

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد  
گرایش الکترونیک نوری و نیمه هادی

# **طراحی و شبیه سازی ترانزیستور اثر میدان گرافنی با نواحی سورس و درین مهندسی شده**

امیر رستمی

استاد راهنما:

دکتر داود فتحی

بهمن ماه ۱۳۹۳

تقدیم بہ

پدر  
پ

و

مادر

عزیزم ...

## تشکر و قدردانی

پس از حمد و سپاس آن یگانه آفریدگار،

بر خود لازم می دارم که از زحمات استاد ارجمندم جناب آقای دکتر فتحی و همچنین همه دوستانی که در انجام این پروژه مرا یاری کردند، تشکر و قدردانی نمایم.

## چکیده

جریان خاموشی بالا و کم بودن نسبت جریان روشن به خاموش در ترانزیستور های اثر میدان مبتنی بر نانونوار گرافن، یکی از معایب و مشکلات مجتمع سازی این نوع افزاره ها است. در نتیجه بر آن شدیم تا ساختار هایی را معرفی کنیم که این مشکلات را به حداقل برسانیم.

در این پایان نامه عملکرد ترانزیستور های اثر میدان مبتنی بر نانونوار گرافن و همچنین مهندسی اتصالات سورس و درین در این ترانزیستورها به منظور کاهش جریان خاموشی و افزایش نسبت جریان روشن به خاموش در حالت بالستیک بررسی شده است. به منظور کاهش جریان خاموشی دو ساختار ارائه گردیده است. در ساختار پیشنهادی اول، با قرار دادن سه ناحیه با چگالی های مختلف در اتصالات سورس و درین ترانزیستور، مشخصات جریان خاموشی و همچنین نسبت جریان روشن به خاموش در آن بهبود یافته است. در ساختار پیشنهادی دوم، در اتصالات سورس و درین، از یک نانونوار آرمچیر با عرض زیاد استفاده شده است و همین طور که به سمت کانال می رویم تا سه مرحله از این عرض کاسته می شود. قسمت مرکزی این نانونوار به عنوان کانال ترانزیستور در نظر گرفته می شود که دارای  $n=12$  اتم در عرض ( $1/37$  نانومتر) می باشد. با این مهندسی ساختار، جریان خاموشی به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش یافته و به موجب آن نسبت جریان روشن به خاموش نیز افزایش می یابد. همچنین ساختار های پیشنهادی، شیب زیر آستانه بهتری را از خود نشان می دهند.

به منظور شبیه سازی ترانزیستور اثر میدان گرافنی، معادله های پواسن و شرودینگر به روش خودسازگار و با استفاده از تابع گرین غیر تعادلی و با در نظر گرفتن تنها اوربیتال  $p_z$  حل می شوند. همچنین به منظور افزایش سرعت در همگرایی جواب و کاهش زمان محاسبات در فضای حقیقی، از روش سانچو استفاده شده است. ضمناً برای به دست آوردن ساختار باند انرژی نانونوار گرافنی از روش تنگ بست و با در نظر گرفتن همسایگی سوم و اثرات لبه نانونوار استفاده می شود. گفتنی است که از دو نرم افزار MATLAB و NANOTCAD برای شبیه سازی ساختارهای پیشنهادی استفاده شده است.

