

## اثر اسپینی هال در لایه‌های نازک فلزی غیر سنگین

حاج‌زاده، ایمان<sup>۱</sup>؛ رحمتی، بهاره<sup>۱</sup>؛ محسنی، سیدمجید<sup>۱</sup>؛ حاجی‌علی، محمدرضا<sup>۲</sup>؛ جعفری، غلامرضا<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده فیزیک دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

<sup>۲</sup>دانشکده فیزیک دانشگاه کاشان، کاشان

### چکیده

اثر اسپینی هال SHE و اثر اسپینی هال معکوس پدیده‌هایی هستند که از برهمکنش اسپین مدار ناشی می‌شوند و سازگاری برای تبدیل جریان‌های الکتریکی و اسپینی به یکدیگر، فراهم می‌کنند. تا به حال مواد با عناصر سنگین که برهمکنش اسپین مدار بزرگی دارند تنها گزینه‌ی موجود برای ایجاد این اثر در فلزات بودند. با نگرشی بر زبری سطح به عنوان یک پتانسیل قابل توجه که در پراکندگی اسپینی نقش بسزایی دارد، در این مقاله در لایه‌های نازک فلزی غیر سنگین مانند آلومینیوم و مس، SHE را بدون استفاده از عناصر سنگین افزایش دادیم. همچنین نشان دادیم که حتی سطحی با ماهیت نویز سفید می‌تواند از طریق مکانیسم جهش جانبی اثر اسپینی هال تولید کند. زاویه اسپینی هال به دست آمده برای این مواد قابل مقایسه با فلزات سنگین مانند پلاتین و طلا هستند.

## Spin Hall effect in non-heavy metal thin layers

Hajzadeh, Iman<sup>1</sup>; Rahmati, Bahareh<sup>1</sup>; Mohseni, Seyed Majid<sup>1</sup>; Hajiali, Mohammadreza<sup>2</sup>; Jafari, Gholamreza<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics, Shahid Beheshti University, Evin, Tehran

<sup>2</sup> Department of Physics, University of Kashan, Kashan

### Abstract

Spin Hall effect (SHE) and its inverse effect are group of phenomena that result from spin orbit interaction and provide an interconversion mechanism between charge and spin currents. So far materials with heavy elements carrying a strong spin orbit interaction are the only option for provide these effect in metallic thin films. In this paper with using the surface roughness as an effect spin scatterer potential in non heavy metallic thin films such as Aluminium and Copper, we show strong SHE occurs without using heavy elements. We also demonstrate that even a surface with white noise nature can generate SHE with using side jump mechanism. Spin Hall angle obtained for these materials is comparable with those in heavy metals such as Platinum and Gold.

PACS No.75

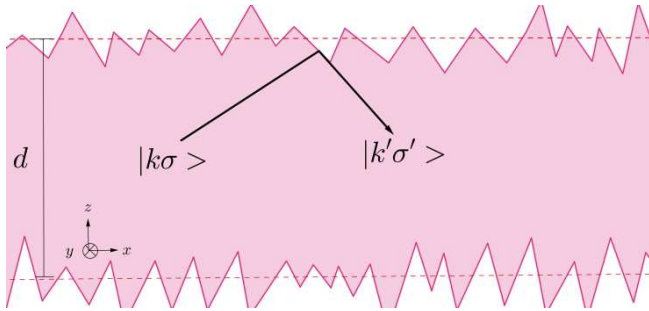
حوزه‌های اسپیترونیکی مثل چرخش مغناطش و حرکت دیواره‌ی

حوزه‌های مغناطیسی و... دارند [۲].

