

مروری بر گرافن و کاربرد آن در ساختار ترانزیستورهای اثر میدانی

مائده اکبری اشکلک^{۱*}، حسن شاملو^۲

۱- باشگاه پژوهشگران و نخبگان جوان، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بوئین-زهرا، گروه مهندسی برق، بوئین-زهرا، ایران

چکیده

بنا به قانون مور تعداد ترانزیستورهای یک تراشه در هر بازه ی زمانی دو ساله دوبرابر میشوند. تراکم فزاینده ی ترانزیستورها مشکل افزایش دمای افزاره را در پی دارد. یک راهبرد جهت غلبه بر این مشکل کوچک کردن اندازه ی ترانزیستورها است. اما کاهش مداوم اندازه سبب افت کارایی سیلیکون شده و مشکلاتی مانند تونل زنی الکترون را به دنبال دارد. گرافن ماده ای است که تمام پتانسیل های لازم را برای آنکه بتواند جایگزین سیلیکون در صنعت تولید ادوات نیمه هادی شود دارا است. ساختار اتمی گرافن سبب بهبود خواص الکتریکی، نوری، مکانیکی و حرارتی می شود. پژوهش ها نشان میدهند که استفاده از این ماده به عنوان ماده ی کانال در ترانزیستورهای اثر میدانی منجر به بهبود عملکرد افزاره می گردد. در این نوشتار به بررسی خواص گرافن و کاربرد آن در ساختار ترانزیستورهای اثر میدانی میپردازیم.

واژه‌های کلیدی: گرافن، ترانزیستور اثر میدان، اثر کوانتومی هال، تونل زنی

Mde.akbari@gmail.com : ایمیل نویسنده مسئول

۱-مقدمه

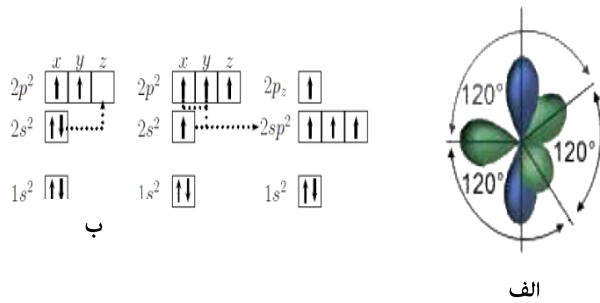
بدون جرم در گرافن حمل می شود. سپس در سال ۱۹۸۷ عنوان گرافن برای توضیح لایه های گرافیت توسط آقای موراس و همکارانش ذکر شد. تا اینکه در سال ۲۰۰۴ تولید گرافن یک لایه توسط آقای نووسلوف و گیم انجام شد. آنها توانستند ورقه های گرافن چند لایه (شامل گرافن تک لایه) ساخته و خواص الکترونیکی آنها را اندازه گیری کنند. روش مورد استفاده این گروه در ساخت لایه های گرافن، سایش مکانیکی بود. این روش در آن زمان برای تولید گرافن چند لایه با ابعاد ۱۰ میکرون بسیار کارآمد و مطمئن بود. همچنین این دو دانشمند در همین سال توانستند اثر میدان دوقطبی گرافن را مشاهده کنند. یک سال بعد آقایان نووسلوف، فیلیپ کیم و ژانگ به اثر کوانتومی غیرعادی هال پی بردند که ذات بدون جرم حامل های بار را در گرافن نشان میدهد. و در سال ۲۰۰۶ ایشان توانستند اثر کوانتومی هال را در دمای اتاق مشاهده کنند [۶-۹].

گرافن و گرافیت اشکال دوبعدی کربن با پیوند sp^2 می باشند که در نوک مداد پیدا می شود. گرافیت از ورقه های گرافن روی هم انباشته تشکیل شده است. این ورقه ها از یکدیگر ۰/۳ نانومتر فاصله دارند و توسط نیروهای ضعیف واندروالس در کنار یکدیگر قرار گرفته اند. تعامل ضعیف بین ورقه ها به آنها اجازه می دهد که به آسانی در عرض لغزش کنند. این نکته به مدادها قابلیت نوشتن و به گرافیت خاصیت نرم بودن می دهد. چنانچه لایه های گرافن را بر روی یکدیگر قرار بدهیم، گرافیت تشکیل می شود که در نوک هر مداد یافت می شود. در حقیقت هرکسی که با مداد خطی می کشد احتمالاً مقداری گرافن ایجاد می کند. این موضوع برای نخستین بار در سال ۱۹۴۷ توسط فیلیپ والاس به عنوان عامل محدود کننده ی کارهای نظری بر گرافیت مورد مطالعه قرار گرفت [۱-۵].

درباره ی ویژگی های مکانیکی گرافن میتوان گفت که این ماده در برابر فشار بسیار مقاوم است و میتواند فشار زیادی را تحمل نماید. هم چنین به سبب ساختار یکپارچه اش یکی از سخت ترین مواد است به طوری که سختی این ماده در حد الماس می باشد، چرا که پاره کردن پیوند بین اتم های کربن بسیار مشکل است. علاوه بر ویژگی های مکانیکی و الکتریکی، گرافن دارای هدایت گرمایی بالایی شبیه به الماس و نانولوله کربنی است. این

ورق دو بعدی گرافن دارای ساختار لانه زنبوری بوده و ویژگی های بسیار جالبی را دارا است. به همین دلیل توجه بسیاری از دانشمندان و محققان را به سوی خود جلب نموده است. این ویژگی ها شامل ویژگی های الکتریکی، مکانیکی و... می باشند.

در سال ۱۹۸۴ آقایان والتر، دوینچنزو و یوجین مل متوجه این امر شدند که جریان الکتریکی به طور موثر توسط حامل های بار

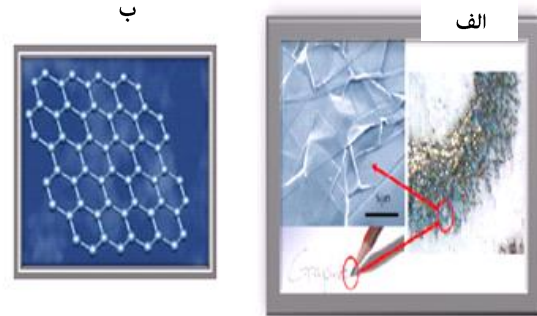


شکل ۱. هیبریداسیون sp^2 در گرافن. الف) ساختار اوربیتال ها بعد از هیبریداسیون. ب) پرشدن اوربیتال ها در فرآیند هیبریداسیون [۱۲].

ساختار بلور گرافن به صورت شش ضلعی های منتظمی است که در گوشه های آن اتم های کربن قرار دارند (شکل ۳ الف). این ساختار معمولاً بلور لانه زنبوری نامیده می شود. هرچند گرافن ساختار منتظمی دارد، ولی یک بلور براوه نیست. برای آنکه بتوان بلور گرافن را با یک شبکه ی براوه مدل کرد، باید برای آن پایه دو اتمی در نظر گرفت. این اتم ها، اتم های نوع A و B نامیده می شوند. سلول ابتدایی این ساختار یک لوزی است که با بردارهای پایه ی a_1, a_2 توصیف میشوند.

نیز ناشی از ساختار یکپارچه ی آن است. این یکپارچگی سبب میشود که فونون ها سریعتر انتقال پیدا کنند و در نتیجه گرما سریعتر و با مقدار بیشتر انتقال می یابد [۱۰ و ۱۱].

در شکل زیر در بخش الف، گرافیت یا گرافن چند لایه ی برجا مانده از اثرات نوک یک مداد و در بخش ب، ساختار شش ضلعی ورق گرافن قابل مشاهده است.



