



## معاونت پژوهشی و فناوری

گزارش نهایی طرح تحقیقاتی

**اثر پتانسیل وابسته به زمان بر روی زمان تاخیر**

**گروه وابسته به اسپین در گرافین**

مجری طرح: فرهاد ستاری

همکار طرح: مهدی اصلانزاده

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه

این طرح با تصویب و حمایت مالی حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی اجرا گردیده است.

تیر ماه ۱۳۹۹

## چکیده

ما زمان تونل زنی وابسته به اسپین، زمان تاخیر گروه وابسته به اسپین، و اثر هارتمن را از یک سد تک لایه فرومغناطیسی گرافینی در حضور پتانسیل وابسته به زمان بررسی می‌کنیم. مشاهده می‌شود زمان تاخیر گروه وابسته به اسپین را به طور موثری می‌توان توسط دامنه‌ی نوسان پتانسیل وابسته به زمان کنترل کرد. نتایج نشان می‌دهد که زمان تاخیر گروه وابسته به اسپین برای الکترون‌های فرودی با زاویه‌ی فرود مایل بر خلاف زاویه‌ی فرودی عمود به علامت  $n$  ( $n$ امین باند جانبی) وابسته است. علاوه بر این، نتیجه‌ی جالب بدست آمده از این تحقیق این است که برای باند مرکزی اثر هارتمن برای تمامی زوایا فرود قابل مشاهده می‌باشد، در حالیکه برای باند جانبی این پدیده فقط برای زوایای فرودی بزرگتر از زاویه‌ی بحرانی ( $\varphi \geq \pi/6$ ) قابل مشاهده خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: گرافین تک لایه‌ی فرومغناطیسی، زمان تاخیر گروه وابسته به اسپین، اثر هارتمن، پتانسیل وابسته به زمان.

# فصل ۱:

## مقدمه و هدف

## ۱-۱- مقدمه

بر اساس قانون مور<sup>۱</sup> تقریباً هر دو سال یکبار تعداد ترانزیستورهایی که در یک مدار مجتمع (IC) قرار می‌گیرند دو برابر می‌شود [۱]. امروزه در این مسیر سه مشکل اساسی وجود دارد که عبارتند از: افزایش هزینه ساخت، محدودیت‌های لیتوگرافی و اندازه المانهای پایه مانند دیودها و ترانزیستورها [۲]. بدین خاطر بسیاری از محققان بدنبال کشف راههای جدیدی برای ساخت ICها هستند. مواد سیلیکانی دیگر نمیتوانند این خواسته‌ها را برآورده سازند و می‌بایست موادی جایگزین شود که بتواند توسط اثر میدان الکتریکی کنترل شود. اکثراً برای باورند که ساخت ادوات نانو الکترونیک راه حل مناسبی است. رساناهای آلی، اکسیدهای نزدیک به فاز ابررسانایی یا فاز مغناطیسی و مواد کربنی چون نانو لوله‌ها مثال‌هایی از مواد تکامل یافته اخیر هستند.

توانایی کنترل خواص الکترونیکی مواد مختلف توسط اعمال ولتاژ خارجی از اهداف کلیدی الکترونیک نوین است. ادوات الکترونیکی معمولی وابسته به ترابری حامل‌های بار الکتریکی در نیمه‌رساناهایی چون سیلیکان هستند. اسپینترونیک یا الکترونیک اسپینی علم بررسی خواص ترابردی و ذخیره اطلاعات با استفاده از اسپین الکترون‌هاست. با توجه به این‌که استفاده از اسپین الکترون بجای بار الکترون می‌تواند در انتقال و ذخیره سازی اطلاعات مفید باشد. از این رو فیزیکدانان سعی می‌کنند از اسپین الکترون (نه بار آن) برای تولید ادوات اسپینترونیک استفاده کنند. از مزایای اسپینترونیک نسبت به الکترونیک متداول

