخلی بیان می کند. $i\eta$ کمیت بی نهایت کوچک می باشد. المان های ماتریسی معروف به خود انرژی می باشند که تنها در لایه های لبه ای اتصال سیم به الکترودها مقادیری غیر صفر دارند:

$$\Sigma_{L(R)(n,m)} = \left(\frac{2}{N_y + 1}\right) \times \left(\frac{2}{N_z + 1}\right) \times \sum_{k_y, k_z} \sin(k_y n_y a) \sin(k_z n_z a) \Sigma(k_y, k_z) \sum_{k_y, k_z} \sin(k_y m_y a) \sin(k_z m_z a) \quad (۷)$$

که $k_y(i) = \frac{n\pi}{(N_y + 1)a}$ و $k_z(j) = \frac{m\pi}{(N_z + 1)a}$ معرف کانال های رسانش می باشند به گونه ای که i از ۱ تا N_y و j از ۱ تا N_z تغییر می کنند. خود انرژی کانال (k_y, k_z) یعنی $\Sigma(k_y, k_z)$ برای محدوده $|E_\Sigma| < 2\alpha_L$ به صورت زیر است:

$$\Sigma(k_y, k_z) = \frac{\alpha_{wL(R)}^2}{2\alpha_{L(R)}^2} (E_\Sigma - i\sqrt{4\alpha_L^2 - E_\Sigma^2}) \quad (۸)$$

که در آن $E_\Sigma = E - \varepsilon(k_y, k_z)$ است و همچنین $\varepsilon(k_y, k_z) = 2\alpha_L (\cos(k_y a) + \cos(k_z a))$ انرژی کوانتیزه شده تراز های عرضی الکترودها می باشد. در حالتی که $|E_\Sigma| > 2\alpha_L$ داریم:

$$\Sigma(k_y, k_z) = \frac{\alpha_{wL(R)}^2}{2\alpha_{L(R)}^2} (E_\Sigma - \text{sgn } E_\Sigma \sqrt{E_\Sigma^2 - 4\alpha_L^2}) \quad (۹)$$

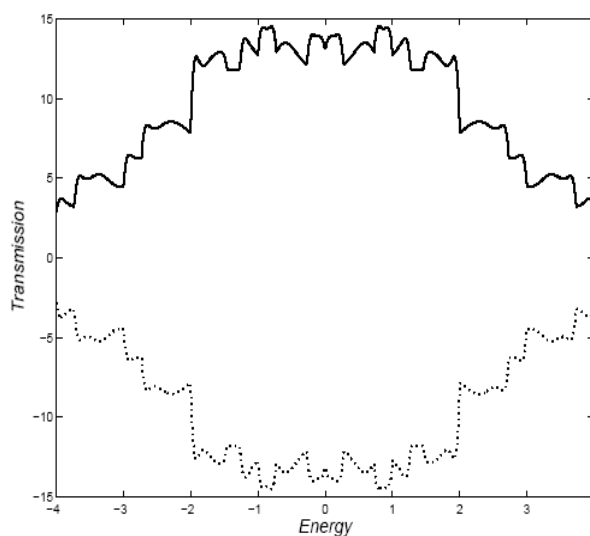
پس به این ترتیب کمیات خود انرژی محاسبه می شوند.

همچنین چگالی حالات سیم در ترم های تابع گرین به صورت زیر است:

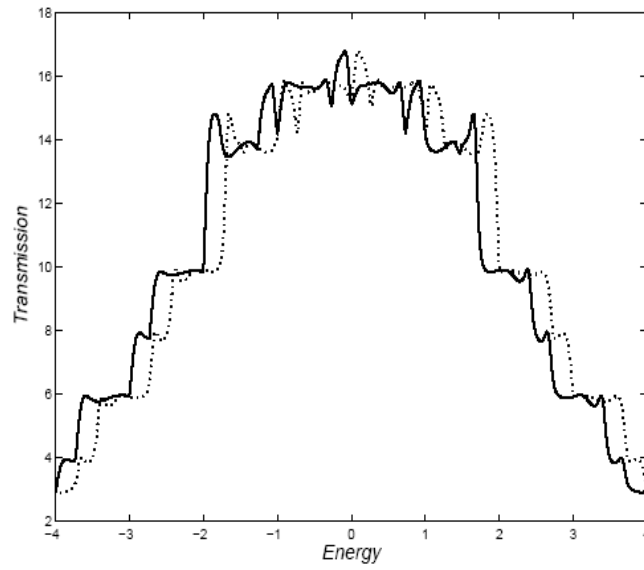
$$DOS_{\sigma}(E) = -\frac{1}{\pi} \sum \text{Im}[G_{ij}(E)] \quad (10)$$