شکل ۱. الف) گرافیت یا گرافن چند لایه ب) ساختار شش ضلعی ورق گرافن [۶]

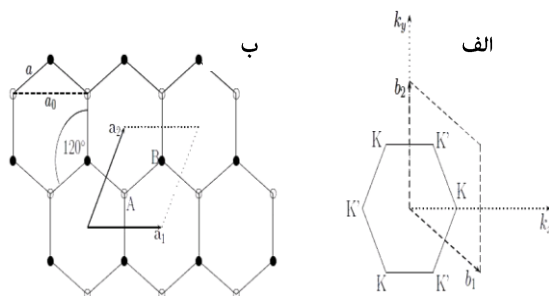
۲- ساختار بلوری گرافن و هندسه ی نانونوارهای گرافنی

۱-۲- ساختار بلوری گرافن

گرافن، بلوری دو بعدی از اتم های کربن است. اتم کربن شش الکترون دارد که به ترتیب اوربیتال های $1s^2, 2s^2$ و $2p^2$ را اشغال می کنند. الکترون های $1s^2$ شدیداً مقید به هسته می باشند و الکترون های هسته ای نام دارند. چهار الکترون دیگر که در لایه ی بیرونی قرار دارند، الکترون های ظرفیت نامیده می شوند. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، این الکترون ها در اوربیتال هایی که کمتر جایگزیده هستند جای می گیرند. چون اختلاف انرژی اوربیتال های $2s^2$ و $2p^2$ از انرژی پیوند آن ها کمتر است، توابع موج این الکترون ها به راحتی طی فرآیندی که هیبریداسیون نام دارد، با هم ترکیب می شوند و اوربیتال های ترکیبی را تشکیل می دهند. حالت های حاصل از این فرآیند در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است. سه حالت از این چهار حالت ترکیبی در صفحه ی xy قرار دارند و با هم زاویه ی 120° درجه میسازند (شکل ۲-ب). این حالت ها، حالت های σ نامیده میشوند و الکترون های آنها با الکترون های σ همسایه تشکیل پیوند کوالانسی محکمی می دهند. حالت های باقی مانده که حالت π نامیده می شوند، در راستای z قرار دارند. الکترون های π وابستگی کمتری به هسته دارند و به راحتی می توانند بین اتم های کربن جا به جا شوند. بنابراین خواص انتقال و الکترونیکی گرافن تحت تاثیر این الکترون ها است [۱۲].

$$a_1 = a\sqrt{3}\hat{x}, a_2 = a(\sqrt{3}/2\hat{x} + 3/2\hat{y}) \quad (1)$$

در رابطه ی (۱)، a فاصله ی بین اتم های کربن و برابر با $1/42$ آنگستروم می باشد. ثابت شبکه $a_0 = \sqrt{3}a$ می باشد.

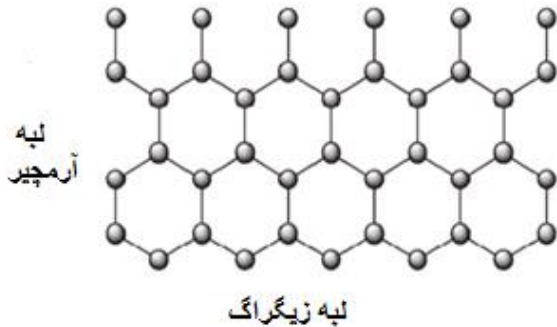


شکل ۲. ساختار بلوری گرافن. الف) ناحیه بریلوئن اول گرافن شش ضلعی است، K و K' لبه های ناحیه ی بریلوئن هستند. ب) گرافن در فضای مستقیم یک بلور براوه با پایه دو اتمی [۱۲].

شبکه معکوس گرافن مشابه شبکه ی مستقیم آن می باشد که 90° درجه چرخش کرده است (شکل ۳. ب). بردارهای واحد شبکه معکوس عبارتند از:

بنابراین ساختار بلور نانونوار گرافن مانند بلور گرافن است با این تفاوت که نانونوار در جهت عرضی محدود است.

بسته به جهت برش گرافن و نوع لبه ی نانونوار میتوان انواع مختلفی برای نانونوار گرافن متصور شد. با این وجود دو نوع مهم و معروف آن عبارتند از آرمچیر و زیگزاگ [۱۶]. اختلاف اصلی میان این نانونوارها در جهت برش آنها است (شکل ۴).



شکل ۴. شمای کلی انواع لبه ها در یک نانونوار گرافن [۱۶].

عرض نانونوار گرافنی آرمچیر طبق رابطه ی زیر بدست می آید [۱۷].

$$W_{AGNR} = \frac{\sqrt{3}}{2}(m-1)a \quad (3)$$

که در این رابطه a ثابت شبکه گرافن و برابر با 0.142 نانومتر است. عرض نانونوار گرافنی زیگزاگ نیز با رابطه ی زیر بدست می آید [۱۷].

$$W_{ZGNR} = \frac{3}{2}\left(\frac{m}{2}-1\right)a \quad (4)$$

برای نانونوار گرافنی آرمچیر با عرض W مقدار شکاف باند طبق رابطه ی زیر بدست می آید [۱۷].

$$E_g = 0.8 \frac{\pi}{2W_{AGNR}} \quad (5)$$

خواص نانونوارها به خاطر شکل متفاوت لبه ها با یکدیگر متفاوت است. به عنوان مثال نانونوار زیگزاگ به سبب داشتن حالت های برگزیده لبه ای دارای خاصیت قطبی شدگی اسپینی خود به خودی است در صورتی که نانونوار آرمچیر حالت های برگزیده لبه ای ندارد و در نتیجه خاصیت قطبی شدگی هم ندارد [۱۹ و ۱۸].

$$b_1 = 2\pi / \sqrt{3}a(\hat{x}-1/\sqrt{3}\hat{y}), b_2 = 4\pi / 3a\hat{y} \quad (2)$$

همان طور که در شکل ۳ ب هم نشان داده شده است، از شش گوشه ناحیه اول بریلوئن تنها دو گوشه از آن ها از هم متمایزند و بقیه با انتقال این دو نقطه به دست می آیند.

ساختار الکترونی گرافن از تقریب ساده نزدیکترین همسایه ها در روش همبستگی پیروی می کند. گرافن در سلول واحد خود دو اتم دارد که منجر به دو نقطه مخروطی برای هر منطقه بریلوئن می شود. همان جایی که تقاطع نوار انرژی در k و k' به وجود می آید. در نزدیکی این نقاط انرژی الکترون به طور خطی به بردار موج وابسته است. به واقع این رفتار از تقارن های مسئله ناشی می شود.

۲-۲- نانونوارهای گرافن

همانگونه که می دانیم، اختلاف اصلی بین مواد در اندازه شکاف انرژی آنها است. نیمه هادی ها موادی هستند که شکاف انرژی در آنها بیشتر از فلزات (شکاف انرژی فلزات بسیار کوچک و یا صفر است) و کمتر از عایق ها هستند. گرافن ماده ای با شکاف انرژی صفر است. از طرفی می دانیم که اکثر افزاره های حالت جامد از نیمه هادی ها ساخته می شوند. بنابراین جهت استفاده ی مناسب از این ماده ی تک لایه در صنعت الکترونیک که کمک شایانی به فشرده سازی قطعات می کند، باید بتوانیم شکاف انرژی آن را به یک مقدار غیر صفر افزایش دهیم. اصولاً دو روش اصلی برای کنترل خواص الکترونیکی گرافن وجود دارد. نخست تزریق شیمیایی ناخالصی های منتخب به این ساختار است [۱۵ و ۱۴]. روش دوم که در عمل بیشتر مورد استفاده قرار میگیرد، ساخت نواری با عرض محدود و باریک (به عرض چند تا چند ده نانومتر) از گرافن است که اصطلاحاً نانونوار گرافن نامیده می شود. برخلاف نانولوله های کربنی که در پروسه ی ساخت به صورت ترکیبی از انواع فلزی و نیمه هادی می باشند، با برش مناسب می توان به یک نانونوار با شکاف مشخص رسید [۱۵].

همانطور که اشاره شد، گرافن یک شبکه ی سطحی از اتم های کربن است که در یک ساختار لانه زنبوری (۶ وجهی) در کنار یکدیگر قرار گرفته اند. در سال های اخیر محققان توانسته اند که گرافن را با روش های مختلفی در ابعاد نانو الگودهی کنند. اگر این الگوهای گرافنی در یک جهت نسبت به جهت دیگر بسیار کوچکتر باشند به طوری که در آن جهت محدودیت کوانتومی از خود نشان بدهند، به آن الگو نانونوار گرافنی گفته می شود.