---

<sup>1</sup> Moor

می‌توان به سرعت بالا، مصرف انرژی بسیار کمتر و امکان استفاده در محاسبات کوانتومی اشاره کرد. اسپین یک خاصیت کوانتومی است و می‌تواند دارای جهت بالا و یا پایین باشد. این جهت‌ها در سیستم دودویی، می‌توانند داده‌ها را در حالت‌های ۰ و ۱ کد گذاری کنند. به کار گرفتن اسپین الکترون دارای این خاصیت کلیدی است که حافظه‌های اسپینی با قطع جریان الکتریکی از بین نمی‌روند. علاقه پژوهشی شدیدی به ادوات اسپینترونیک که از اسپین الکترون برای فرآوری داده‌ها استفاده می‌کنند، وجود دارد؛ زیرا این ادوات بدیع، عملکرد بهتری نسبت به ادوات الکترونیک سنتی دارند و در آینده به تدریج جایگزین آن‌ها خواهند شد. اصطلاح اسپینترونیک اولین بار توسط ولف<sup>۲</sup> در ۱۹۹۶ به عنوان شاخه‌ای از فیزیک معرفی شد. جرقه استفاده از اسپین الکترون در سال ۱۹۹۸ با پیش‌بینی اثر مقاومت مغناطیسی بزرگ<sup>۳</sup> آغاز گردید [۳]. این اثر در یک سامانه متشکل از یک فلزکروم (Cr) که بین دو لایه فرومغناطیسی آهن (Fe) قرار گرفته است، ایجاد می‌شود. هنگامی که ممان‌های مغناطیسی دو قطعه فرومغناطیس همسو باشند، جریان عبوری از قطعه فلز با مقاومت کمی روبرو خواهد شد. از طرفی وقتی ممان‌های مغناطیسی دو قطعه فرومغناطیسی در خلاف جهت هم باشند، مقاومت عظیمی ایجاد خواهد شد. این اثر به ساخت قطعه اسپینترونکی به نام شیر اسپینی منجر شده است که قابلیت قطع و وصل جریان الکتریکی توسط تغییر جهت ممان مغناطیسی فرومغناطیس‌ها را داراست.

---

<sup>2</sup> Wolf

<sup>۳</sup> Giant Magneto Resistance

کربن یکی از پر هیاهوترین عنصر در جدول تناوبی است. از زمان‌های گذشته تاکنون مواد کربنی یک بستر بزرگ تحقیقاتی در علم مزوسکوپیک به خود اختصاص داده‌اند. آن‌ها خواص الکترونیکی بسیار جالبی عرضه می‌کنند که مربوط به پیکربندی‌های فراوان ممکن حالت-های الکترونیکی اتم‌های کربن می‌شود. در جدول تناوبی، کربن در گروه چهارم قرار دارد. در این گروه کربن پایین‌ترین عدد اتمی را داراست. هر اتم کربن ۶ الکترون دارد که دو الکترون قویاً در اربیتال  $1s^2$  مقید هستند. اربیتال‌های ظرفیت  $2s^2 2p^2$  الکترون‌های قیدی نسبتاً ضعیف دارند. نقش اصلی تشکیل باندهای کووالانس را اربیتال‌های  $2s, 2p_x, 2p_y, 2p_z$  دارند که همان الکترون‌های ظرفیت هستند.

کربن ساختارهای هندسی مختلفی را به خود می‌گیرد. که برخی از آن‌ها مانند الماس و گرافیت از زمان‌های قدیم شناخته شده‌اند و بعضی دیگر مانند فولرین و نانو لوله‌ها از ۲۰-۱۰ سال پیش کشف شده‌اند. در الماس هر چهار الکترون لایه آخر به صورت اوربیتال‌های  $sp^3$  پیوند برقرار می‌کنند. و در گرافیت سه الکترون از چهار الکترون به صورت  $sp^2$  تشکیل پیوند می‌دهند و الکترون دیگر در اوربیتال  $p_z$  باقی می‌ماند. به دلیل تشکیل پیوند به صورت اوربیتال‌های  $sp^2$  (پیوند  $\sigma$ ) اتم‌های کربن در لایه‌های با شبکه لانه زنبوری قرار می‌گیرند. الکترون باقی مانده در اوربیتال  $p_z$  باعث پیوند ضعیفی از نوع پای ( $\pi$ ) میان لایه‌ها می‌گردد. تعداد این لایه‌ها در گرافیت معمولی می‌تواند بسیار زیاد باشد.