نتایج عددی

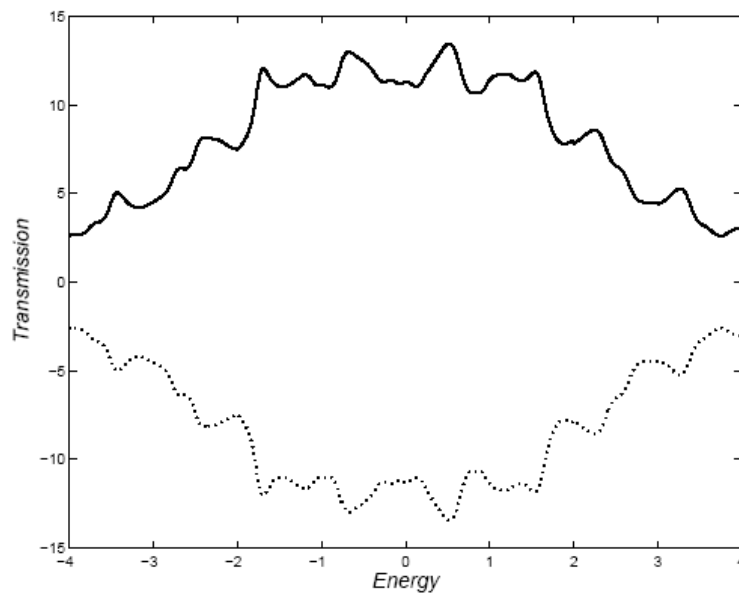
در محاسبات عددی، $N_x \times N_y \times N_z = 10 \times 5 \times 5$ ، میدان مولکولی (۲۵ / ۰)، پارامترهای پرش (۱) و همه انرژی‌ها در واحد انتگرال همپوشانی در نظر گرفته شده‌اند. در حضور میدان الکتریکی و با فرض عمود بودن آن بر سیم، وابستگی انرژی‌های جایگاه‌های اتمی به میدان الکتریکی در تقریب بستگی قوی به صورت $E_i = \frac{\epsilon N_x}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi(i-1)}{N_x}\right)$ می‌باشد. در محاسبات میدان الکتریکی ($\epsilon = 4$) فرض شده است. شکل‌های ۲ و ۳ نمودارهای ترابرد قطبیده اسپینی بر حسب انرژی الکترون ورودی به ترتیب در غیاب و حضور میدان مغناطیسی خارجی می‌باشند. انتقال برای اسپین‌های بالا و پایین در اطراف انرژی فرمی تقارن آینه‌ای دارد. در غیاب میدان مغناطیسی، ترابرد برای اسپین‌های بالا و پایین یکسان است، در حضور میدان مغناطیسی ترابرد اسپین‌های بالا و پایین در کانال‌های مجزایی صورت می‌گیرد. شکل‌های ۴ و ۵ نمودارهای ترابرد بر حسب انرژی در حضور میدان الکتریکی (به ترتیب در غیاب و حضور میدان مغناطیسی خارجی) می‌باشند. به دلیل فرونشانی در اندازه ترابرد، میزان احتمال عبور برای هر دو مورد حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی خارجی افت پیدا می‌کند. با مقداری که به میدان الکتریکی نسبت می‌دهیم این میزان افت را می‌توانیم کنترل کنیم. شکل‌های ۶ و ۷ نمودارهای چگالی حالات بر حسب انرژی به ترتیب در غیاب و حضور میدان مغناطیسی می‌باشند. تقارن آینه‌ای در اطراف انرژی فرمی به وضوح دیده می‌شود. در غیاب میدان چگالی حالات برای اسپین‌های بالا و پایین یکسان و در حضور میدان نا یکسان می‌باشد. در حضور میدان الکتریکی در جهت عمود بر سیم شکل‌های ۸ و ۹، که به ترتیب مربوط به غیاب و حضور میدان مغناطیسی می‌باشند، نوسانات اسپین‌های جایگزیده منجر به پهن شدن باندها و کاهش در ارتفاع پیک‌ها می‌شوند.