۳- ویژگی های الکتریکی گرافن

یکی از مهمترین زمینه های تحقیق گرافن، خواص ذاتی الکتریکی آن است که الکترون ها چگونه از میان یک ورق با ضخامت یک اتم تحت اثر نیروهای مختلف خارجی، حرکت میکنند. رفتار الکترون ها در گرافن، آنرا جهت مطالعه ی خواص پایه ای فیزیک، مفید میسازد. شبکه ی کریستالی کامل گرافن بدین معناست که آن، یک سیستم بی نقص میباشد. با محدود کردن الکترون ها در دو بعد، آنها برخی خواص جالب مانند اثر غیرعادی کوانتومی هال و تونل زنی کلاین را نشان میدهند [۱۳].

۱.۳. اثر کوانتومی هال

اثر کوانتومی غیرعادی هال، کوانتیزه کردن رسانایی یک هادی نازک (یا حتی دو بعدی) در میدان مغناطیسی میباشد. این اثرات معمولاً در درجه حرارت پائین مشاهده شده اند اما در مورد گرافن، آنها میتوانند در درجه حرارت اتاق مورد مطالعه قرارگیرند. به تولید ولتاژ درون یک رسانای الکتریکی اثر هال میگویند که از رسانا جریان عبور کرده و یک میدان مغناطیسی به طور عمودی به آن اعمال می شود [۲۱ و ۲۲].

زمانی که هادی دوبعدی در معرض یک میدان مغناطیسی عمود بر هادی قرار میگیرد، باندهای انرژی متصل به سطوح انرژی گسسته شکافته شده که سطح لاندا نامیده میشوند. پتانسیل هارمونیک دارای سطوح انرژی هم فاصله میباشد. از معادله ی غیر نسبیتی شرو دینگر داریم:

$$E_n = \pm \hbar \omega_c \left(n + \frac{1}{2} \right) \quad (6)$$

که علامت \pm بیان کننده درجه آزادی الکترون و حفره میباشد.

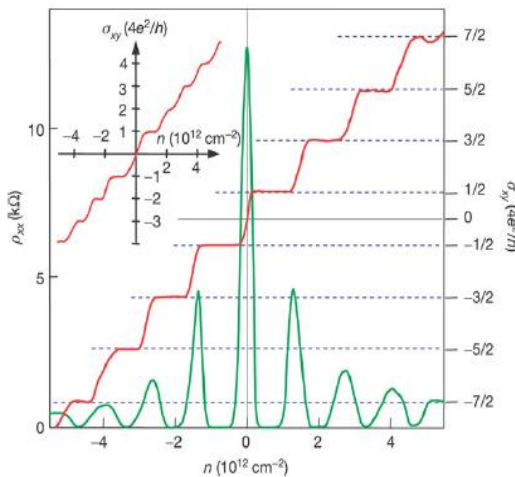
همچنین یک رابطه ی پاشندگی خطی داریم که توسط معادله ی دیراک همبستگی تشریح شده است. کوانتایی سازی دیراک اتفاق می افتد اما سطوح انرژی هم فاصله نمی باشند. از معادله ی دیراک داریم:

$$E_n = \pm \sqrt{2|e|\beta \hbar v_f^2 \left(n + \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \right)} \quad (7)$$

اولین \pm نشان دهنده ی حالات الکترون یا حفره می باشد، در حالی که \pm بعدی نشان دهنده ی شبه اسپین است.

تفاوت اساسی سطوح لاندا ی گرافن و آنهایی که از پتانسیل هارمونیک میباشد، در وجود سطح انرژی صفر در گرافن است. این سطح انرژی به میدان مغناطیسی وابسته نیست. برای

مشاهده ی اینکه چه چیزی این سطح را خاص نموده، به هم ترازوی نگاهی داریم. از آنجایی که دو مخروط k و k' داریم، باید تمام سطوح لاندا دوبار قابل تحقق باشند. شبه اسپین های مربوط به مخروط های k و k' همبسته بوده یعنی تنها یک حالت الکترونی در سطح انرژی وجود دارد. بنابراین تنها یک احتمال برای تحقق انرژی صفر داریم ($n=0$). در شکل زیر اندازه گیری اثر کوانتومی هال در گرافن تک لایه به تصویر کشیده شده است [۲۱-۲۳].



شکل ۳. اثر کوانتومی هال در گرافن. منحنی قرمز-رسانایی در جهت xy و منحنی سبز- رسانایی در جهت xx میباشد [۲۳].

که $\sigma_{xy} = 4 \left(\frac{e^2}{h} \right) \left(n \pm \frac{1}{2} \right)$ و $\sigma_{xy} = \left(\frac{e^2}{h} \right) n$ به ترتیب

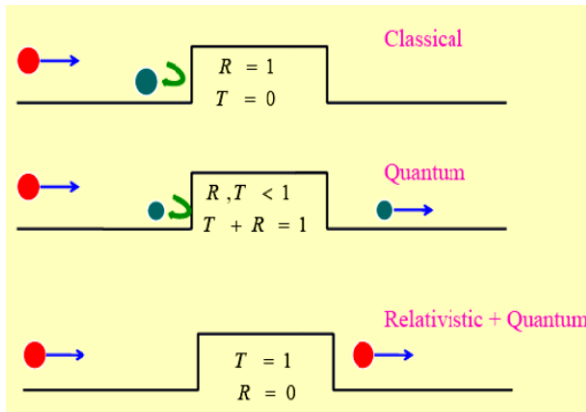
هدایت هال در گرافن (QHE در گرافن) و QHE نرمال می باشند [۲۳].

۲.۳. تونل زنی ذرات کایرال

از آنجایی که گرافن یک نیمه فلز با باندهای الکتریکی ای است که در یک نقطه باهم تلاقی دارند، رسانایی با سطح فرمی که در نقطه ی مخروطی انجام میشود بایستی در درجه حرارت پائین در مکانی که هیچ حالت رسانایی برانگیخته وجود نداشته باشد، به صفر افت نماید. اما در حقیقت، هیچوقت از مینیمم رسانایی $\frac{e^2}{h}$ کمتر نمیشود. در شکل (۶) رسانایی گرافن در درجه حرارت پائین را مبینیم.

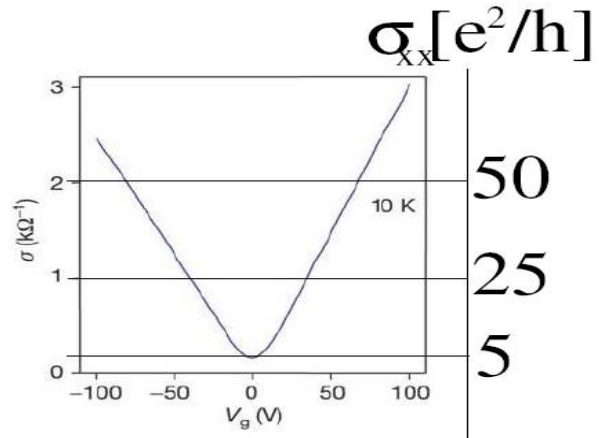
این پدیده بدین علت است که پتانسیلی که دافع ذرات می‌باشد، جاذب پاد ذره است. یعنی حالات پاد ذره ای درون سد پتانسیل وجود دارد. همچنین شکاف بین الکترون ها و پوزیترون ها در گرافن، صفر می باشد. این موضوع اجازه ی انتقال بالستیک را میدهد. یعنی الکترونها بدون پراکندگی میتوانند جریان را منتقل کنند. تاکنون جریان بالستیک در گرافن، بالای چند میکرون اندازه گیری شده است [۲۵ و ۲۴].