در سال ۲۰۰۴، یک گروه فیزیکدان از دانشگاه منچستر انگلستان، که توسط آندره ک. گیم<sup>۵</sup> و کنستانتین س. نووسلوف<sup>۶</sup> سرپرستی می‌شدند توانستند تک لایه های ازگرافیت که گرافین نامیده شد را به کمک شیوه‌ای کاملاً متفاوت و طبیعی بدست آورند (کشیدن گرافیت در موازات لایه ها بر روی سطح) [۴،۵]. البته اولین بار در سال ۱۹۴۷ فلیپ ر. والاس<sup>۷</sup> ساختار نواری گرافین را با استفاده از روش بستگی قوی<sup>۸</sup> بدست آورد [۶]. به همین دلیل قبل از کشف گرافین نیز مطالعه خواص گرافین به صورت تئوریکی مورد توجه قرار گرفته بود. هر چند برای مدت زمان طولانی فرض می‌شد که گرافین به صورت آزاد هرگز نمی‌تواند در طبیعت وجود داشته باشد. این عقیده با استدلال لاندائو<sup>۹</sup> و پایرلز<sup>۱۰</sup> که کریستال دو بعدی به علت ناپایداری ترمودینامیکی نمی‌تواند وجود داشته باشد، تقویت شد [۷،۸]. با این حال با کشف تجربی گرافین این نظریه از بین رفت. هر چند می‌توان استدلال کرد که تئوری لاندائو و پایرلز هنوز برقرار است چون ورقه‌های گرافینی به آرامی در سه بعد مچاله می‌شود و بنابراین دقیقاً دو بعدی نیست. به عبارت دیگر گرافین به طور کامل مسطح نیست و دارای موج است که دلیل آن انرژی حرارتی اش در دماهای بالاتر از صفر مطلق است. پیوندهای کربن-کربن از تا خوردگی آن جلوگیری می‌کنند. گرافین چند لایه که ماده ای مشتمل بر سه تا نه لایه است، خواص بسیار

---

<sup>5</sup> Andre K. Geim

<sup>6</sup> Konstantin S. Novoselov

<sup>7</sup> Philip R. Wallace

<sup>8</sup> Tight-Binding

<sup>9</sup> Landau

<sup>10</sup> Peierls

متفاوتی از گرافین یک یا دو لایه دارد. وقتی که تعداد لایه ها به ده عدد می‌رسد، محققان آن را گرافیت لایه نازک در نظر می‌گیرند.

ویژگی‌های منحصر به فرد در گرافین، طبیعت خاص حامل‌های بار است. در فیزیک ماده چگال، عموماً معادله شرودینگر در توصیف خواص الکترونی مواد موفق است. گرافین یک استثنا است. حامل‌های بار آن از معادلات ذرات نسبیتی بدون جرم تبعیت می‌کنند. هرچند که هیچ مشخصه نسبیتی برای الکترون و حرکت آن در حوالی اتم کربن وجود ندارد. برهم کنش آنها در حضور شبکه لانه زنبوری گرافین، شبه ذرات جدیدی را که در حد انرژی‌های کم با دقت خوبی از معادله دیراک (۱+۲) بعدی با سرعت متوسط حدود  $10^6 m/s$  ارائه می‌دهد. چنین شبه ذراتی را فرمیون‌های دیراک بدون جرم می‌نامیم که الکترون‌هایی هستند که جرم سکون خود را از دست داده‌اند. در گرافین خواص جدید الکترونیکی، ترابردی و مکانیکی زیادی وجود دارد که از مهمترین آنها می‌توان به پارادکس کلاین<sup>۱۱</sup> [۹]. از نظر کاربردی پارادوکس کلاین خبر تقریباً بدی است چون مانع وجود ترانزیستورهای کربنی با تک لایه گرافین متصل به ولتاژ خارجی گیت می‌شود. به طور متضادی نشان داده شده است که تونل زنی در مورد گرافین دو لایه حتی منجر به جلوگیری شدیدی در نفوذ الکترون‌های فرودی در مقایسه با نیمرساناهای متداول می‌شود. با ایجاد سد پتانسیل به واسطه گیت خارجی می‌توان احتمال عبور الکترون‌های بالستیک دو لایه گرافین را دستکاری کرد. اگرچه گرافین شفاف است اما آنچنان متراکم است که حتی کوچکترین اتم -هلیم- هم نمی‌تواند از آن عبور کند. رسانایی حرارتی آن ده برابر بهتر از نقره است. همچنین