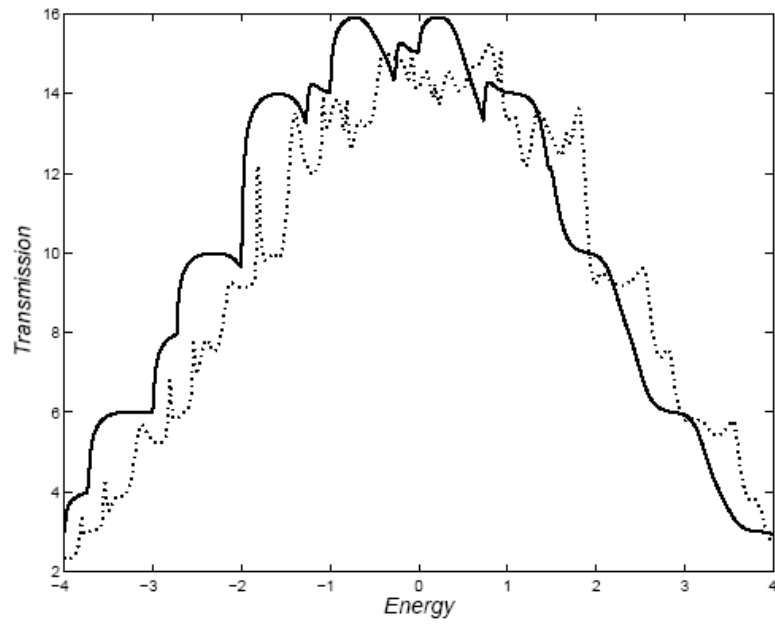
شکل ۲ - ترابرد قطبیده اسپینی در عدم حضور میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (خط تیره اسپین بالا، خط چین اسپین پایین).



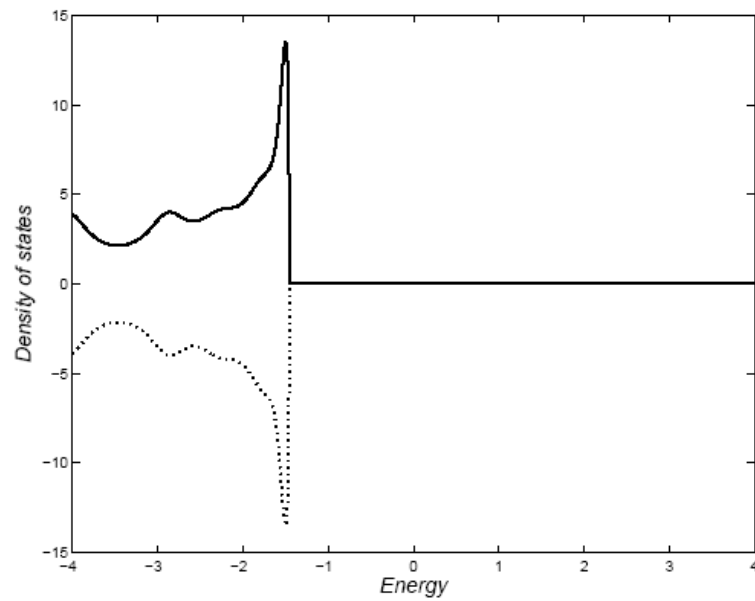
شکل ۳- ترابرد قطبیده اسپینی در حضور میدان مغناطیسی و عدم حضور میدان الکتریکی (خط تیره اسپین بالا، خط چین اسپین پایین).



