

## مقاومت مغناطیسی دولایه ای گرافینی در حضور میدان مغناطیسی تقریباً موازی

پرهیزگار، فریبرز<sup>۱</sup>؛ عسگری، رضا<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده فیزیک پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، فرمانیه جنب کوه نور، تهران

### چکیده

در این کار ما به بررسی خواص ترابردی یک سیستم دولایه ای متشکل از گرافین و یک لایه دیگر در حضور میدان مغناطیسی تقریباً موازی با صفحه گرافین پرداخته ایم. اثر برهمکنش الکترونی بین دو لایه ای بر مقاومت مغناطیسی عادی و مقاومت مغناطیسی هال گرافین مورد بررسی قرار گرفته است. در نتیجه نشان داده ایم که در حالتی که تمام الکترون‌های لایه غیر گرافینی قطبیده اسپینی باشند در مقاومت مغناطیسی گرافین یک پرش ایجاد خواهد شد. همچنین وجود یک مقاومت مغناطیسی هال بسیار بزرگ را در این سیستم پیشبینی کرده ایم.

## Magnetoresistance of a double-layer hybrid system in a tilted magnetic field

Parhizgar, Fariborz<sup>1</sup>; Asgari, Reza<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Physics, Institute for Research in Fundamental Sciences (IPM), Tehran 19395-5531, Iran

### Abstract

The magnetoresistance and Hall coefficient of a doped graphene layer are investigated in the presence of a tilted magnetic field. We consider a graphene layer assembled by either another graphene layer or by a two-dimensional electron gas (2DEG) layer and with the interlayer electron-electron interaction modeled within the random phase approximation. Our calculated magnetoresistances show different interlayer screening effects between decoupled graphene-graphene and graphene-2DEG systems. We also analyze the dependence of dielectric materials as well as the distance between the layers on magnetoresistances. The angle dependence of the Hall coefficient is studied and we show that a quite large Hall resistivity occurs in the graphene layer.

PACS No. 70.00, 72.00, 75.00

بحرانی با اضافه شدن میدان دیگر الکترونی تغییر اسپین نمی دهد زیرا به دلیل وجود گاف انرژی میدان مغناطیسی توان تغییر اسپین الکترون‌های نوار ظرفیت را نخواهد داشت. بدین ترتیب در اثر میدان مغناطیسی موازی در نیمه رساناهای دو بعدی (گاز الکترونی دو بعدی) رسانندگی تبدیل به مجموع رسانندگی اسپین‌های بالا و پایین شده و مقاومت مغناطیسی افزایش می یابد. بعد از میدان بحرانی دیگر تغییری در مقاومت مغناطیسی رخ نمی دهد. این پدیده به لحاظ تئوری و تجربی بررسی شده و نتایج تطابق خوبی با یکدیگر داشته اند. [2] گرافین، شبکه لانه زنبوری تک لایه از اتمهای کربن ساختار نوار انرژی بدون گاف انرژی داشته و شبه

### مقدمه

مقاومت مغناطیسی، تغییر در مقاومت مواد در اثر اعمال یک میدان مغناطیسی از دیرباز چه به لحاظ فیزیکی و چه به لحاظ کاربردی مورد توجه بوده است. [1] ای اثر معمولاً در مواد مغناطیسی هر چند در میدانهای اندک میتواند اثر بسزایی داشته باشد هرچند در مواد غیر مغناطیسی نیز این اثر برای میدان‌های بزرگ مهم میشود. در نیمه رساناهای دوبعدی متداول تحت یک میدان مغناطیسی موازی الکترون‌های نیمه رسانا در اثر میدان زیمان قطبیده می شوند. این قطبیدگی تا بدان جا پیش می رود که تمام الکترون‌های رسانش پلاریزه اسپینی شده و پس از این میدان

$$\hat{H} = \hbar v_F \sum_{k,\gamma,\beta} \hat{\psi}_{k,\gamma}^\dagger (\sigma_{\gamma\beta} \cdot k) \hat{\psi}_{k,\beta} + \hat{T}_2 + \frac{1}{2S} \sum_{q \neq 0,l,l'} V_{ll'}(q) \hat{\rho}_l(q) \hat{\rho}_{l'}(-q),$$

که در رابطه بالا ترم اول نشان دهنده هامیلتونی گرافین و ترم دوم انرژی جنبشی لایه دوم (که میتواند گرافین و یا گاز الکترونی دو بعدی باشد) و ترم آخر پتانسیل برهمکنش کولنی درون لایه ای و بین دولایه ای می باشند. [5] با اعمال میدان مغناطیسی زاویه دار، رابطه جریان الکتریکی و جریان به صورت زیر در خواهد آمد: [6]