در مکانیک کلاسیک، اگر ذره ای به یک دیواره برخورد می کرد ذره به طور کامل برگشت داده میشد. در مکانیک کوانتومی ذره ی برخورد کرده با یک احتمال انتقال پیدا می کرد. و با یک احتمال دیگر برگشت داده می شد. اما ذرات در حالت نسبیتی رفتار دیگری از خود نشان می دهند. اگر ذره ی نسبیتی عمود به دیواره برخورد کند ذره با احتمال صد در صد بدون توجه به ابعاد دیواره از آن تونل می زند و انتقال پیدا می کند. در گرافن ذره ها نسبیتی هستند پس محدود کردن الکترون ها بسیار مشکل است. در شکل زیر تونل زنی برای حالات کلاسیک، کوانتومی و کوانتوم نسبیتی نشان داده شده است [۲۶].



شکل ۸. شمای تونل زنی برای حالات کلاسیک، کوانتومی و کوانتوم نسبیتی [۲۶].

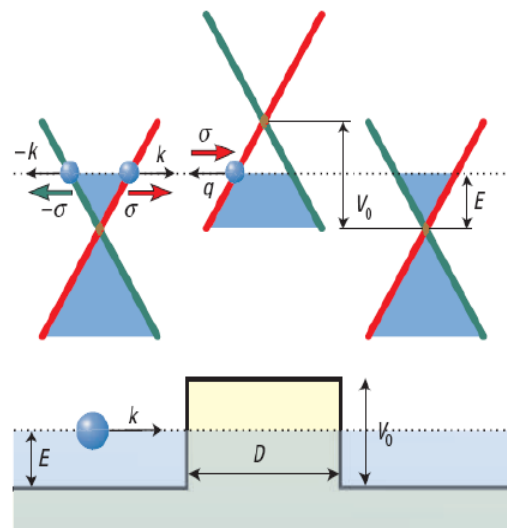
مهم ترین ویژگی ای که گرافن را برای کاربردهای الکترونیکی بسیار جذاب ساخته است، موبیلیتی بسیار بالای آن است. اولین گزارش موبیلیتی گرافن بین $\left(\frac{cm^2}{V.s}\right)$ ۳۰۰۰ تا $\left(\frac{cm^2}{V.s}\right)$ ۱۰۰۰۰ بود. همچنین در این ماده برهم کنش الکترون-الکترون و الکترون-فونون بسیار کم می باشد. در حقیقت پراکندگی، ناشی از برهمکنش الکترون-نقص ها و ناخالصی های شبکه است. لذا با ساخت گرافن با کیفیت بالاتر و نقص کمتر، میتوان به موبیلیتی های بالا دست یافت. و نیز کم بودن پراکندگی سبب شده است



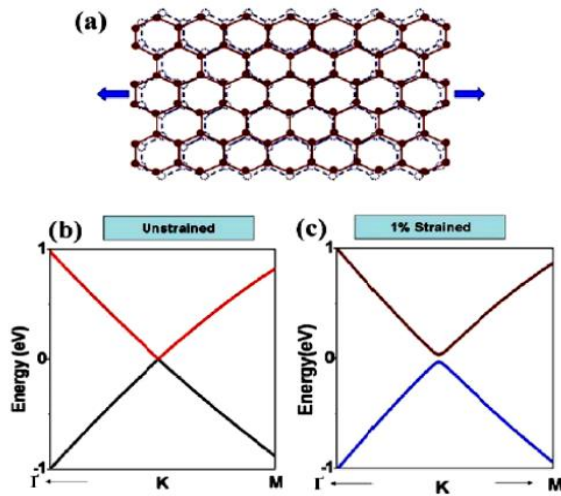
شکل ۶. رسانایی گرافن در دمای کم

عموماً سیستم های الکترونی یک بعدی و دوبعدی بایستی در درجه حرارت پائین، بلوری شوند. به این اثر، محلی سازی اندرسون میگویند. هرکدام از توابع موج در یک پتانسیل تصادفی کوچک، در یک یا دو بعد به صورت نمایی میرا شده اند. لذا زمانی که سیستم در آن نقطه قرار میگیرد، الکترونها در آنجا متمرکز شده و در هدایت و رسانایی شرکت نمیکنند. حال به نظر میرسد این نکته در گرافن اتفاق نمی افتد، یعنی سدهای پتانسیل به هیچ طریقی بر الکترون های گرافن اثر نمیگذارند. همچنین مشاهده شده که نمونه های گرافنی که به مراتب کامل نیستند، به خوبی در برابر ناخالصی ها مقاوم می باشند. لذا میتوان فرض کرد که سدهای پتانسیل گرافن شفاف هستند.

در شکل (۷) میبینیم که یک الکترون در گرافن چگونه میتواند از میان هر سد پتانسیلی تونل بزند (باند ها با رنگ های مختلف به جهت گیری های شبه اسپین مختلف σ متعلق هستند). این امر در فیزیک نسبیتی، تناقض کلین نامیده میشود.



شکل ۷. تونل زنی کایرال در گرافن



شکل ۴. شکاف انرژی ناشی از ایجاد کشش در گرافن [۲۹].

روش دیگر برای تولید شکاف در گرافن روش الگوگذاری است. ایده اصلی این روش از فوتونیک کریستال می آید. داخل فوتونیک کریستال با تولید نقص های متناوب در ماده ی مورد نظر، تبهگنی باندها بر هم زده شده که سبب تولید شکاف می شود. در روش الگوگذاری نیز مشابه با روش فوتونیک کریستال، میتوان نقص های متناوب در گرافن تولید کرد که سبب ایجاد شکاف در گرافن می شود [۳۰].

روش دیگر برای تولید شکاف باند، اشباع کردن الکترون های آزاد در سطح گرافن می باشد که می تواند با پیوند دادن الکترون های آزاد با یک اتم خارجی انجام بگیرد. یکی از این اتم ها، اتم هیدروژن است. اتم خارجی دیگر اتم اکسیژن است که هر اتم اکسیژن با دو اتم کربن پیوند میدهد و نام این ماده اکسید گرافن است [۳۱].

روش دیگر جهت گشودن شکاف باند گرافن، کاهش عرض یک ورق گرافنی می باشد. به نظر می رسد که با محدود کردن الکترون بتوان به شکاف رسید. با تبدیل گرافن به نانونوارهای گرافنی می توان الکترون را در یک جهت محدود کرد و سبب باز شدن شکاف در گرافن شد. عموماً این روش برای نانونوار گرافنی در ساختار ترانزیستور استفاده شده است.

۵- خواص حرارتی گرافن

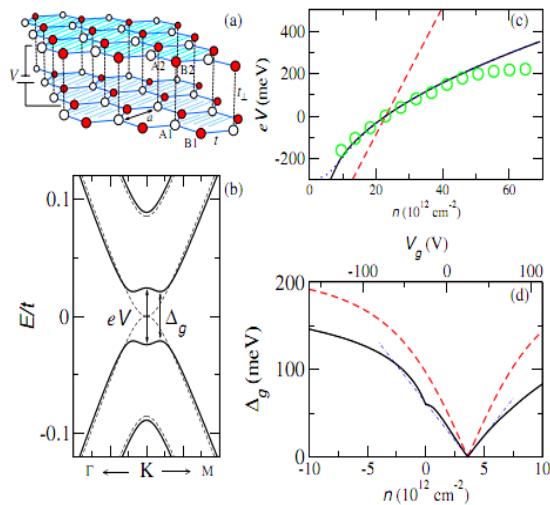
گرافن یک رسانای حرارتی کامل میباشد. اخیراً، رسانایی حرارتی گرافن در درجه حرارت اتاق اندازه گیری شده و بسیار بالاتر از مقدار مشاهده شده در تمام ساختارهای کربنی دیگر مانند نانولوله گرافنی، گرافیت و الماس یعنی بیشتر از ۵۰۰۰ وات بر متر درجه کلون میباشد. این پدیده با حضور امواج الاستیک

که الکترون بتواند طول بدون برخورد بالاتری را طی نماید. گرافن دارای طول برخورد در رنج چند میکرومتر است [۲۷].