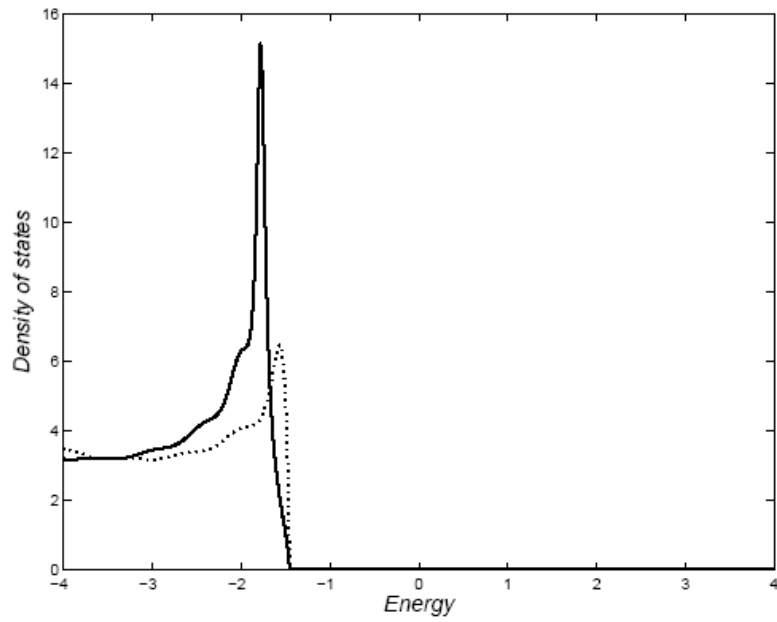
شکل ۴- ترابرد قطبیده اسپینی در عدم حضور میدان مغناطیسی و حضور میدان الکتریکی (خط تیره اسپین بالا، خط چین اسپین پایین).



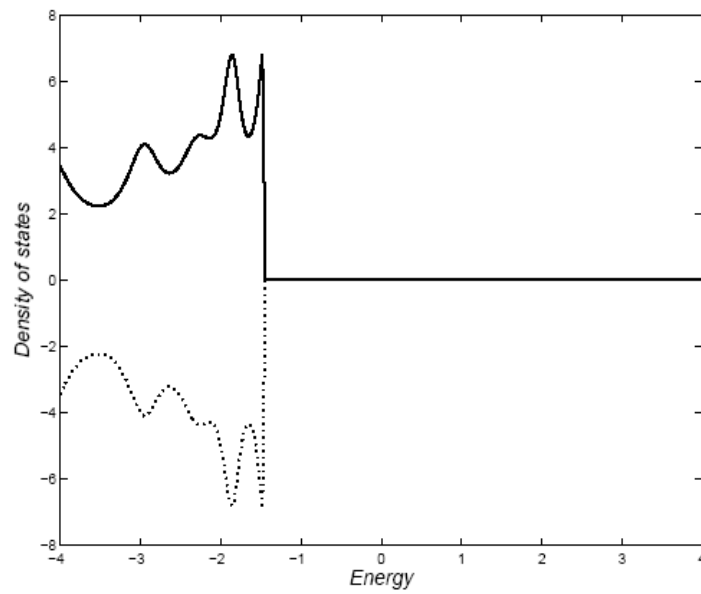
شکل ۵- تراپرد قطبیده اسپینی در حضور میدان های مغناطیسی و الکتریکی (خط تیره اسپین بالا، خط چین اسپین پایین).