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\sigma_+} (\mathbf{J}_+ + \beta_+ \mathbf{B} \times \mathbf{J}_+) = \frac{1}{\sigma_-} (\mathbf{J}_- + \beta_- \mathbf{B} \times \mathbf{J}_-),$$

که علامتهای + و - نشان دهنده جریان های اسپین بالا و پایین می باشند. همچنین ضریب  $\beta_{\pm} = e\tau_{\pm} v_F / k_{\pm}$  است. که  $\tau$  زمان واهلش است و آنرا از معادله بولتزمن بدست می آوریم. در نهایت بر حسب میدان الکتریکی خواهیم داشت:  $\mathbf{E} = \mathbf{R}_{xx} \mathbf{J} + \mathbf{R}_H \mathbf{B} \times \mathbf{J}$  ضرایب مقاومت برابر خواند بود با

$$R_{xx} = \frac{a}{a^2 + b^2 B_{\perp}^2}, \quad R_H = \frac{b}{a^2 + b^2 B_{\perp}^2}.$$

و داریم:

$$a = \sum_{i=+,-} \frac{\sigma_i}{1 + \beta_i^2 B_{\perp}^2}, \quad b = \sum_{i=+,-} \frac{\sigma_i \beta_i}{1 + \beta_i^2 B_{\perp}^2}.$$

بدین ترتیب با محاسبه  $\sigma$  از رابطه بولتزمن اندازه مقاومت مغناطیسی محاسبه خواهد شد.

در این تقریب رسانش برابر خواهد بود با: [7]

$$\sigma_{\pm} = \frac{e^2}{2} \hbar^2 v_F^2 \int d\varepsilon D^{\pm}(\varepsilon) \tau(\varepsilon) \left[ -\frac{\partial n_F(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \right],$$

که در آن  $D$  چگالی حالت ها در سطح فرمی و  $n_F$  تابع توزیع فرمی دیراک می باشد.

همچنین زمان واهلش از رابطه زیر محاسبه میشود

$$\frac{1}{\tau(E_k)} = \frac{\pi}{\hbar} \sum_{k'} n_{\text{imp}} |W_{11}(q)|^2 [1 - \cos^2(\theta)] \delta(E_k - E_{k'}),$$

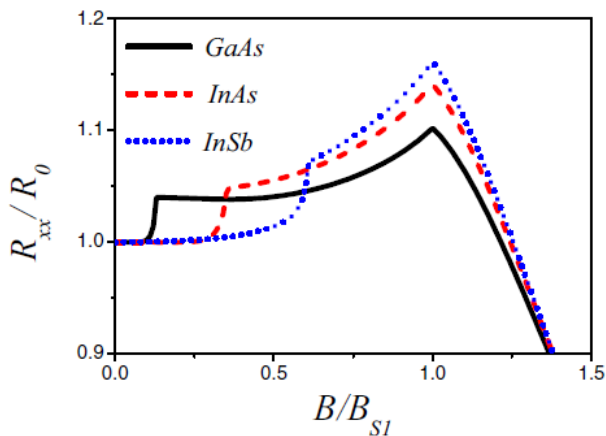
ذرات در این ماده از معادله دیراک پیروی می کنند. در اثر میدان مغناطیسی موازی مقاومت مغناطیسی این ماده همانند گاز الکترونی دو بعدی افزایش یافته اما بعد از میدان بحرانی که در آن تمام الکترون های رسانش پلاریزه شده اند رفتار مقاومت مغناطیسی متفاوت خواهد بود. پس از این میدان به خاطر بدون گاف بودن گرافین الکترون های نوار ظرفیت در اثر میدان برانگیخته شده و به صورت پلاریزه اسپینی به نوار رسانش می روند. با افزایش چگالی الکترونی در نوار ظرفیت رسانندگی زیاد و در نتیجه مقاومت مغناطیسی کاهش می یابد. [3] مقاومت مغناطیسی با شیب منفی از پدیده های مورد توجه در فیزیک ماده چگال است هرچند به دلیل نوار انرژی خاص گرافین دست یافتن به میدان بحرانی بسیار سخت خواهد بود.