برای توجیه SHE، به طور عادی از دو مکانیسم داخلی و خارجی استفاده می‌شود. مکانیسم داخلی از غیر صفر شدن فاز بری<sup>۲</sup> به دلیل تغییر ساختار نواری در حضور برهمکنش اسپین مدار سرچشمه می‌گیرد [۱]. مکانیسم خارجی از وابسته شدن برخی کمیت‌ها به راستای اسپین آن‌ها، هنگام پراکندگی الکترون‌ها از ناخالصی‌ها، نقص‌ها، فونون‌ها و زبری (در حضور جفت‌شدگی اسپین مدار) به وجود می‌آید. این مکانیسم خود به دو بخش تقسیم می‌شود: (۱) پراکندگی اریب<sup>۳</sup>، (۲) جهش جانبی<sup>۴</sup>. در اولی برهمکنش

### مقدمه

اثر اسپینی هال<sup>۱</sup> (SHE) و معکوس آن گروهی از پدیده‌هایی هستند که از برهمکنش اسپین مدار در نیمه‌رساناها و فلزات پارامغناطیسی به وجود می‌آیند. SHE جریان الکتریکی در یک نمونه‌ی پارامغناطیسی را بدون اعمال میدان مغناطیسی (به دلیل حضور برهمکنش اسپین مدار) به یک جریان اسپینی عرضی تبدیل می‌کند (در اثر اسپینی هال معکوس درست عکس این حالت اتفاق می‌افتد) [۱]. این دو اثر امکان تولید و آشکارسازی جریان اسپینی در مواد غیر مغناطیسی را فراهم می‌کنند و کاربرد فراوانی در



شکل ۱: لایه‌ی نازک فلزی با سطح زبر. ضخامت لایه در  $r = (x, y)$  برابر است با  $d(r)$  و  $d$ .

همچنین برای ساده تر شدن مسئله، سطح زبر را یک سطح غیر همبسته و اصطلاحاً نویز سفید با پارامتر بدون بُعد  $\Delta \propto (\delta/d)^2$  واریانس  $\delta$  در نظر می‌گیریم. بنابراین تابع همبستگی برابر است با:

$$\langle \lambda_r \lambda_{r'} \rangle = \Delta a_0^2 \delta(r - r') \quad (3)$$

در رابطه فوق  $a_0 \propto k_F^{-1}$  ثابت شبکه و  $k_F$  اندازه حرکت الکترون‌های سطح فرمی است.

اما سومین عامل پراکندگی را پتانسیل اسپین‌مدار ناشی از پتانسیل پراکندگی در نظر می‌گیریم [۶].

$$V_R^{so} = -\eta \hat{\sigma} \cdot (\nabla V_R \times i\nabla) \quad (4)$$

در این رابطه  $\hat{\sigma}$  عملگر پاولی و  $\eta$  پارامتر جفت‌شدگی اسپین‌مدار ناشی از زبری سطح است.

حاصل جمع این سه پتانسیل را با پتانسیل مجموع حاصل می‌دهیم. نشان می‌دهیم. هامیلتونی تک ذره‌ای در حضور این پتانسیل برابر می‌شود با:

$$H = \sum_{k\sigma} \varepsilon_k a_{k\sigma}^+ a_{k\sigma} + \sum_{kk'} \sum_{\sigma\sigma'} \langle k'\sigma' | U | k\sigma \rangle a_{k'\sigma'}^+ a_{k\sigma} \quad (5)$$

جمله اول، انرژی جنبشی الکترون‌های هادی است که از سطح فرمی اندازه‌گیری شده‌اند،  $a_{k\sigma}^+$  و  $a_{k\sigma}$  عملگرهای خلق و فنا و  $\varepsilon_k = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} - \varepsilon_F$  جرم مؤثر الکترون و  $\varepsilon_F$  انرژی سطح فرمی می‌باشند. جمله‌ی دوم پراکندگی الکترون‌ها بین دو ویژه حالت اسپینی با اندازه حرکت‌های متفاوت را نشان می‌دهد.

$$\langle k'\sigma' | U | k\sigma \rangle = u_{kk'} \delta_{\sigma\sigma'} + v_{kk'} \delta_{kk'} + i\eta v_{kk'} [\sigma_{\sigma\sigma'} \cdot (k' \times k)] \quad (6)$$

در رابطه فوق،  $u_{kk'} = \langle k' | U_I | k \rangle = \frac{u_{imp}}{V} \sum_i e^{i(k-k')r_i}$ ،  $v_{kk'} = \langle k' | V_R | k \rangle = \lambda_{k-k'} (\hbar^2 \pi^2 / md^2)$  حجم  $V$  و  $\lambda_{k-k'}$  تبدیل فوریه  $\lambda_r$  با بردار موج  $k - k'$  می‌باشند [۱].

