مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

اثر اسپینی هال در نانووایرهای DNA

سهراب بهنیا[۱]، سمیرا فتحی زاده[۱]، سمانه فتحی زاده[۲]

[۱] دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

[۲] دانشگاه فرهنگیان، پردیس فاطمه الزهرا، تبریز

چکیده

افزایش آهنگ و امنیت انتقال اطلاعات یکی از چالش های اساسی در نظریه اطلاعات می باشد. در این میان استفاده از اسپین الکترون می تواند ابزارهای مناسبی را برای این منظور خلق کند. اثر اسپینی هال یکی از پدیده هایی است که می تواند منجر به بروز و اشکارسازی جریان های خالص اسپینی شود. در این کار سعی شده است که اثر اسپینی هال در مولکول های DNA و عوامل موثر بر آن مورد مطالعه قرار گیرد. مشاهده شده است که رسانایی اسپینی هال در نزدیکی دمای اتاق دارای بیشترین مقدار است، پس می توان شرایط مناسب برای عبور جریان اسپینی خالص از DNA و درنتیجه استفاده از آن در اسپینترونیک و در تئوری اطلاعات را تخمین زد.

استفاده ازاسپین الکترون بعنوان یک کوانتوم اطلاعات برای ذخیره، پردازش و انتقال اطلاعات، پنجره جدیدی را بسوی دانش اسپینترونیک باز می کند[۱]. اسپینترونیک از درجه آزادی اسپینی الکترونها برای خلق فرم جدیدی از ذخیره اطلاعات در ابزارهای منطقی استفاده می کند. در این میان اسپینترونیک مواد آلی به توصیف جایگزینی اسپین به جای بار الکتریکی بعنوان حامل اطلاعات در مواد آلی اطلاق می گردد. مولکول های آلی کایرال[۱]، پنجره جدیدی را برای استفاده از مولکول بعنوان حامل اطلاعات در نسل دوم الکترونیک باز می کنند. اثر پلاریزاسیون اسپینی در مولکول های DNA بعنوان یک مولکول کایرال نیز مشاهده شده است. بنابراین، بسیار جالب خواهد بود که از پتانسیل DNA در کاربردهای تکنولوژیکی مثل ذخیره اطلاعات مغناطیسی، سنسورهای مغناطیسی و آشکارکننده های مادون قرمز استفاده کنیم.

ما بدنبال یک کانال امن برای انتقال اطلاعات با کمترین اتلاف هستیم. بنابراین سعی می کنیم یک جریان خالص اسپینی تولید کنیم. یک جریان خالص اسپینی، شارش گشتاور زاویه ای اسپینی الکترون بدون شارش همزمان بار الکتریکی است. یکی از روش های تولید جریان اسپینی، اثر اسپینی هال می باشد[۲]. اثر اسپین-هال که در اثر جفت شدگی اسپین-مدار اتفاق می افتد، یک جریان بار الکتریکی را تبدیل به جریان اسپینی می کند. اثر اسپین هال در ابزارهای مغناطیسی همچون سوئیچ های مغناطیسی مورد استفاده قرار می گیرد.

آیا اثر اسپین هال در مولکول های DNA اتفاق می افتد و اینکه تحت تاثیر چه عواملی می تواند قرار بگیرد، سوالی است که قصد داریم در اینجا به آن بپردازیم.

زمانی که الکترون در یک مولکول کایرال حرکت می کند، یک میدان الکتریکی که آن هم کایرال هست را تجربه می کند (E_{chiral}). میدان الکتریکی E_{chiral} که روی الکترونهای متحرک اثر می کند، از الکترونها و هسته هایی که مولکول کایرال را تشکیل داده اند، بدست آمده است. پس بار الکتریکی متحرک در مولکول پیچشی DNA ، یک پتانسیل الکترواستاتیکی بصورت $E_{chiral} = -\nabla V$ را تجربه خواهد کرد. برای DNA دورشته ای، همیشه اختلاف پتانسیل در

[1] Chiral

مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

راستای شعاعی ($\hat{r}$) بزرگتر از راستای محوری است که در اینجا $\hat{z}$ فرض شده است. از طرفی، $\frac{dV}{dr}$ در مرز $r=R$ خیلی بزرگ است که در آن R شعاع DNA می باشد. پس منطقی است که فقط مولفه R میدان مورد توجه قرار گیرد. پس می توان گفت که یک میدان الکتریکی عرضی داخلی (E_R) در DNA وجود دارد. یک میدان داخلی برای شکست تقارن وارون و تولید اندرکنش اسپین–مدار ضروری است. اینجا یک اثر اسپینی هال با بزرگی پارامتر جفت شدگی اسپین–مدار مشخص می شود.