اگر میدان مغناطیسی با صفحه گاز الکترونی دو بعدی زاویه داشته باشد، راستای عمود میدان باعث بوجود آمدن اثر هال میشود. اگر این میدان تقریباً موازی فرض شود و راستای عمود آن اندک باشد اثر کوانتومی هال رخ نخواهد داد و فقط شاهد مقاومت معمولی هال خواهیم بود. این اثر در نیمه رساناهای دو بعدی با افزایش ترم موازی و پلاریزاسیون اسپینی باعث خواهد شد تا مقاومت هال افزایشی ۳۰٪ ای در میدان بحرانی داشته و بعد از آن ثابت بماند. [4]

در این پژوهش ما با قراردادن یک لایه ثانویه در زیر گرافین به بررسی خواص برهمکنش بین لایه ای بر مقاومت مغناطیسی گرافین پرداخته ایم. لایه دوم میتواند از جنس گرافین و یا گاز الکترونی معمولی باشد. همچنین با اندازه گیری مقاومت هال دریافته ایم که بر خلاف گاز الکترونی دو بعدی، مقاومت هال در گرافین تحت میدان زاویه دار میتواند تا چندین برابر افزایش یابد.

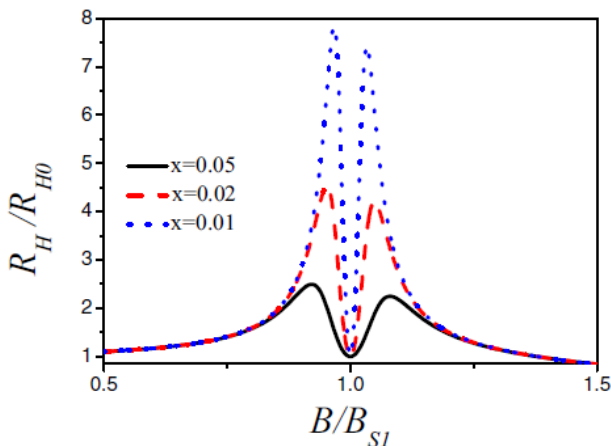
## روش محاسبه

هامیلتونی سیستم دولایه را میتوان به صورت زیر تعریف کرد



شکل ۲ مقاومت مغناطیسی گرافین در حضور گاز الکترونی دو بعدی

شکل ۲ مقاومت مغناطیسی گرافین را در حضور گاز الکترونی دو بعدی نشان می‌دهد. چگالی متداول گاز الکترونی دو بعدی از چگالی‌های معمول گرافین کمتر است به علاوه فرم نوار انرژی گاز الکترونی دو بعدی باعث می‌شود که مقاومت بحرانی گاز الکترونی دو بعدی در یک میدان قابل دسترس اتفاق بیافتد. در این میدان یک پرش در مقاومت مغناطیسی ایجاد می‌گردد. این اثر پررنگ برهمکنشی بین لایه ای فقط در حضور میدان مغناطیسی قابل مشاهده است و بدون آن اثر بسیار کمرنگ تر خواهد بود.



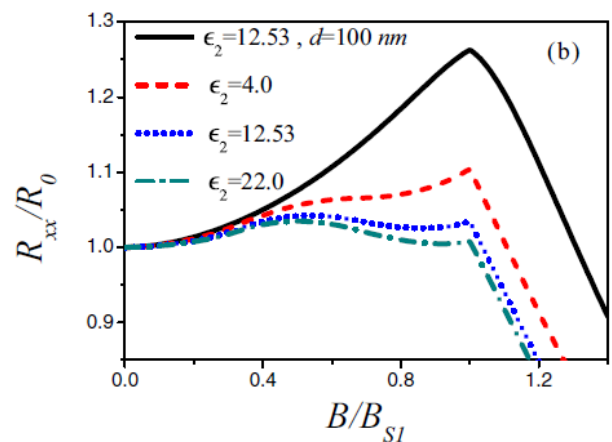
شکل ۳ مقاومت مغناطیسی هال برای مقادیر مختلف پارامتر X

برای بررسی مقاومت هال پارامتر X را که متناسب با زاویه میدان با صفحه بوده و با ناخالصی‌های درون لایه گرافین نسبت عکس داشته تعریف می‌کنیم. شکل ۳ مقاومت هال را در حضور میدان مغناطیسی برای مقادیر مختلف این پارامتر نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل معلوم است برای مقادیر کم X مقاومت هال

که در رابطه بالا W برهمکنش الکترونی در گرافین با احتساب برهمکنش‌های بین لایه ای است.

## نتایج

ابتدا به بررسی مقاومت مغناطیسی گرافین در حضور گرافین می‌پردازیم. شکل ۱ مقاومت مغناطیسی در واحد مقاومت بدون میدان مغناطیسی را بر حسب میدان نشان می‌دهد. در این نمودار فاصله بین دو لایه گرافین ثابت فرض شده و مقادیر مختلفی برای ثابت دی الکتریک بین دو لایه در نظر گرفته شده است.