---

<sup>۱۱</sup> Klein paradox



گرافین صد برابر از فولاد محکم‌تر است. مقایسه‌ای که در سخنرانی اهدای جایزه نوبل ۲۰۱۰ بیان شد به این صورت است که اگر یک تختخواب سفری از گرافین به ضخامت تنها یک لایه از اتم ساخته شود، آن به اندازه‌ای محکم خواهد بود که یک گربه را نگه دارد و وزن کل تخت برابر با وزن یک موی گربه خواهد بود! همچنین در این سخنرانی بیان شد که لایه‌هایی از گرافین به طول ۷۰ سانتی‌متر با استفاده از روش‌های نزدیک به روش‌های صنعتی تهیه شده است.

خصوصیات غیر عادی گرافین نوید بخش کاربردهای الکترونی آتی آن است. تحریک‌پذیری که به راحتی در «تکنولوژی گرافینی» قابل حصول است در حدود  $2000\text{cm}^2/V.s$  می‌باشد و تقریباً یک مرتبه بزرگی از جدیدترین ترانزیستورهای Si بیشتر است و به راحتی هم بیشتر خواهد شد البته به شرط آنکه کیفیت نمونه‌های گرافین بالا برود. این امر باعث ایجاد تراپری بالا در فواصل کمتر از میکرون است و گامی عالی برای مهندسان الکترونیک محسوب می‌شود. احتمالاً بهترین کاندیدا ترانزیستورهای اثر میدان (FET) گرافینی ادواتی خواهند بود که بر مبنای نقطه کوآنتومی ساخته شده باشند و یا اینکه از گرافین برای ساخت پیوندگاه p-n استفاده شود. گرافین اولین مثال از یک بلور دو بعدی واقعی است. گرافین سؤالات باز زیادی را در حوزه ترمودینامیک نوسانات شبکه و خصوصیات ساختاری آن شامل می‌شود. تک لایه گرافین به صورت نیم‌رسانای بدون گاف انرژی و طیف انرژی خطی، دستگاه دو بعدی از فرمیون‌های دیراک بدون جرم است که در فهم خصوصیات غیر عادی الکترونی مثل اثر کوآنتومی غیر عادی، نبود جایگزیدگی اندرسون و... بسیار مهم است. گرافین دو لایه هم یک طیف سهمی گونه بدون کاف و غیر معمول دارد که سیستمی خواهد بود که

معادله‌ی موج الکترونی آن نه معادله‌ی شرودینگر و نه معادله‌ی دیراک است. و نهایتاً این ماده منجر به پیشرفت در ادوات الکترونیکی مثل ترانزیستورهای مبتنی بر ترکیبات کربن خواهد شد.

گرافین یک ماده مهم برای ادوات اسپینترونیکی است، زیرا اسپین الکترون در آن می‌تواند برای مدت طولانی جهت خود را حفظ کند [۱۰] و در نتیجه اطلاعات ذخیره شده به سادگی از بین نمی‌روند. گرافین به طور ذاتی یک ماده فرومغناطیس نیست اما یکی از روش‌های تولید جریان اسپینی، مجاورت لایه گرافینی با یک ماده فرومغناطیس [۱۱] و یا استفاده از برهم کنش اسپین-مدار است [۱۲].