**کلید واژه:** ترانزیستور اثر میدان گرافنی، نانونوار گرافنی، روش تنگ بست، تابع گرین غیر تعادلی.

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست جدول ها .....	ت
فهرست شکل ها .....	ث
<b>فصل ۱- مقدمه</b> .....	۱
۱-۱- گرافن .....	۱
۱-۱-۱- ویژگی های الکتریکی گرافن .....	۳
۲-۱-۱- روش های ساخت گرافن .....	۵
۳-۱-۱- انواع هیبریداسیون در اتم های کربن .....	۷
۴-۱-۱- روش های ایجاد شکاف انرژی در گرافن .....	۸
۲-۱- ساختار باند انرژی گرافن .....	۱۱
۱-۲-۱- مدل تنگ بست .....	۱۲
۳-۱- اهداف کلی و روند پایان نامه .....	۱۶
<b>فصل ۲- ترانزیستورهای اثر میدان</b> .....	۱۷
۱-۲- مقدمه .....	۱۷
۲-۲- ترانزیستور های اثر میدان مبتنی بر نانو نوار گرافن .....	۱۸
۳-۲- ترانزیستور های اثر میدانی با سد شاتکی .....	۱۹
۱-۳-۲- ترانزیستور های اثر میدان مبتنی بر نانو نوار گرافن با سد شاتکی .....	۱۹
۲-۳-۲- مدل جریان - ولتاژ برای ترانزیستور های گرافنی با سد شاتکی .....	۲۲
۴-۲- ترانزیستور های اثر میدانی تونلی .....	۲۶
۱-۴-۲- ترانزیستور های اثر میدان تونلی با ثابت دی الکتریک بالا .....	۲۶
۲-۴-۲- ترانزیستور تونلی ناهمگون مبتنی بر نانو نوار گرافن .....	۳۰
۳-۴-۲- ترانزیستور تونلی با دو فلز گیت متفاوت .....	۳۲
۵-۲- ترانزیستور های اثر میدانی معمولی مبتنی بر نانو نوار گرافن .....	۳۵
۱-۵-۲- ترانزیستور های اثر میدان مبتنی بر نانو نوار گرافن با تک گیت بالا .....	۳۵
۲-۵-۲- ترانزیستور های اثر میدان مبتنی بر نانو نوار گرافن با دو گیت بالا و پایین .....	۳۶
۳-۵-۲- ترانزیستور های اثر میدان مبتنی بر نانو نوار گرافن در حالت بالستیک و در فضای حقیقی .....	۳۸
۶-۲- جمع بندی .....	۳۹

فصل ۳ - رویکرد شبیه سازی	۴۰
۱-۳- مقدمه	۴۰
۲-۳- فیزیک نانو ترانزیستورها با انتقال بالستیک	۴۰
۳-۳- شبیه سازی ترانزیستور اثر میدان گرافنی	۴۳
۱-۳-۳- حل معادله پواسن	۴۳
۲-۳-۳- معرفی روش تفاضل محدود و گسسته سازی معادله پواسن	۴۶
۳-۳-۳- حل معادله شرودینگر	۴۷
۴-۳-۳- فرمول بندی تابع گرین غیر تعادلی	۴۹
۵-۳-۳- محاسبه جریان	۵۲
۴-۳- مدل تابع گرین غیر تعادلی	۵۳
۵-۳- روش های تکرار برای به دست آوردن تابع گرین سطحی	۵۶
۱-۵-۳- معادلات درجه دوم ماتریسی	۵۶
۲-۵-۳- روش سانچو	۵۷
۳-۵-۳- نتیجه شبیه سازی با روش های معمولی	۶۰
فصل ۴ - نتایج شبیه سازی	۶۱
۱-۴- مقدمه	۶۱
۲-۴- شبیه سازی ساختار باند نانو نوار گرافن	۶۱
۳-۴- شبیه سازی ترانزیستور اثر میدان گرافنی	۶۶
۴-۴- ساختار پیشنهادی اول	۷۰
۵-۴- ساختار پیشنهادی دوم	۷۳
فصل ۵ - نتیجه گیری و پیشنهادات	۷۸
۱-۵- نتیجه گیری	۷۸
۲-۵- پیشنهادات	۷۹
فهرست مراجع	۸۰

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۶	جدول ۱-۱: خلاصه ای از روش های سنتز گرافن [۲۴].....
۱۶	جدول ۲-۱: پارامترهای تنگ بست برای همسایگی اول و سوم [۳۵].....
	جدول ۱-۴: مقایسه شیب زیر آستانه بر حسب (mV / dec) و نسبت جریان حالت روشن به حالت خاموش $I_{ON}/I_{OFF}$
۷۷	برای ساختارهای مختلف ..... [۳۵]



## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۱	شکل ۱-۱: ساختار شبکه الف (گرافیت ب) گرافن ج) نانولوله کربنی د) فولرن [۱] .....
۲	شکل ۲-۱: ساختار گرافیت و مواد بین لایه ای آن [۱] .....
۳	شکل ۳-۱: مقایسه سرعت پیشرفت و توسعه افرازه های مبتنی بر نانولوله کربنی و گرافن [۷] .....
۴	شکل ۴-۱: چگالی حالات برای یک صفحه گرافیتی [۹] .....
۴	شکل ۵-۱: نمودار جرم سیکلوترون برحسب چگالی الکترون ها [۶] .....
۷	شکل ۶-۱: اوربیتال های مولکولی هیبریدی اتم های کربن در آلکان ( $sp^3$ )، آلکن ( $sp^2$ ) و آلکین ( $sp$ ) [۲۵] .....
۸	شکل ۷-۱: نمایش پیوندهای قوی $\sigma$ و پیوندهای ضعیف $\pi$ .....
۹	شکل ۸-۱: اعمال پتانسیل به گرافن دولایه و تولید گاف انرژی [۲۶] .....
۹	شکل ۹-۱: ایجاد گاف انرژی با اعمال کشش به گرافن [۲۷] .....
۱۰	شکل ۱۰-۱: نمودار گاف انرژی در نانونوار گرافن برحسب عرض های مختلف [۲۸] .....
۱۰	شکل ۱۱-۱: نانو نوار گرافن الف) زیگزاگ ب) آرمچیر [۲۹] .....
۱۲	شکل ۱۲-۱: ساختار شبکه گرافن. دایره های موجود در شکل به ترتیب همسایگی اول، دوم و سوم را برای اتم مرجع صفر نشان می دهند [۳۲] .....
۱۵	شکل ۱۳-۱: ساختار نوار انرژی گرافن [۳۳] .....
۱۶	شکل ۱۴-۱: منحنی پاشندگی انرژی برای شبکه گرافن با در نظر گرفتن الف) همسایگی اول ب) همسایگی سوم [۳۵] .....
۱۷	شکل ۱-۲: نمودار ارزیابی طول گیت ترانزیستور اثر میدان با در نظر گرفتن استاندارد نقشه راه تکنولوژی بین المللی نیمه هادی ها [۷] .....
۱۹	شکل ۲-۲: ساختار یک ترانزیستور اثر میدان مبتنی بر نانونوار گرافن با سد شاتکی .....
۲۰	شکل ۳-۲: دیاگرام نوار انرژی برای یک ترانزیستور اثر میدان مبتنی بر نانونوار گرافن با سد شاتکی به ازای ولتاژ $V_{DS} = 0V$ و ولتاژ گیت-سورس های مختلف .....

شکل ۲-۴: دیاگرام نوار انرژی یک ترانزیستور اثر میدان مبتنی نانونوار گرافن با سد شاتکی به ازای  $V_{GS}=V_{DS}/2$  ..... ۲۰

شکل ۲-۵: دیاگرام نوار انرژی یک ترانزیستور اثر میدان مبتنی نانونوار گرافن با سد شاتکی به ازای الف)  $V_{GS}>V_{DS}/2$  ب)  $V_{GS}<V_{DS}/2$  ..... ۲۱

شکل ۲-۶: منحنی  $I_{DS}-V_{DS}$  برای ترانزیستور اثر میدان مبتنی بر نانونوار گرافن با سد شاتکی و به ازای ولتاژ  $V=0.4$  و  $V_{DS}=V_{GS}$ . ضخامت اکسید  $1/5$  نانومتر است ..... ۲۲

شکل ۲-۷: الف) شماتیک ساختار ب) نمای از بالای نانونوار گرافن از نوع آرمچیر به عنوان کانال ج) دیاگرام باند در جهت طول [۳۷] ..... ۲۳

شکل ۲-۸: مشخصه انتقال برای ترانزیستور اثر میدان مبتنی بر گرافن. مستطیل پایین شکل، مشخصه ی خروجی را نشان می دهد. جریان کل، از مشارکت جریان تونل زنی الکترون ها و حفره ها به دست می آید [۳۷] ..... ۲۴

شکل ۲-۹: تاثیر الف) عرض نانونوار و ب) ارتفاع سد شاتکی در مشخصه انتقال [۳۷] ..... ۲۵

شکل ۲-۱۰: اثر کوچک سازی ضخامت عایق گیت روی مشخصه انتقال. مستطیل پایین شکل اثر کوچک سازی را روی شیب زیر آستانه در ولتاژ  $V=0.75$  نشان می دهد [۳۷] ..... ۲۵