هامیلتونین اندر کنش اسپین–مدار بصورت زیر بیان می شود:

$$H_{so}=-\frac{\alpha}{\hbar}\vec{\sigma}.(\hat{r}\times\hat{p}) \qquad (۱)$$

که در آن $\alpha=-(\frac{\hbar}{2mc})^2E_r$ و m جرم الکترون، c سرعت نور، σ ماتریس های پاولی و P عملگر تکانه خطی می باشد. از طرفی با استفاده از قاعده کوانتش دوم، می توانیم هامیلتونین فوق را بصورت زیر بازنویسی کنیم:

$$H_{so}=\sum_n it_{so}c_n^{+}[\sigma_n+\sigma_{n+1}]c_{n+1}+H.c. \qquad (۲)$$

که t_{so} ثابت اسپین–مدار و $\sigma_n=\{\sigma_x(\sin[(n-1)\Delta\phi]+\sin[n\Delta\phi])-\sigma_y(\cos[(n-1)\Delta\phi+\cos[n\Delta\phi])\}\sin\theta+2\sigma_z\cos\theta$، θ زاویه پیچش DNA ، $\phi=n\Delta\phi$ زاویه مختصات استوانه ای است. با استفاده از عملگرهای خلق و فنا می توان رابطه فوق را بصورت زیر نوشت:

$$H_{so}=\sum_n 2it_{so}\cos\theta[c_n^{\uparrow+}c_{n+1}^{\uparrow}-c_n^{\uparrow+}c_{n-1}^{\uparrow}-c_n^{\downarrow+}c_{n+1}^{\downarrow}+c_n^{\downarrow+}c_{n-1}^{\downarrow}] \qquad (۳)$$
$$+D_{n,n+1}c_n^{\uparrow+}c_{n+!}^{\downarrow}-D_{n,n+1}^{*}c_n^{\downarrow+}c_{n+1}^{\uparrow}+D_{n-1,n}^{*}c_n^{\downarrow+}c_{n-1}^{\uparrow}-D_{n-1,n}c_n^{\uparrow+}c_{n-1}^{\downarrow}$$

بطوریکه $D_{n,n+1}=-it_{so}\sin\theta\{\sin[n\Delta\phi]+\sin[(n+1)\Delta\phi]-i\cos[n\Delta\phi]-i\cos[(n+1)\Delta\phi]\}$ و $D_{n,n-1}=D_{n-1,n}^{*}$.

با وجود اندرکنش اسپین–مداری که طبق رابطه فوق بدست آمد، می توان اثر اسپینی هال را بررسی کرد. حال می توان ثابت اندرکنش اسپین–مدار را بصورت $t_{so}=-\frac{\alpha}{4l_a}$ تعریف کرد که در آن l_a در شرایط $l_a\sin\theta=\Delta h$ و $l_a\cos\theta=R\Delta\phi$ صدق می کند، بطوریکه Δh فاصله طولی بین جفت بازهای مجاور است که با درنظرگرفتن پارامترهای DNA ($\Delta h\approx 0.34\ nm$ و $R=0.7\ nm$) مقدار آن بصورت $l_a=0.56\ nm$ خواهد بود. پس می توانیم میدان الکترواستاتیک عرضی را بدست آوریم و با استفاده از آن چگالی بار الکتریکی عرضی را محاسبه کنیم.

$$E_r=(\frac{2mc}{\hbar})^2l_at_{so} \qquad \text{و} \qquad J_c=\sigma E_r \qquad (٤)$$

که σ رسانایی الکتریکی DNA می باشد.

بهره اثر اسپینی هال با پارامتری بعنوان زاویه اسپینی هال (γ_{SH}) مشخص می شود که بعنوان نسبت جریان اسپینی به جریان بار تعریف می شود ($\gamma_{SH}=\frac{J_s}{J_c}$) که J_s جریان خالص اسپینی است که به تفاوت بین جریان های الکتریکی با اسپین های بالا و پایین اشاره می کند. پس برای مولکول DNA با شرایط مذکور، می توان این رابطه را بصورت زیر نوشت:

$$\gamma_{SH}=\frac{J_s}{J_c}=\frac{I^{\uparrow}-I^{\downarrow}}{\pi R^2\sigma E_r} \qquad (۵)$$