## ۲-۱- هدف

چه مدت طول می‌کشد که یک ذره از یک سد پتانسیل عبور کند؟ این سوال جالب چندین دهه فکر فیزیکدانان را به خود مشغول کرده بود. مشکل پاسخ دادن به سوال بالا این است که ما بایستی بتوانیم ساعتی طراحی کنیم که بتواند این زمان را اندازه بگیرد. در سال ۱۹۳۱ کوندون<sup>۱۲</sup> مسئله زمان تونل زنی را مطرح کرد [۱۳]. یک سال بعد مک کول<sup>۱۳</sup> نشان داد که زمان تونل زنی یک بسته موج از داخل یک سد تقریباً برابر صفر است [۱۴]. در سال ۱۹۶۲ هارتمن<sup>۱۴</sup> نظریه مک کول را اصلاح کرد و نشان داد که زمان تونل زنی یک ذره از یک سد پتانسیل غیر صفر است [۱۵]. همچنین هارتمن نشان داد در صورتی که

---

<sup>12</sup> Condon

<sup>13</sup> MacColl

<sup>14</sup> Hartman

بردار موج ذره در داخل سد حقیقی باشد در این صورت برای سد پتانسیل با پهنای به اندازه کافی بزرگ دیگر زمان تونل زنی به ارتفاع سد بستگی نخواهد داشت [۱۸-۱۶]. این پدیده بعدها به اثر هارتمن معرفی شد و به صورت تجربی نیز توسط این درز<sup>۱۵</sup> و نیمتز<sup>۱۶</sup> ثابت شد [۱۹]. زمان تونل زنی را می‌توان با استفاده از پایداری فاز به دست آورد [۲۰-۲۲]. زمان سکمی اولین بار توسط اسمیت<sup>۱۷</sup> مطرح شد و برابر با زمان متوسطی است که یک ذره در سد پتانسیل می‌ماند [۲۳]. اخیراً کارهای زیادی به مطالعه زمان تونل زنی در نانو ساختارهای گرافینی پرداخته‌اند به عنوان مثال می‌توان به مراجع [۲۴-۲۹] اشاره کرد. در این تحقیق به صورت تئوری زمان تونل زنی وابسته به اسپین (زمان گروه وابسته به اسپین) و اثر هارتمن را در یک پتانسیل فرومغناطیسی گرافینی وابسته به زمان بررسی می‌کنیم. نشان خواهیم داد با توجه به وابستگی زمان تونل زنی به اسپین الکترون‌ها، می‌توان با تنظیم پارامترهای ساختار مورد بررسی، الکترون‌ها با اسپین بالا و پایین را از هم جدا کرد. همچنین نشان خواهیم داد زمان گروه وابسته به اسپین و اثر هارتمن وابستگی زیادی به دامنه‌ی نوسان سد پتانسیل دارد. علاوه بر این نشان خواهیم داد که زمان تونل زنی برای باندهای مرکزی و باندهای جانبی کاملاً باهم متفاوت بوده، و نیز برای باندهای جانبی بر خلاف باندهای مرکزی اثر هارتمن و تونل زنی فرانوری<sup>۱۸</sup> فقط برای الکترون‌های فرودی با زوایای بزرگتر از یک حد بحرانی قابل مشاهده است.

---

<sup>15</sup> Enders

<sup>16</sup> Nimtz

<sup>17</sup> Smith

<sup>18</sup> Superluminal



## فصل ۲:

### روش تحقیق

#### ۲-۱ محاسبه زمان تونل زنی از گرافین تک لایه فرومغناطیسی در حضور پتانسیل وابسته به زمان

در این تحقیق مانند شکل (۲-۱) یک سد تک لایه فرومغناطیسی گرافینی در حضور پتانسیل وابسته به زمان را در نظر می‌گیریم. خاصیت فرومغناطیسی در گرافین را می‌توان با گذاشتن لایه‌ی فرومغناطیسی مانند  $\text{EuO}$  (اکسید یوروپیم) بر روی گرافین تک لایه به دلیل پدیده اثر نزدیکی ایجاد کرد ایجاد کرد [۳۰]. با توجه به شکل (۲-۱) ارتفاع سد ( $V_0$ ) با فرکانس  $\omega$  و  $V_1$  ی نوسان می‌کند. هامیلتونی ساختار مورد بررسی را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_1,$$