۴- شکاف انرژی در گرافن

گرافن به سبب موبیلیتی بالا و ساختار دو بعدی ای که دارد برای کاربرد در الکترونیک بسیار مناسب می باشد. اما گرافن ماده ای با شکاف انرژی صفر است. شکاف باند صفر گرافن، آن را برای اعمال به ادوات دیجیتال که دارای نسبت سوئیچ زنی روشن به خاموش زیاد می باشند، سخت میکند. بنابراین برای استفاده در صنعت الکترونیک، نیازمند به گشودن شکاف انرژی در آن هستیم. بسیاری از محققان علاقه مند شدند تا شکاف انرژی در این ماده تولید کنند.

یکی از روش های تولید شکاف انرژی، استفاده از گرافن دولایه می باشد. گرافن دولایه در حالت طبیعی یک شکاف انرژی کوچک دارد. اما می توان با به کار بردن ولتاژی ما بین دولایه به شکاف بالاتر هم رسید. در شکل زیر ایجاد شکاف انرژی را در گرافن دولایه می بینیم [۲۸].

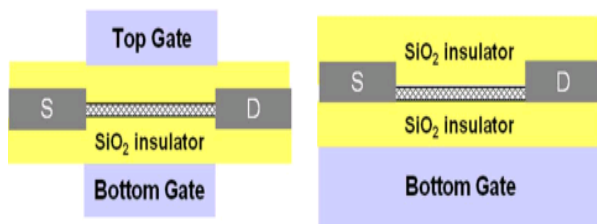


شکل ۹. ایجاد شکاف انرژی در گرافن دولایه [۲۸].

روش دیگر برای باز نمودن شکاف انرژی، به کاربردن یک کشش در پهنای گرافن است. در حقیقت کشش سبب می شود تقارن گرافن شکسته شود و تبهگنی موجود در بین دو لایه از بین برود که موجب خواهد شد یک شکاف باز شود. شکل ۱۰ شکاف انرژی ایجاد شده با اعمال کشش را نشان می دهد [۲۹].

تحقیق روی ترانزیستور اثر میدان گرافنی با کشف اثر میدان الکتریکی دو قطبی توسط نووسلوف و گیم در سال ۲۰۰۴ آغاز شد. آنها نشان دادند که خواص الکتریکی گرافن چند لایه تا حدود زیادی با گرافیت بالک که ساختاری سه بعدی است، فرق دارد. مقاومت ورقه های گرافن حداکثر چند کیلو اهم بوده و با تغییر ولتاژ گیت به صدها اهم کم می شود. پیک مقاومت که اغلب نقطه ی دیراک یا نقطه ی حداقل رسانایی نامیده میشود، در گرافن خالص تقریباً در ولتاژ صفر قرار دارد. مکان نقطه ی دیراک به تفاوت بین توابع کار گیت و گرافن، ناخالص سازی الکتریکی یا شیمیایی، نوع و چگالی حامل ها در رابط بالا و پایین کانال بستگی دارد.

یکی از سراسر ترین و مهم ترین کاربردهای گرافن، استفاده ی آن به عنوان کانال یک ترانزیستور می باشد. در شکل ۱۱ شمای کلی یک ترانزیستور مبتنی بر گرافن را می بینیم.



ب

الف

شکل ۱۱. شمای کلی الف) ترانزیستور مبتنی بر گرافن با یک گیت. ب) ترانزیستور مبتنی بر گرافن با دو گیت [۲۲].

ماده ی کانال در این نوع ترانزیستور میتواند گرافن تک لایه، دو لایه یا چندلایه باشد. عملکرد ترانزیستور تحت تاثیر تعداد لایه های گرافن در کانال قرار دارد چرا که خواص الکتریکی در هنگام بالارفتن از تک لایه به چند لایه تغییر می کند. تعداد لایه ها را میتوان با اندازه گیری رامان استخراج کرد [۳۳].

مقاومت ویژه اتصال برای عملکرد ترانزیستور گرافنی مهم می باشد. چون مقاومت زیاد ممکن است عملکرد قطعه را به طور کل کاهش دهد، در نتیجه خواص گرافن مانند قابلیت تحرک بالا و انتقال بالستیک گرافن از دست میرود. فلزات معمولی که به عنوان کنتاکت استفاده میشوند عبارتند از: تیتانیوم، طلا، کروم و پلاتین. برای ساخت این نوع ترانزیستورها مراحل زیر انجام می شوند [۳۴].

- تشخیص تعداد لایه ها با استفاده از روش های نوری و طیف نگاری رامان.

منتشر شده در شبکه ی گرافن که فونون نامیده میشود، کنترل میشود.

رسانایی حرارتی بالستیک گرافن، ایزوتروپیک است. یعنی در تمام جهت ها مشابه است. مشابه با سایر خواص فیزیکی این ماده، ساختار دو بعدیش آنرا منحصر به فرد میسازد. گرافیت نسخه ی سه بعدی گرافن است که رسانایی حرارتی حدود ۵ برابر کوچکتر، یعنی ۱۰۰ وات بر متر درجه کلون را نشان میدهد و رسانایی گرمایی مس در دمای اتاق ۴۰۱ وات بر متر درجه کلون است، یعنی گرافن ده برابر بهتر از مس گرما را منتقل میکند [۲۰].

۶- خواص مکانیکی گرافن

گرافن قویترین ماده ای است که تاکنون اندازه گیری شده است، گرافن از نظر مقاومتی سخت تر از الماس بوده و حدود ۳۰۰ برابر سخت تر از فولاد است. فرانک و همکارانش، ثابت فتر ورقه گرافن معلق را اندازه گرفته اند. ثابت فتر ورقه های گرافنی لایه ای با ضخامت بین ۲ و ۸ نانومتر در محدوده ی بین ۵ تا ۵ نیوتن بر متر قرار دارد که این محدوده براساس مقیاس گذاری ابعاد قطعه بدست آمده است.

مقاومت شکست گرافن ۴۲ نیوتن بر متر است. برای یک پوسته نازک فرضی از فولاد با ضخامت مشابه گرافن (ضخامت لایه ای ۳.۳۵ آنگستروم ازگرافیت)، مقاومت شکست در حدود ۰/۴۲ - ۰/۸۴ نیوتن بر مترمربع خواهد بود و نشانگر آنست که استحکام گرافن ۱۰۰ برابر فولاد است [۲۰].

۷- ترانزیستور اثر میدان مبتنی بر نانونوار گرافن

در سال ۱۹۵۶ گوردون مور بنیان گذار اینتل تحلیلی ارائه کرد که بر طبق آن هر ۱۸ ماه تعداد ترانزیستورهای به کار رفته در ریزپردازنده های اینتل دو برابر میشود که نصف شدن ابعاد گیت ترانزیستورها با شرط ثابت بودن اندازه تراشه سیلیکونی در آن میتواند نتیجه ی این قوانین باشد. این قانون به قانون مور موسوم شد. این نصف شدن در واقع پیام آور ابعاد اقتصادی بود یعنی هرچه گیت کوچکتر میشد ترانزیستور میتواند سریعتر سوئیچ کند و در نتیجه انرژی کمتر مصرف میشود و تعداد بیشتری ترانزیستور در یک تراشه سیلیکون جای میگرفت. ولی افزایش تعداد ترانزیستورها منجر به افزایش دما میشد. در این بین ماده ی گرافن با خواص منحصر به فردی که از خود نشان داد گزینه ی مناسبی برای جایگزینی با تکنولوژی سیلیکون به شمار آمد [۵].

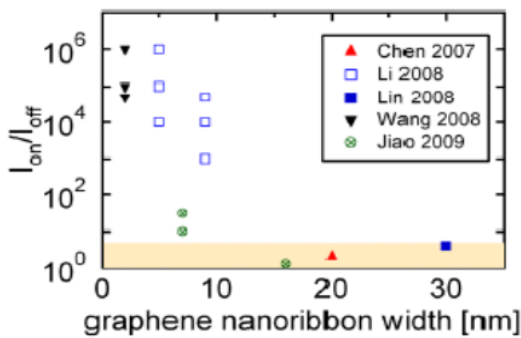
داشتن یک شکاف انرژی مناسب برای کاربردهای الکترونیکی، عرض نوارهای مذکور باید کمتر از ۱۰ نانومتر باشند.