اسپین‌مدار، راستای الکترون را حین پراکندگی به اسپین وابسته می‌کند. در دومی سرعت الکترون هنگام عبور از میدان ناشی از پتانسیل اسپین‌مدار به اسپین وابسته می‌شود و یک جابجایی جانبی در تابع موج الکترون به وجود می‌آورد [۴-۲].

در این مقاله تأثیر زبری سطح روی SHE یک لایه‌ی فلزی با اسپین‌مدار ضعیف را بررسی خواهیم کرد. سطح زبر را با عملگر اتساع<sup>۵</sup> به پتانسیل مؤثر پراکندگی تبدیل می‌کنیم [۵] چنانچه گرادیان این پتانسیل در صفحه زبری غیر صفر باشد پتانسیل اسپین‌مداری برای آن در نظر می‌گیریم [۶]. این پتانسیل، اسپین‌مدار ذاتی ضعیف ماده را جبران می‌کند و جریان اکثریکی طولی را به جریان اسپینی در صفحه سطح زبر تبدیل می‌کند.

## مدل

یک لایه‌ی نازک فلزی با سطحی زبر در نظر می‌گیریم. این لایه در راستای  $z$  محدود و در راستای  $r = (x, y)$  نامحدود است، مطابق با شکل ۱. سه عامل را به عنوان پراکندگی معرفی می‌کنیم و برای هر کدام یک پتانسیل تعریف می‌کنیم.

ابتدا ناخالصی‌های حجمی. ناخالصی‌هایی با چگالی  $n_{imp}$  در حجم نمونه در نظر می‌گیریم. پتانسیل دلتا دیراکی پراکندگی برابر می‌شود با:

$$U_I = u_{imp} \sum_{i=1}^{n_{imp}} \delta(r - r_i) \delta(z - z_i) \quad (1)$$

در رابطه فوق  $u_{imp}$  دامنه‌ی پراکندگی است و  $(r_i, z_i)$  مکان ناخالصی  $i$ -ام را مشخص می‌کنند.

عامل دیگر پراکندگی از سطح زبر است. اگر ضخامت لایه‌ی نازک را بدون زبری  $d$  در نظر بگیریم با اضافه شدن زبری، این ضخامت به مکان آن وابسته می‌شود  $d(r)$ . فرض می‌کنیم که  $d(r) = d$  باشد ( $\langle \rangle$  میانگین روی پروفایل زبری سطح است). تراپویدی و اشکرافت<sup>۶</sup> با استفاده از عملگر اتساع، زبری سطح را به پتانسیل مؤثر پراکندگی  $V_R$  با طول مشخصه  $\lambda_r$  تبدیل کردند [۵]  $(\lambda_r = \ln(d(r)/d))$ .

$$V_R = \lambda_r (2V_d + z \partial_z V_d) \quad (2)$$

در عبارت فوق  $V_d$  پتانسیل لایه نازک با ضخامت  $d$  و بدون زبری است (در اینجا پتانسیل ذره در جعبه در نظر می‌گیریم).

## پراکندگی اریب و جهش جانبی

ناشی از برهمکنش اسپین مدار،  $\sigma_{\sigma\sigma} = \sigma z$  جهت بردار پلاریزه و زاویه اسپینی هال ناشی از جهش جانبی است.

$$\theta_{SH}^{SJ} = \frac{\hbar \bar{\eta}}{2\varepsilon_F \tau_n} \quad (13)$$

$\bar{\eta} = \eta k_F^2$  کمیت بدون بُعد از پارامتر جفت شدگی اسپین مدار است. در رابطه ۱۲، عامل ایجاد جریان اسپینی در صفحه سطح زبر است و از رابطه ۱۳ مشهود است که وابستگی به  $\tau_0$  ندارد. زیرا فقط برای پراکندگی از سطح زبر برهمکنش اسپین مدار در نظر گرفتیم [۱].

## رسانندگی‌ها

همانطور که اشاره شد با عبور جریان الکتریکی از حجم نمونه به دلیل جفت شدگی اسپین مدار ناشی از زبری، یک جریان اسپینی در صفحه سطح زبر به وجود می‌آید. بنابراین دو نوع رسانندگی داریم رسانندگی الکتریکی و رسانندگی اسپینی هال.