که در آن

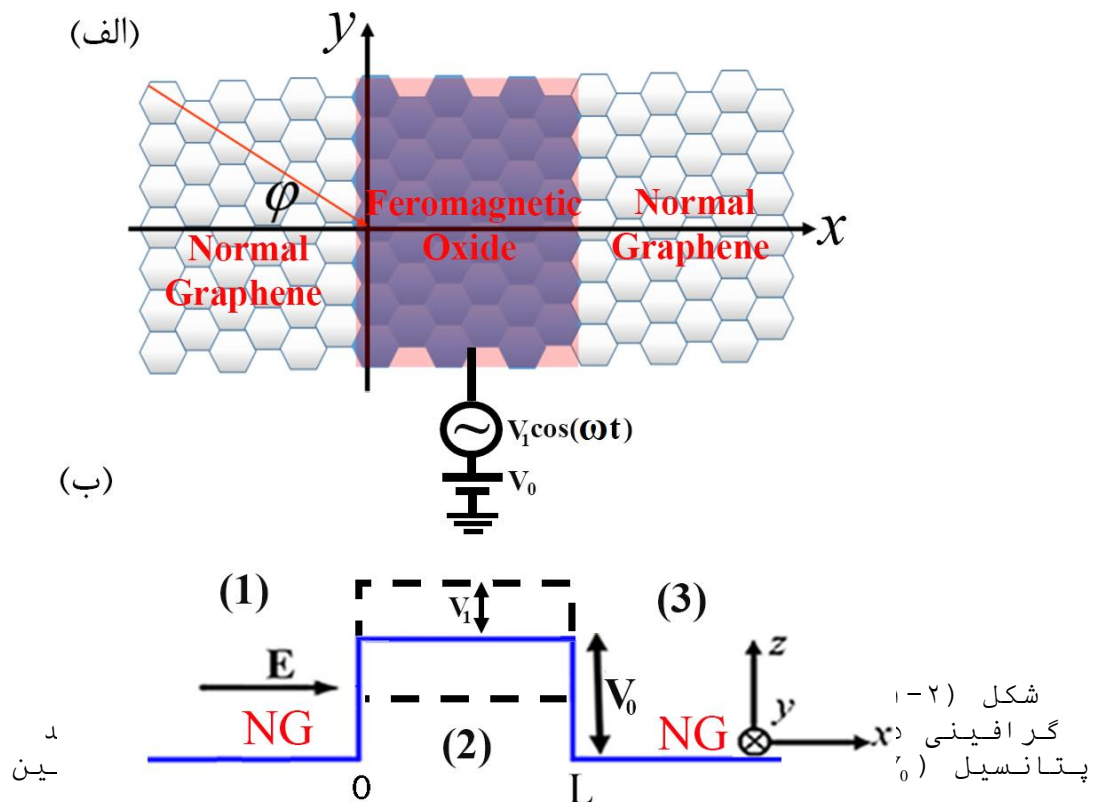
$$\hat{H}_0 = -i\hbar v_F \hat{\sigma} \cdot \vec{\nabla} + V(x)\hat{I},$$

$$\hat{H}_1 = V_1 \cos \omega t, \quad (۲)$$

$$V(x) = \begin{cases} V_0 - \eta h & 0 \leq x \leq L \\ 0 & \text{elsewhere,} \end{cases}$$

در روابط بالا  $\hat{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y)$  ماتریس پائولی،  $\eta = \pm 1$  برچسب اسپین ( $\uparrow$  و  $\downarrow$ )

است.  $\hat{I}$  یک ماتریس یکانی،  $h$  میدان تبادلی در داخل سد پتانسیل و  $L$  پهنای سد پتانسیل است.



فرض کنیم که الکترون‌ها با انرژی  $E$  و تحت زاویه  $\varphi$  در راستای  $x$  به این سد برخورد می‌کنند در این صورت مولفه‌های اسپینورهای دیراک که از حل رابطه (۲-۱) به دست می‌آید را می‌توان در نواحی مختلف (نواحی ۱، ۲ و ۳) به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned}\psi_1(x, y, t) &= \delta_{n0} e^{ik_y y} \left( \begin{array}{c} 1 \\ s_0 e^{i\varphi} \end{array} \right) e^{ik_x x} e^{-iEt/\hbar} + e^{ik_y y} \sum_{l=-\infty}^{l=+\infty} r_l \left( \begin{array}{c} 1 \\ -s_l e^{-i\varphi_l} \end{array} \right) e^{-ik_x^l x} e^{-i(E+l\hbar\omega)t/\hbar}, \\ \psi_2(x, y, t) &= e^{ik_y y} \sum_{l=-\infty}^{l=+\infty} \left[ A_l \left( \begin{array}{c} 1 \\ s'_l e^{i\theta_l} \end{array} \right) e^{iq_x^l x} + B_l \left( \begin{array}{c} 1 \\ -s'_l e^{-i\theta_l} \end{array} \right) e^{-iq_x^l x} \right] \times \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} J_n \left( \frac{V_1}{\hbar\omega} \right) e^{-i(n+l)\omega t - iEt/\hbar} \quad (۲) \\ \psi_3(x, y, t) &= e^{ik_y y} \sum_{l=-\infty}^{l=+\infty} t_l \left( \begin{array}{c} 1 \\ s_l e^{i\varphi_l} \end{array} \right) e^{-ik_x^l x} e^{-i(E+l\hbar\omega)t/\hbar},\end{aligned}$$