آقای پونومارنکو و همکارانش توانستند با استفاده از روش لیتو گرافی باریکه الکترون، نوارهایی با عرض حدود ۱۰ نانومتر و شکاف تقریبی ۵۰۰ میلی الکترون ولت بسازند. مقاومت حالت خاموش ترانزیستورهایی که با این نوارها ساخته شده بودند در دمای اتاق قابل اندازه گیری نبود. آقای لی و همکارانش نیز به

روش دیگر توانستند نانونوارهای باریک بسازند. نسبت $\frac{I_{on}}{I_{off}}$

ترانزیستورهای ساخته شده با این نوارها بسیار خوب و بیش از 10^6 بود. نسبت های $\frac{I_{on}}{I_{off}}$ تجربی که طی سال های ۲۰۰۷ تا

۲۰۰۹ برای ترانزیستورهای مبتنی بر گرافن گزارش شده اند، در شکل ۲-۱۴ آورده شده است.



شکل ۱۴- نسبت های I_{on}/I_{off} بر حسب عرض نوارها که به طور تجربی بدست آمده اند [۳۵].

همانطور که گفته شد گرافن ماده ای با موبیلیتی بالا بوده و در ساخت ترانزیستورهای با سرعت بالا به کار میرود. سطح فرمی در گرافن ما بین باند هدایت و باند ظرفیت در نقطه ی دیراک می باشد. اگر یک ولتاژ مثبت در بالای گرافن به کار رود چگالی الکترون ها افزایش می یابد و گرافن شبیه یک نیمه هادی نوع دهنده حرکت می کند. در غیر اینصورت اگر یک ولتاژ منفی به کار برده شود گرافن شبیه یک نیمه هادی نوع پذیرنده عمل کند. به عبارتی دیگر به وسیله ی ولتاژ بالای گرافن می توانیم نوع و مقدار حامل های جریان را کنترل کنیم که این همان ترانزیستور اثر میدان است.

ترانزیستورهای اثر میدان نانونوار گرافنی دارای اتصالات سورس و درین بوده و کانال ما بین این اتصالات از جنس نانونوار گرافنی می باشد. در شکل ۱۴ نمای گرافن متصل به دو الکتروند دیده میشود.

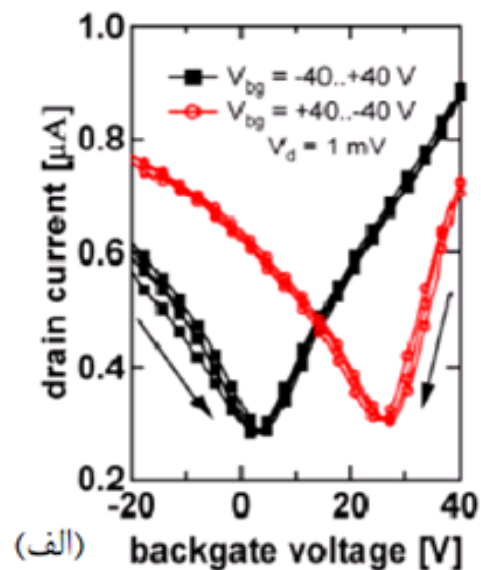
• مرحله ی اول لیتوگرافی و متالیزاسیون نواحی درین و سورس.

• فاز دوم لیتوگرافی برای برش مطلوب گرافن به عنوان کانال.

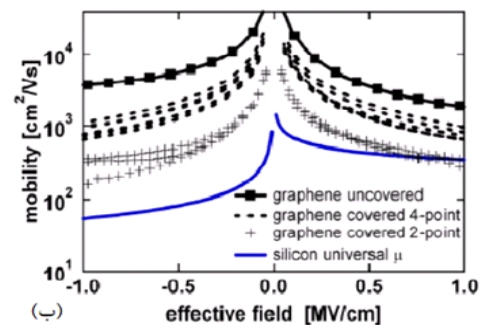
• قرار دادن لایه اکسید بر روی کانال.

• مرحله ی سوم لیتوگرافی و تشکیل فلز گیت رویی.

مشخصه ی انتقال این ترانزیستور در شکل ۱۲ (الف) نشان داده شده است. در این تصویر میتوان به عیبی بزرگ یعنی شکاف انرژی صفر پی برد. گرافن یک نیمه هادی با شکاف باند صفر است، این شکاف انرژی صفر به شدت مدولاسیون جریان را محدود کرده و باعث بروز رفتار دو قطبی می گردد. و نیز به سبب توزیع تصادفی بارهای به دام افتاده در اکسید و وجود گاف صفر، حتی بدون اعمال ولتاژ گیت، چگالی بار در کانال صفر نیست. در نتیجه این نوع ترانزیستورها حتی در مینیمم هدایت نیز از خود جریان عبور می دهند که مطلوب نمی باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۲. (الف) مشخصه ی انتقالی و (ب) تحرک پذیری الکترون [۴۲]

همانطور که قبلاً اشاره کردیم، یکی از روش های افزایش شکاف انرژی در گرافن، برش زدن و تبدیل به نوارهای باریک است. برای

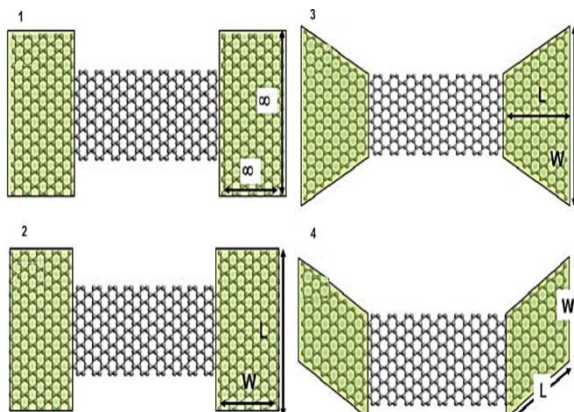
حالات گرافن با فرض توزیع فرمی-دیراک برای حامل های بار نتیجه شده است. و تقریباً به صورت خطی به ولتاژ کانال وابسته بوده و دارای حداقل مقدار پیرامون نقطه ی رسانایی مینیمم می باشد. به علاوه خازن باتوجه به نقطه ی دیراک متقارن است و توسط نقص ها و ناخالصی ها تحت تاثیر قرار دارد [۳۷]. رابطه خازن کوانتومی به صورت زیر میباشد:

$$C_q = \frac{2q^2 k_B T}{\pi (\hbar v_F)^2} \ln \left[2 \left(1 + \cosh \frac{qV_{ch}}{k_B T} \right) \right] \quad (6)$$

که k_B ثابت بولتزمن، \hbar ثابت پلانک و V_{ch} ولتاژ روی کانال گرافن می باشد. معادله فوق میتواند به طور تقریبی به صورت زیر نوشته شود:

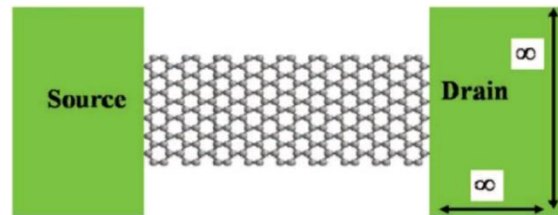
$$C_q \approx q^2 \frac{2qV_{ch}}{\pi (\hbar v_F)^2} = \frac{2q^2 \sqrt{n}}{\hbar v_F \sqrt{\pi}} \quad (7)$$

در واقع خصوصیات گفته شده در ساخت نانوترانزیستورها بسیار حائز اهمیت می باشد. این خصوصیات باعث می گردد انعطاف پذیری خوبی در ساخت ایجاد شود و انواع ترانزیستورها در ابعاد نانو در یک تراشه قرار گیرند و تولید مدار مجتمع کنند. به طور مثال میتوان نانو ترانزیستوری کاملاً گرافنی تولید کرد که دارای کانال آرمچیر نیمه هادی بوده و اتصالات از نوع گرافن زیگزاگ باشند. در شکل زیر انواع مختلف نانوترانزیستورهای گرافنی نشان داده شده اند.