الف) رسانندگی اکتريکی: زمان‌های واهلش امکان محاسبه‌ی رسانندگی الکتریکی به عنوان تابعی از ضخامت و واریانس زبری را فراهم می‌کنند [۴].

$$\sigma(n_d, \delta) = \frac{3\sigma_0}{2n_d} \sum_{n=1}^{n_d} \frac{\tau_n}{\tau_0} \left(1 - \frac{n^2}{n_d^2}\right) \quad (14)$$

در این رابطه  $\sigma_0 = n_e e^2 \tau_0 / m$  رسانندگی در مدل درود می‌باشد. در شکل ۲، نمودار رسانندگی بر حسب ضخامت برای لایه‌ی آلومینیومی و برای سه مقدار  $\delta = 0, a, 10a$  رسم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت، رسانندگی بیشتر می‌شود. هر چه زبری کوچکتر باشد تعداد الکترون‌های پراکنده شده از سطح زبر کمتر می‌شود بنابراین تعداد کمتری از الکترون‌ها به جریان اسپینی تبدیل می‌شوند و سهم بیشتری در رسانندگی الکتریکی طولی خواهند داشت. در شکل ۳، نمودار رسانندگی بر حسب واریانس برای لایه‌ی آلومینیومی با پارامترهای مشابه شکل ۲ و برای سه مقدار  $n_d$  رسم شده است. در همه موارد رسانندگی با افزایش انحراف معیار زبری، کاهش می‌یابد. ب) رسانندگی اسپینی هال: با داشتن رسانندگی الکتریکی و زاویه‌های اسپینی هال ناشی از پراکندگی اریب و جهش جانبی می‌توانیم زاویه اسپینی هال را محاسبه کنیم.

سطح زبر را نويز سفید در نظر گرفتیم پس تعداد  $\lambda_r > 0$   $(d(r) > d)$  با  $\lambda_r < 0$   $(d(r) < d)$  برابر می‌شود. با توجه به اینکه  $V_R \propto \lambda_r$ ، میانگین آن روی سطح زبر صفر می‌شود  $\langle V_R \rangle = 0$ . زاویه اسپینی هال ناشی از پراکندگی اریب،  $\theta_{SH}^{SS}$  با میانگین  $V_R$  متناسب است  $\theta_{SH}^{SS} \propto \langle V_R \rangle$  [۱]. یعنی چنانچه تعداد زبری‌های بالا رفته از سطح با پایین آمده‌ها برابر باشد (یا تابع توزیع زبری متقارن باشد) آنگاه پراکندگی اریب در ایجاد SHE و تولید جریان اسپینی نقشی ایفا نمی‌کند. بنابراین به دنبال مکانیسم جهش جانبی می‌رویم.

ابتدا زمان واهلش ناشی از پراکندگی‌ها را با استفاده از فرمولبندی لیپمن شرودینگر به دست می‌آوریم. سپس سرعت الکترون عبوری از پتانسیل اسپین مدار را محاسبه می‌کنیم.

$$P_{n'k'\sigma'}^{nk\sigma} = \frac{2\pi}{\hbar} n_{imp} |\langle n'k'\sigma' | T | k\sigma \rangle|^2 \delta(\varepsilon_k - \varepsilon_{k'}) \quad (7)$$

در این رابطه احتمال پراکنده شدن الکترون‌ها از حالت  $n'k'\sigma' \rightarrow nk\sigma$  ماتریس پراکندگی است. با میانگین‌گیری روی سطح زبر و در نظر گرفتن مدهای عرضی (اندیس  $n$ ) و با استفاده از قاعده متایسن زمان واهلش مجموع را محاسبه می‌کنیم.

$$\frac{1}{\tau_n} = \sum_{n'k'\sigma'} P_{n'k'\sigma'}^{nk\sigma} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_n'} \quad (8)$$

$\frac{1}{\tau_0}$  نرخ پراکندگی از ناخالص‌های حجمی و  $\frac{1}{\tau_n'}$  نرخ پراکندگی از زبری است [۵]:

$$\frac{1}{\tau_0} = \frac{u_{imp}^2}{\varepsilon_F \hbar} \frac{n_{imp}}{2\pi k_F^3 n_d} (1 + 2n_d) \quad (9a)$$

$$\frac{1}{\tau_n'} = \frac{4\varepsilon_F n^2 \delta^2}{3\hbar n_d^3 a^2} \quad (9b)$$

$n_d = k_F d / \pi$  کمیتی بدون بعد از ضخامت لایه است.