در رابطه‌ی (۲-۲)  $k_x = E \cos \varphi / \hbar v_F$  و  $k_y = E \sin \varphi / \hbar v_F$  به

ترتیب مولفه‌های  $x$  و  $y$  بردار موج الکترون فرودی هستند.

مولفه‌ی  $x$  بردار موج  $n$  امین باند  $k_x^l = \sqrt{[(E+l\hbar\omega)/\hbar v_F]^2 - k_y^2}$

جانبی است.  $q_x^l = \sqrt{[(E-V_0+\eta\hbar+l\hbar\omega)/\hbar v_F]^2 - k_y^2}$  مولفه‌ی بردار

موج در ناحیه‌ی سد است. همچنین

$$\theta_l = \tan^{-1}(k_y / q_x^l), \quad \varphi_l = \tan^{-1}(k_y / k_x^l), \quad s'_l = \text{sgn}(E - V_0 + \eta\hbar + l\hbar\omega), \quad s_0 = \text{sgn}(E)$$

و  $J_n \left( \frac{V_1}{\hbar\omega} \right)$  مرتبه‌ی  $n$ ام تابع بسل نوع اول است. بخاطر

پایستگی انتقالی در راستای  $y$ ، بردار موج فرودی در

راستای  $y$  ( $k_y$ ) در طول فرآیند تونل زنی پایسته

می‌ماند. ضریب احتمال عبور ( $t_{sn}$ ) و ضریب احتمال

بازتاب ( $r_{sn}$ ) وابسته به اسپین برای الکترون‌های فرودی

با اسپین  $s$  را می‌توان با توجه به پایداری توابع موج در مرزها ( $x=L$  و  $x=0$ ) و نیز استفاده از این واقعیت که مجموعه‌ی  $\{e^{in\alpha}\}$  متعامد هستند بدست آورد. دامنه‌ی احتمال عبور و بازتاب وابسته به اسپین برای  $n$  امین باند جانبی به ترتیب توسط روابط  $T_{sn} = |t_{sn}|^2$  و  $R_{sn} = |r_{sn}|^2$  مشخص می‌شود.

بعد از محاسبه ضریب احتمال عبور در سامانه مورد نظر رسانندگی سامانه را می‌توان از رابطه بوتیکر<sup>۱۹</sup> به دست آورد [۳۲]:

$$G_{ns} = G_0 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} T_{ns}(\varphi) \cos(\varphi) d\varphi, \quad (۲-)$$

در رابطه بالا  $G_0$  برای ابرشبکه تک لایه و دولایه گرافینی به ترتیب برابر  $G_0 = 2e^2 E_F L_y / v_F \hbar^2$  و  $G_0 = e^2 m^* v_F L_y / \hbar^2$  است که  $L_y$  پهنای صفحه گرافینی در راستای  $y$  است.