رسانایی اسپینی هال نیز بصورت رابطه $\sigma_{SH}=(\frac{\hbar}{2e})\gamma_{SH}\sigma$ به زاویه اسپین–هال مرتبط می شود. بنابراین برای DNA داریم:

$$\sigma_{SH}=(\frac{\hbar}{2e})\gamma_{SH}\sigma \qquad (٦)$$

مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

جریان های الکتریکی متناظر با اسپین های بالا و پایین نیز که در اثر اندرکنش اسپین- مدار بدست آمده اند، طبق معادله پیوستگی برای بار الکتریکی و چگالی جریان ($I^{\sigma}=\frac{ie}{\hbar}[n^{\sigma},H]$ که $n^{\sigma}=c^{\sigma+}c^{\sigma}$ میباشد) بصورت زیر محاسبه شده اند:

$$I^{\uparrow}=\frac{ie}{\hbar}[n^{\uparrow},H]=-\frac{ie}{\hbar}\sum_{n}\{2it_{so}\cos\theta(c_n^{\uparrow+}c_{n+1}^{\uparrow}-c_n^{\uparrow+}c_{n-1}^{\uparrow})+D_{n,n+1}c_n^{\uparrow+}c_{n+1}^{\downarrow}-D_{n-1,n}c_n^{\uparrow+}c_{n-1}^{\downarrow}\} \quad (۷)$$

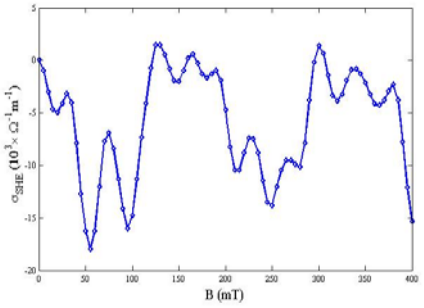
$$I^{\downarrow}=\frac{ie}{\hbar}[n^{\downarrow},H]=\frac{ie}{\hbar}\sum_{n}\{2it_{so}\cos\theta(c_n^{\downarrow+}c_{n+1}^{\downarrow}-c_n^{\downarrow+}c_{n-1}^{\downarrow})+D_{n,n+1}^{*}c_n^{\downarrow+}c_{n+1}^{\uparrow}-D_{n-1,n}^{*}c_n^{\downarrow+}c_{n-1}^{\uparrow}\} \quad (۸)$$

اثر اسپینی هال می تواند از میدان مغناطیسی خارجی متاثر شود[۳]. این تغییر می تواند در تغییر رسانایی اسپینی هال ظاهر شود. اثر میدان مغناطیسی را بصورت جمله ای به هامیلتونین سیستم اضافه می کنیم:

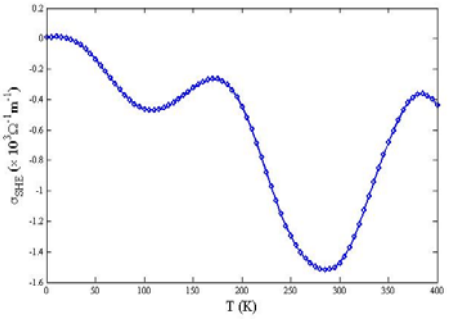
$$H_B=-\mu_B B\sum_{i=1}^{N}(n_i^{\uparrow}-n_i^{\downarrow}) \quad (۹)$$

شکل ۱ تغییرات رسانایی اسپین-هال را در میدان های مغناطیسی متفاوت نشان میدهد. σ_{SH} بین یک مقدار کمینه و یک مقدار بیشینه بصورت تقریبا تناوبی تغییر می کند. نواحی ای که در آن، σ_{SH} مقادیر مثبتی به خود گرفته، نشان دهنده غلبه جریان رسانایی اسپینی بالا به پایین است و نواحی دارای مقادیر منفی حالت برعکس را نشان می دهد.

شکل ۱ : رسانایی اسپینی هال در میدان های مغناطیسی متفاوت



شکل۲ : رسانایی اسپینی هال در دماهای متفاوت



طبیعی است که دمای محیط نیز تاثیر شایانی روی جریان اسپینی DNA خواهد داشت. وابستگی دمایی رسانایی هال در شکل ۲ نشان داده شده است. در نزدیکی دمای اتاق، نانووایر های DNA بیشترین رسانایی اسپینی هال را از خود نشان می دهند. با افزایش دما از این مقدار، رسانایی شروع به کاهش خواهد کرد.

نتیجه گیری

اثر اسپینی هال که کاربردهای زیادی در خلق و آشکارسازی جریان های اسپینی خالص دارد، در مولکول های DNA و در غیاب میدان مغناطیسی خارجی مشاهده می شود. این پدیده که در اثر جفت شدگی اسپین-مدار می تواند حاصل شود، تحت تاثیر عوامل خارجی همچون میدان مغناطیسی خارجی و دمای محیط قرار میگیرد. نشان داده شده است که همواره رسانایی اسپینی مربوط به اسپین پایین بر رسانایی اسپین بالا غلبه دارد. از طرفی رسانایی در نزدیکی دمای اتاق به بیشترین مقدار خود می رسد.

مرجع‌ها

1. M. Verdaguer, *Science* **272** (1996) 698.
2. J. E. Hirsch, *Phys. Rev. Lett.* **83** (1999) 1834.
3. S. Behia, S. Fathizadeh, A. Akhshani, *J. Phys. Chem. C* **120** (2016) 2973.