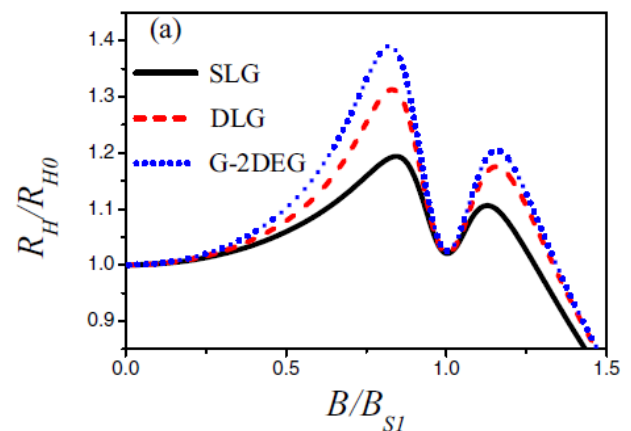


شکل ۱ مقاومت مغناطیسی گرافین در حضور گرافین

همچنین چگالی لایه پایین کمتر از لایه بالا فرض شده است به گونه ای که میدان بحرانی برای این لایه کمتر از لایه بالا بوده و راحت تر بدست آید. در این میدان در اثر برهمکنش الکترونی مقاومت مغناطیسی لایه بالا نیز کم شده و حتی در برخی جاها شیب آن منفی می‌شود. نتیجه مهم این شکل این است که اثر برهمکنش برهم لایه ای در ثابت‌های بالاتر دی الکتریک بیشتر می‌شود و این بدین دلیل است که هرچند این ضریب باعث پوشش برهمکنش بین لایه ای می‌شود اما تاثیر آن در درون هرلایه بیشتر بوده و در کل اثرات بین لایه ای را پررنگ تر مینماید.

- [2] S. Das Sarma and E.H. Hwang, *Phys. Rev. B.* **72**, 205303 (2005)  
 [3] E.H. Hwang and S. Das Sarma, *Phys. Rev. B* **80**, 075417 (2009).  
 [4] V. T. Dolgoplov and A. Gold, *JETP Lett.* **71**, 27 (2000).  
 [5] R. E. V. Profumo, M. Polini, R. Asgari, R. Fazio, and A. H. MacDonald, *Phys. Rev. B* **82**, 085443 (2010).  
 [6] J. M. Ziman, *Principles of the Theory of Solids* (Cambridge University Press, Cambridge, 1972).  
 [7] S. Das Sarma, Shaffique Adam, E. H. Hwang, and Enrico Rossi, *Rev. Mod. Phys.* **83**, 407 (2011).  
 [8] F. Parhizgar, and R. Asgai, *phys. Rev. B* **90**, 035438 (2014).

میتواند تا چندین برابر افزایش مقدار داشته باشد که کاملاً با رفتار گاز الکترونی دو بعدی متفاوت است.



شکل ۴ مقاومت مغناطیسی هال گرافین در حضور گاز الکترونی دوبعدی / گرافین

شکل ۴ مقاومت مغناطیسی هال را نشان می‌دهد و در این شکل اثر برهمکنش بین دولایه ای بررسی شده است. همانطور که در این شکل مشخص است برهمکنش بین لایه ای باعث تشدید مقاومت هال میشود. همچنین برهمکنش با گاز الکترونی دوبعدی افزایش بیشتری را نسبت به گرافین در مقاومت هال ایجاد میکند.

### نتیجه گیری

در این کار ما به بررسی اثر برهمکنش بین لایه ای بر مقاومت مغناطیسی گرافین پرداخته ایم. به عنوان لایه برهمکنشی دو حالت گرافین و گاز الکترونی دوبعدی در نظر گرفته شده است. ما نشان داده ایم که چگونه وجود یک لایه دیگر گرافین باعث کاهش مقاومت مغناطیسی گرافین و در برخی شرایط مقاومت مغناطیسی با شیب منفی میشود. گاز الکترونی دوبعدی نیز باعث یک پرش در مقاومت مغناطیسی شده و آنرا افزایش میدهد. این افزایش ناگهانی در میدانهای مغناطیسی قابل دسترس اتفاق می افتد.

برای مقاومت مغناطیسی هال ما یک افزایش بسیار شدید را گزارش کرده ایم. این رفتار با وجود برهمکنش بین لایه ای بیشتر تشدید شده و قابل دسترس تر میشود. [8]

### مرجع ها

- [1] E. L. Nagaev, *Phys. Rep.* **346**, 387 (2001).