بعد از محاسبه ضرایب عبور و بازتاب و نیز با توجه به پیوستگی فاز، می‌توان زمان تاخیر گروه وابسته به اسپین را برای  $n$  امین باند جانبی از رابطه زیر به دست آورد [۳۳، ۳۴].

$$\tau_{gsn} = \tau_{gtsn} + \tau_{grsn}, \quad (۲-)$$

زمان گروه وابسته به اسپین برای  $n$  امین باند جانبی برای عبور  $\tau_{gtsn}$  و بازتاب  $\tau_{grsn}$  را می‌توان از روابط زیر



به دست آورد.

$$\tau_{grsn} = R_{sn} \tau_{grsn} = R_{sn} \hbar \frac{d\Theta_{rsn}}{dE}, \quad (۲-۲)$$

$$\tau_{gtsn} = T_{sn} \tau_{gtsn} = T_{sn} \hbar \frac{d}{dE} (k_x L + \Theta_{tsn}), \quad (۲-۲)$$

که در آن  $\Theta_{rsn}$  و  $\Theta_{tsn}$  به ترتیب آرگومان‌های  $r_{sn}$  و  $t_{sn}$  هستند. در معادله‌ی (۲-۶) مدت زمانی را نشان می‌دهد که یک ذره در غیاب سد پتانسیل فاصله  $L$  یعنی طول سد را طی می‌کند. همچنین زمان سکنی وابسته به اسپین ( $\tau_{dsn}$ ) امین باند جانبی از رابطه زیر به دست می‌آید [۳۵، ۳۶].

$$\tau_{dsn} = \frac{\int_0^L |\psi_2|^2 dx}{j_{in}}, \quad (۲-۲)$$

در رابطه‌ی (۲-۷) تابع موج داخل سد و  $j_{in} = v_F \cos \varphi$  شار فرودی است.

## فصل ۳:

### نتایج و تفسیر آنها

## ۱-۳- مقدمه

در این فصل زمان تاخیر گروه وابسته به اسپین و از یک سد تک لایه فرومغناطیسی گرافینی در حضور پتانسیل وابسته به زمان با استفاده از روابطی که در فصل قبل به دست آمد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. نشان می‌دهیم با توجه به وابستگی زمان تونل زنی به اسپین الکترون‌ها، می‌توان با تنظیم پارامترهای ساختار مورد بررسی، الکترون‌ها با اسپین بالا و پایین را از هم جدا کرد. همچنین نشان خواهیم داد زمان گروه وابسته به اسپین و اثر هارتمن وابستگی زیادی به دامنه‌ی نوسان سد پتانسیل دارد. علاوه بر این نشان خواهیم داد که زمان تونل زنی برای باندهای مرکزی و باندهای جانبی کاملاً باهم متفاوت بوده، و نیز برای

باندهای جانبی بر خلاف باند مرکزی اثر هارتمن<sup>۲۰</sup> و تونل زنی فرانوری فقط برای الکترونهای فرودی با زوایای بزرگتر از یک حد بحرانی قابل مشاهده است.

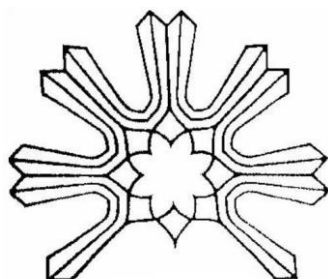
## **Effect of time-dependent potential on the spin-dependent group delay time in graphene**

**Farhad Sattari and Mehdi Aslanzadeh**

### **Abstract**

The spin-dependent group delay time and the Hartman effect in the ferromagnetic monolayer graphene electrostatic barrier are studied theoretically with a time-dependent oscillating potential. It is found that the spin-dependent group delay time could be controlled by adjusting the amplitude of the oscillating potential. The results show that for an electron beam at an oblique angle of incidence, unlike the normal angle, the spin-dependent group delay time depends on the sign of  $n$  for the  $n$ th sideband. Interestingly, for the central band, the Hartman effect can be observed for all angles of incidence. Whereas, for the sidebands, this phenomenon can only occur when the angle of incidence is larger than the critical angle ( $\varphi \geq \pi/6$ ).

Keywords: Ferromagnetic monolayer graphene; Group delay time; Hartman effect; Time-periodic potential.



**University of Mohaghegh Ardabili**

*Final Report of Research Project*

**Effect of time-dependent potential on the spin-  
dependent group delay time in graphene**

*By:*

*Farhad Sattari and Mehdi Aslangezadeh*

*Department of Physics*

*Faculty of Sciences*

**This Research Project Has Been Financially Supported by the Office  
of Vice Chancellor for Research**

**July 2020**