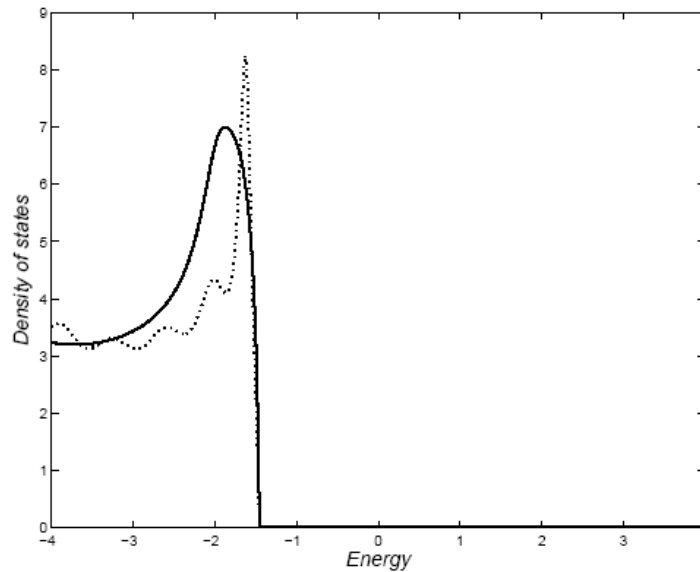
شکل ۶- چگالی حالات در عدم حضور میدان های مغناطیسی و الکتریکی (خط تیره اسپین بالا، خط چین اسپین پایین).



شکل ۷- چگالی حالات در حضور میدان مغناطیسی و عدم حضور میدان الکتریکی (خط تیره اسپین بالا، خط چین اسپین پایین).



شکل ۸- چگالی حالات در عدم حضور میدان مغناطیسی و حضور میدان الکتریکی (خط تیره اسپین بالا، خط چین اسپین پایین).



شکل ۹- چگالی حالات در حضور میدان های مغناطیسی و الکتریکی (خط تیره اسپین بالا، خط چین اسپین پایین).

نتیجه گیری

تقریبی را در مدل بستگی قوی معرفی کردیم و بر اساس آن ویژگی های ترابرد قطبیده اسپینی در یک سیم کوانتومی سه بعدی با لایه های مغناطیسی و محدود شده به دو الکتروود فلزی با همان ساختار را در دمای صفر بررسی کردیم. محاسبات عددی گویای این مطلب بود که ترابرد قطبیده اسپینی به شدت تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی قرار می گیرد. به گونه ای که در حضور میدان مغناطیسی خارجی ترابرد اسپین های بالا و پایین در کانال های مجزایی صورت می گیرد. با توجه به محاسبات عددی مشخص شد که الکترون های با اسپین پایین سهم کمتری در ترابرد دارند و این نشان دهنده تونل زنی بهتر الکترون های با اسپین بالا می باشد. همچنین اثر میدان الکتریکی که در جهت عمودی برسیم وارد می شود مورد بررسی قرار گرفت، همانطور که بیان شد میدان الکتریکی به دلیل فرونشانی در اندازه ترابرد باعث کاهش آن می شود که این میزان کاهش را می توان با مقادیری که به میدان الکتریکی نسبت می دهیم کنترل کنیم.

References:

1. Ferry, D.K., *Transport in Nanostructures*, Cambridge University Press, England (1997).
2. Datta, S., *Electronic Transport in Mesoscopic System*, Cambridge University Press, England (1997).
3. Datta, S., *Quantum Transport: Atom to Transisto*, Cambridge University Press, England (2005).
4. Chakaraborty, T., *Quantum Dots*, Elsevier, Amesterdam (1999).
5. Harrison, *Quantum Wells, Wires and Dots*, Wiley, New York (2000).

6. Tsymbal, E., *Phys. Condense. Matter*, **15**, 109 (2003).
7. Maekawa, S., *Phys. Rev. B*, **51**, 342 (1994).
8. Landuer, R., *Physics. Lett. A*, **85**, 91(1986).
9. Fisher, D.S., Lee, P.A., *Phys. Rev. B*, **23**, 6851 (1981).
10. Fisher, D.S., Lee, P.A., *Phys. Rev. Lett.*, **47**, 882 (1981).
11. Pastawski, H., *Phys. Rev. B*, **44**, 6329 (1991).
12. Tsymbal, E.Y.U., and Pettifore, D.G., *Phys. Rev. B*, **58**, 432 (1998).
13. Saffarzadeh, A., *Phys. Rev. B*, **76**, 2121 (2007).