شکل ۱۶. انواع ترانزیستورهای اثر میدانی نانونوار گرافن [۳۸].

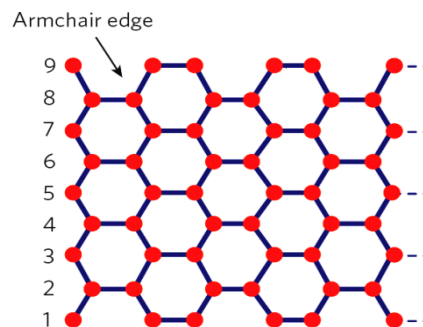
در شکل ۱۶ کانال تمام ترانزیستورها از نوع گرافن میباشد. اما اتصالات متفاوتی در این ترانزیستورها وجود دارد. به طور مثال شکل ۱۶ (۱) دارای اتصالات نیمه بی نهایت آرمچیر می باشد و با توجه به تقریب تنگ بست، این اتصالات دارای خاصیت شبه فلزی



شکل ۱۴. گرافن متصل به سورس و درین [۳۶].

یکی دیگر از خواص گرافن این است که گرافن در دو نوع شبه فلزی و نیمه هادی قابل ساخت است. کافیتست که برای استفاده از هر نوع خواص از برش های متفاوت به این خواص دست پیدا کرد. مثلاً گرافن با لبه های زیگزاگ دارای خواص شبه فلزی می باشد و گرافن با لبه های آرمچیر دارای خواص نیمه هادی است.

گرافن با لبه های آرمچیر می توانند نقش نیمه هادی و شبه فلزی از خود نشان دهد. اگر تعداد اتم های نانونوار گرافن در عرض نانونوار برابر با $3p+1$ ، $3p$ ، $3p+2$ در نظر گرفته شود که p عدد صحیح می باشد. نانونوار گرافنی که تعداد اتم های آن در عرض نانو نوار برابر با $3p+1$ ، $3p$ می باشد دارای خواص نیمه هادی است و نانونوار گرافنی که تعداد اتم های آن در عرض نانونوار برابر با $3p+2$ باشد دارای خواص شبه فلزی است. شکل ۱۵ نحوه ی شماره گذاری اتم ها را در عرض نانونوار گرافن نشان می دهد [۳۶].



شکل ۱۵. نانونوار گرافن با شماره گذاری اتم های عرض نانونوار [۳۶].

در این شکل عرض نانونوار از ۹ اتم کربن تشکیل شده است. عدد ۹ مضربی از ۳ بوده لذا این نانونوار گرافنی از خود خواص نیمه هادی را نشان میدهد. گرافن تحت میدان الکتریکی از خود رفتار خازنی نشان میدهد که به خازن کوانتومی اشاره دارد و به سبب پراکندگی انرژی خطی ویژه می باشد. در ترانزیستورهای اثر میدان گرافنی، رابط نیمه هادی-عایق-گرافن و لایه گرافنی، یک خازن سری با اکسید گیت اضافه مینماید که خازن کوانتومی گرافن بوده و باید در محاسبات وارد شود.

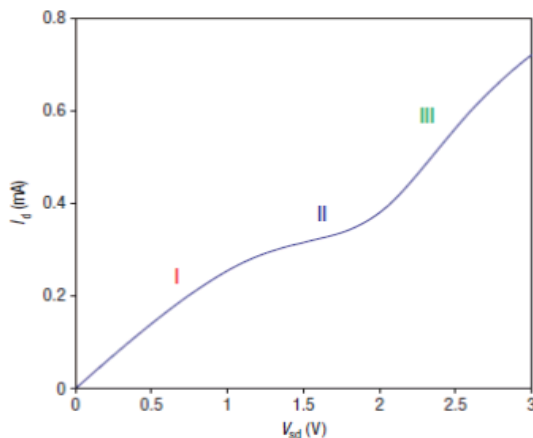
زمانی که ضخامت دی الکتریک گیت کاهش یافته باشد، خازن کوانتومی کانال باید در نظر گرفته شود. این خازن از چگالی

می باشند. شکل شماره ۲) نیز دارای اتصالات آرمچر شبه فلزی می باشد. در شکل های شماره ۳) و ۴) اتصالات از نوع زیگزاگ بوده که خاصیت شبه فلزی دارند. شکل ۱۶ گویای این مطلب است که در ساخت ترانزیستورهای نانونوار گرافنی انتخاب های زیادی برای ساخت وجود دارد و این امر از ویژگی های گرافن به شمار می رود.

در باب شبیه سازی ترانزیستور، ابعاد قطعه یکی از مهمترین فاکتورها می باشد. چنانچه بخواهد شبیه سازی در ابعاد میکرومتری صورت پذیرد از بحث انتقال کلاسیک و شبه کلاسیک استفاده می گردد. ولی شبیه سازی ترانزیستور اثر میدان نانونوار گرافنی که در حوزه ی ابعاد نانو می باشد باید در حیطه ی انتقال کوانتومی صورت گیرد. و از قوانین فیزیک کوانتوم پیروی نماید. در این حوزه از معادلات پایه ای همچون معادله شرودینگر برای ذره الکترون استفاده میشود. تاکنون شبیه سازی های متفاوتی برای این گونه از ترانزیستورها (اثر میدان نانونوار گرافن) به روش تابع گرین نامتعادل صورت گرفته است. به طور مثال، پاره ای از شبیه سازی ها به این صورت بوده که در آنها اتصالات از جنس ماده ای غیر از گرافن می باشد. بعضی از شبیه سازی ها با در نظر گرفتن همسایگی اول صورت پذیرفته اند در حالی که در برخی دیگر همسایگی سوم نیز در نظر گرفته شده است. در کل این دو نوع شبیه سازی مشخصات مشابه ای دارند ولی در لحاظ کردن نوع همسایگی با یکدیگر فرق دارند.

یک پدیده ی مهم مورد نیاز برای عملکرد ترانزیستور، اشباع جریان است. مریک و همکارانش در سال ۲۰۰۸، یک ترانزیستور اثر میدان گرافنی با اشباع جریان را نشان دادند. اشباع جریان نشان داده شده ناقص بود که این سوال را ایجاد کرد که آیا امکان اشباع کامل در گرافن وجود دارد. آنها پیشنهاد دادند که اشباع جریان به غلظت حامل بار متکی می باشد که توسط پراکندگی بینابین فونون در لایه ی SiO_2 که کانال را حفظ می کند، تحت تاثیر قرار دارد. اشباع جریان در گرافن به صورت نشان داده شده در شکل ۱۷ سه ناحیه دارد:

- در ناحیه ی اول بار توسط حفره ها در تمام طول کانال حمل شده است.
- ناحیه دوم یک ناحیه $pinch\ off$ را در درین زمانی که نقطه ی حداقل چگالی بار داریم، نشان میدهد.
- در ناحیه سوم الکترون ها شروع به شکل دهی کانال می کنند. با وجود فقدان شکاف باند و



شکل ۱۷. اشباع جریان در ترانزیستور اثر میدان گرافن در درجه حرارت اتاق [۳۹]

بارپیرو و همکارانش ادعا میکنند که به منظور اشباع کامل جریان، انتشار فونون بایستی به صورت لحظه ای بوده و فرآیندهای پراکندگی الاستیک قابل اغماض باشند که غیر ممکن است. بنابراین اشباع جریان هرگز در میدان های بالا کامل نمی شود. انتقال میدان به پراکندگی الاستیک حساس می باشد. آنها ادعا میکنند که نیاز است بزرگی موبیلیتی حداقل یک مرتبه افزایش یافته تا به اشباع جریان میدان بالا برسیم [۳۹].

۴. نتیجه گیری

ساختارهای نانومتری مبتنی بر کربن به علت خواص الکترونیکی بسیار مطلوب در سال های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته اند و به عنوان جایگزینی مناسب برای ساختارهای سیلیکونی مثل ترانزیستورها شناخته می شوند. گرافن تک لایه، ساختاری دو بعدی از اتم های کربن در یک شبکه لانه زنبوری می باشد که دارای سرعت بالا و جرم موثر کم حامل ها بوده و امروزه به یک موضوع مهم برای تحقیقات تبدیل شده است.