برای محاسبه‌ی سرعت الکترون‌ها، عناصر ماتریس عملگر سرعت را بین ویژه حالت‌های پراکندگی  $\langle nk\sigma^+ | \hat{v} | nk\sigma^+ \rangle$  (با استفاده از تقریب بورن) محاسبه می‌کنیم [۱].

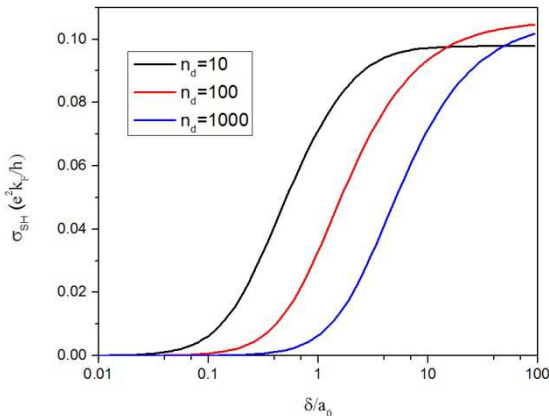
$$\hat{v} = (i\hbar)^{-1} [r, H] = \hat{p}/m^* + (\eta/\hbar) [\sigma \times \nabla V_R] \quad (10)$$

$$|nk\sigma^+\rangle = |nk\sigma\rangle + \sum_{n'k'} |n'k'\sigma\rangle \frac{\langle n'k'\sigma | V_R + U_I | nk\sigma \rangle}{\varepsilon_{nk} - \varepsilon_{n'k'} + i\gamma} \quad (11)$$

با محاسبه میانگین روی سطح زبر به عبارت زیر می‌رسیم:

$$v_{nk}^\sigma = v_{nk} + s_{nk}^\sigma \quad \text{و} \quad s_{nk}^\sigma = \theta_{SH}^{SJ} (\sigma_{\sigma\sigma} \times v_k) \quad (12)$$

در رابطه‌ی فوق  $v_{nk} = \frac{\hbar k}{m^*}$  سرعت معمولی،  $s_{nk}^\sigma$  سرعت غیر عادی



شکل ۴: رسانندگی اسپینی هال لایه آلومینیومی بر حسب انحراف معیار برای سه مقدار  $n_d = 10, 100, 1000$ . با پارامترهای مشابه شکل ۲ و  $\bar{\eta} = 0.5$ .

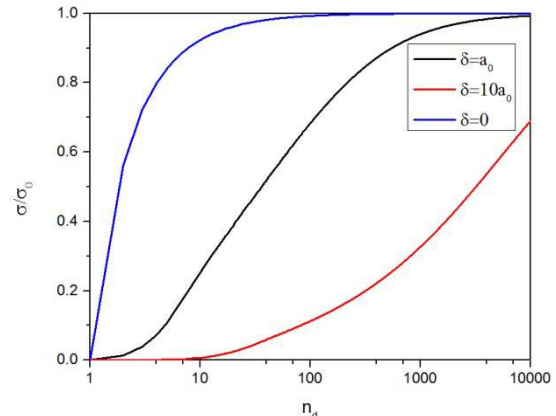
### نتیجه گیری

به صورت تئوری امکان ایجاد اثر اسپینی هال توسط زبری سطح در تک لایه‌های فلزی که اسپین مدار ذاتی ضعیف دارند، بررسی شد. مشاهده شد که حتی زبری نویز سفید می‌تواند این اثر را توسط مکانیسم جهش جانبی تولید کند، به طوری که با افزایش زبری اندازه جریان اسپینی تولید شده افزایش می‌یابد. همچنین مقدار زاویه اسپینی هال محاسبه شده در این رهیافت، برای آلومینیوم هم مرتبه با فلزات سنگین مانند پلاتین و طلا می‌شود. برای مشاهده این اثر در آزمایشگاه باید به گونه‌ای لایه نشانی انجام شود که زبری سطح به مانند یک ناخالصی رفتار کند.