در این مقاله ابتدا به بررسی گرافن و ساختار اتمی آن پرداختیم، سپس ویژگی های آن را مورد مطالعه قرار دادیم. دیده شد که این ماده خواص الکترونیکی خوبی از خود نشان میدهد. در ادامه به بررسی کاربرد گرافن در ساختار ترانزیستورهای اثر میدانی پرداختیم. نتایج نشان میدهند که ترانزیستورهای اثر میدانی با کانال از جنس نانونوار گرافن نسبت جریان روشن به خاموش بسیار خوبی را دارا هستند



۵. منابع
- [14] W. A. de Heer, C. Berger, E. Conrad, P. First, R. Muralit and J Meindlt, “Pionics: the Emerging Science and Technology of Graphene-based Nanoelectronics”, IEEE electron device meeting, 2007.
- [15] K. Mohanram and J. Guo, “Graphene nanoribbon FETs: Technology exploration and CAD”, Proc. Intl. Conference Computer-aided Design, 2008.
- [16] W. Li and R. Tao, “Edge States of Monolayer and Bilayer Graphene”, J. Phys. Soc. Jpn. 2012 .
- [17] E. N. H. XIAN , “ Modeling and performance evaluation of the Graphene NanoRibbon Field Effect Transistor” , Universiti Teknologi Malaysia , 2010.
- [18] M. Fujita, K. Wakabayashi, K. Nakada and K. Kusakabe, “Peculiar Localized State at Zigzag Graphite Edge”, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 65, pp. 1920-1923, 1996.
- [19] Y. W. Son, M. L. Cohen, S. G. Louie, “Energy Gaps in Graphene Nanoribbons”, Physical Review Letters, Vol. 97, pp. 216803-216806, November 2006.
- [20] F. schwierz, “ graphene transistors”, nature nanotechnology ,VOL 5, 2010.
- [21] A. H. C. Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, “The electronic properties of graphene”, Rev. Mod. Phys., vol. 81, no. 1, pp. 109–162, 2009.
- [22] A. A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, and C. N. Lau, “Superior thermal conductivity of single-layer graphene”, Nano Lett., vol. 8, no. 3, pp. 902–907, 2008.
- [23] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos, and A. A. Firsov, “Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene”, Nature, vol. 438, pp. 197–200, 2005.
- [24] A.K. Geim and K.S. Novoselov, “THE RISE OF GRAPHENE”, Manchester Centre for Mesoscience and Nanotechnology, University of Manchester, Oxford Road M13 9PL, United Kingdom
- [25] M. I. Katsnelson, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, “Chiral tunneling and the Klein paradox in grapheme”, Institute for Molecules and Materials, Radboud University Nijmegen, 2006.
- [26] T. Tudorovskiy, K. J. A. Reijnders and M. I. Katsnelson, “Chiral tunneling in single-layer and
- [1] S. Datta , “ Quantum Transport: Atom to transistor ”, Cambridge University Press, Cambridge, MA, 2005.
- [2] Z. Chen, Y. M. Lin, M. J. Rooks, P. Avouris, “Graphene Nano-Ribbon Electronics”, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, Vol. 40, pp. 228-232, 2007.
- [3] Murali, Raghu, “Graphene Nanoelectronics From Materials to Circuits”, Springer, 2012, DOI: [10.1007/978-1-4614-0548-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0548-1).
- [4] H.-S. Philip Wong, Deji Akinwande, “Carbon Nanotube and Graphene Device Physics”, cambridge university press, 2011.
- [5] M. Akbari Eshkalak, R. Faez, S. Haji-Nasiri, “A novel graphene Nanoribbon field effect transistor with two different gate insulators,” Physica E, vol. 66, pp. 133–139, 2015.
- [6] A.C. Neto, F. Guinea, N.M. Peres, “ Drawing conclusions from graphene”, Physics world, 2006.
- [7] Yasushi IYEBHIKA, “ Application of Graphene to High-Speed Transistors :Expectations and Challenges”, QUARTERLY REVIEW No.3, 2010.
- [8] A. Sakhaee-Pour, “ Elastic properties of single-layered graphene sheet,” Science Direct, Volume 149, Issues 1–2, January 2009, Pages 91–95.
- [9] G. Fugallo, A. Cepellotti, L. Paulatto, M. Lazzeri, N. Marzari, and F. Mauri, “Thermal Conductivity of Graphene and Graphite: Collective Excitations and Mean Free Paths”, Nano Lett., 14 (11), pp 6109–6114, 2014.
- [10] C. Lee, X. Wei, J. Kysar and J. Hone, “ Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene”, Science, vol. 321, pp. 385–388, 2008.
- [11] E. Pop , V. Varshney , and A. K. Roy, “Thermal properties of graphene: Fundamentals and applications”, Materials Research Society, VOL. 37, Dec, 2012.
- [12] Q. Luo, “The elementary electronic properties of graphene”, Department of Physics and Astronomy, University of Tennessee, 2010.
- [13] C. Biswas, Y. H. Lee, “Graphene Versus Carbon Nanotubes in Electronic Devices”, Advanced Functional Materials, 2011.



- Journal of Applied Physics, vol. 167, no. 9, p. 094505, 2010.
- [38] E. McCann, D.S.L. Abergel and V.L. Fal'ko, "Electrons in bilayer graphene", Elsevier, 2007.
- [39] I. Meric, M. Y. Han, B. Ozyilmaz, P. Kim, and K. L. Shepard, "Current saturation in zero-bandgap, top-gated graphene field-effect transistors," Nature Nanotechnology, vol. 3, pp. 654–659, 2008.
- bilayer graphene", Physica Scripta, Volume 2012, T146.
- [27] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, "Electric field effect in atomically thin carbon films", Science, vol. 306, no. 5696, pp. 666–669, Oct. 2004.
- [28] L. Yarris, "Direct chemical vapor deposition used to create graphene", Science, Technology, APRIL 08, 2010.
- [29] Z. Ni, H. M. Wang, Y. Ma, J. Kasim, Y. H. Wu, and Z. X. Shen. "Tunable Stress and Controlled Thickness Modification in Graphene by Annealing", ACS nano, vol. 2, pp.1033-1039, 2008.
- [30] B. Gharekhanlou, M. Alavi, and S. Khorasani, "Tight-binding description of patterned graphene", Semicond. Sci. Technol., vol. 23, no. 7, p. 075026, 2008.
- [31] S. Stankovich, D. A. Dikin, R. D. Piner, K. A. Kohlhaas, A. Kleinhammes, Y. Y. Jia, Y. Wu, S. T. Nguyen, R. S. Ruoff, "Synthesis of graphene-based nano sheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide", Carbon, vol. 45, pp.1558-1565, Mar. 2007.
- [32] Y. Ouyang, Y. Yoon, and J. Guo, "Scaling Behaviors of Graphene Nanoribbon FETs: A Three-Dimensional Quantum Simulation Study", IEEE Trans, VOL. 54, NO. 9, 2007.
- [33] A. Das, S. Pisana, B. Chakraborty, S. Piscanec, S. Saha, U. Waghmare, K. Novoselov, H. Krishnamurthy, A. Geim, A. Ferrari, and A. Sood, "Monitoring dopants by Raman scattering in an electrochemically top-gated graphene transistor", Nature Nanotechnology, vol. 3, pp. 216–215, 2008.
- [34] F. Xia. "Graphene field-effect-transistors with high on/off current ratio and large transport bandgap at room temperature", Nano Letters, Volume 10, Issue 2, 2010.
- [35] M.C. Lemme, "Current status of graphene transistors", Solid state phenomena, Vols. 156-158, 2010.
- [36] G. Liang, N. Neophytou, M.S. Lundstrom, and D.E. Nikonov, "Contact Effects in Graphene Nanoribbon Transistors", American Chemical Society, 2008.
- [37] S. Thiele, J. Schaefer, and F. Schwierz, "Modeling of graphene metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with gapless large-area graphene channels",