### مرجع ها

- [۱] S. Maekawa et al; "Spin Current"; 1<sup>st</sup> edition · *Contemporary Physics* . (2014) 55.2
- [۲] A. Hoffmann ; "Spin Hall effects in metals"; *IEEE Transactions on Magnetics*; **49**, No10 (2013) 1834.
- [۳] Y. K. Kato; "Observation of the spin Hall effect in semiconductors" *Science* **306**.No5703 (2004) 1910-1913.
- [۴] J. Sinova et al; "Universal intrinsic spin Hall effect"; *Physical Review Letters* **92**.No12 (2004): 126603.
- [۵] N. Trivedi and N. W. Ashcroft; "Quantum size effects in transport properties of metallic films"; *Physical Review B* **38**,No 17 (1988) 12298.
- [۶] L. Zhou et al; "Spin Hall effect by surface roughness" ; *Physical Review B* **91**.4 (2015) 045407.

Spin Hall Effect<sup>۱</sup>  
Berry phase<sup>۲</sup>  
Skew scattering<sup>۳</sup>  
Side jump<sup>۴</sup>  
Dilation operator<sup>۵</sup>  
Trivedi & Ashcroft<sup>۶</sup>



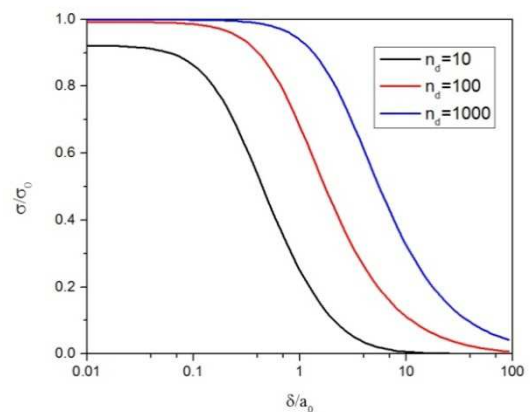
شکل ۲: رسانندگی الکتریکی لایه آلومینیومی بر حسب ضخامت برای سه مقدار  $\delta = 0, a_0, 10a_0$ . با ثابت شبکه  $A^\circ = 4.04$  و اندازه حرکت فرمی  $k_F = 1.75 \text{ 1/A}^\circ$  و رسانندگی  $\sigma_0 = 3.65 \times 10^7 \text{ 1/Om}$ .

$$\sigma_{SH} = (\theta_{SH}^{SS} + \theta_{SH}^{SJ})\sigma \quad (15)$$

با جایگذاری رابطه ۱۳ و ۱۴ در رابطه فوق و  $(\theta_{SH}^{SS} = 0)$  به عبارت زیر می‌رسیم:

$$\sigma_{SH} = \frac{e^2 k_F \bar{\eta}}{h \pi} \sum_{n=1}^{n_d} \frac{\tau_n}{\tau'_n} \left( \frac{1}{n_d} - \frac{n^2}{n_d^2} \right) \quad (16)$$

در شکل ۴، نمودار رسانندگی اسپینی هال بر حسب انحراف معیار برای سه مقدار  $n_d = 10, 100, 1000$  و  $\bar{\eta} = 0.5$  (معادل با مقدار اسپین مدار ذاتی پلاتین) رسم شده است. رسانندگی اسپینی هال برای سطح زبرتر و با ضخامت کمتر، بزرگتر می‌شود. با جایگذاری روابط ۱۴ و ۱۶ در رابطه ۱۵ می‌توان زاویه اسپینی هال کلی  $\theta_{SH} = \theta_{SH}^{SS} + \theta_{SH}^{SJ}$  را به دست آورد. به طور مثال برای آلومینیوم با  $k_F = 1.75 \text{ 1/A}^\circ$  و  $\sigma_0 = 3.65 \times 10^7 \text{ 1/Om}$  زاویه اسپینی هال کل برابر با  $\theta_{SH} = 0.48\%$  می‌شود. که این مقدار از مرتبه فلزات سنگین مانند پلاتین و طلا است.



شکل ۳: رسانندگی بر حسب انحراف معیار برای سه مقدار  $n_d$