شکل ۲-۱۱: الف) شماتیک یک ترانزیستور اثر میدان تونلی با دو گیت بالا و پایین ب) دیاگرام باند انرژی در حالت خاموش یعنی  $V_G=0$  و  $V_D=1$  ج) دیاگرام باند انرژی در حالت روشن یعنی  $V_G=1/5$  و  $V_D=1$  [۳۸] ..... ۲۶

شکل ۲-۱۲: مشخصه ی  $I_D-V_G$  با  $V_D=1$  برای ترانزیستور اثر میدان تونلی در طول های مختلف برای الف) ثابت دی الکتریک ۲۵ ب) ثابت دی الکتریک  $3/9$  [۳۸] ..... ۲۷

شکل ۲-۱۳: مشخصه ی  $I_D-V_G$  (محور  $y$  سمت چپ) و رسانای (محور  $y$  سمت راست) در مقیاس خطی با  $V_D=1$  برای ترانزیستور اثر میدان تونلی در طول های مختلف برای الف) ثابت دی الکتریک ۲۵ ب) ثابت دی الکتریک  $3/9$  [۳۸] ..... ۲۸

شکل ۲-۱۴: الف) مشخصه ی خروجی  $I_D-V_D$  در محور لگاریتمی ب) مشخصه ی خروجی  $I_D-V_D$  در مقیاس خطی ج)  $g_{ds}$  در ولتاژ  $V_G=1/5$  برای ترانزیستور اثر میدان تونلی در طول های  $1000$  و  $100$  و  $20$  nm و در دو حالت ثابت دی الکتریک ۲۵ و  $3/9$  [۳۸] ..... ۲۹

شکل ۲-۱۵: ساختار ترانزیستور اثر میدان تونلی ناهمگون الف) نمای از کنار ب) نمای از بالا ، ضخامت اکسید  $1$  nm طول گیت  $16$  nm ، طول و عرض ناحیه ی ناهمگون به ترتیب برابر  $L_{HJ}=1$  nm و  $W_{HJ}=2.5$  nm [۳۹] ..... ۳۰

- شکل ۲-۱۶: مشخصه ی  $I_{DS}-V_{GS}$  در ولتاژ  $V_{DS}= 0.6 V$  و به ازای دوپینگ های مختلف  $10^7 m^{-1} \times 49/8$  و  $25/1$  ،  $N=N_S=N_D= 3/83$  ،  $8$  ، [۳۹] ..... ۳۱
- شکل ۲-۱۷: پروفایل پتانسیل با  $10^7 m^{-1} \times 8$  در الف) حالت خاموش ج) حالت روشن. پروفایل پتانسیل برای  $m^{-1}$   $10^7 \times 38/3 \times N$  در ب) حالت خاموش د) حالت روشن [۳۹] ..... ۳۱
- شکل ۲-۱۸: الف) ساختار ترانزیستور مبتنی بر تونل زنی متداول ب) ساختار بهبود یافته [۴۰] ..... ۳۲
- شکل ۲-۱۹: مشخصه ی  $I_{DS}-V_{GS}$  برای ترانزیستور مبتنی بر تونل زنی متداول و ساختار بهبود یافته [۴۰] ..... ۳۳
- شکل ۲-۲۰: نسبت جریان روشن به خاموش برای ترانزیستور مبتنی بر تونل زنی متداول و ساختار بهبود یافته [۴۰] ..... ۳۴
- شکل ۲-۲۱: شماتیک ترانزیستور ساخته شده با تک گیت بالا [۴۱] ..... ۳۵
- شکل ۲-۲۲: منحنی مشخصه ی الف)  $I_{ds}-E_{bg}$  ب)  $I_{ds}-E_{tg}$  برای ترانزیستور ساخته شده با تک گیت بالا [۴۱] ..... ۳۵
- شکل ۲-۲۳: مشخصات انتقال برای دو ترانزیستور اثر میدان مبتنی بر نانونوار گرافن و نانولوله کربنی با نواحی سورس و درین دوپ شده. در مستطیل پایین شکل، ساختار ترانزیستور نشان داده شده است [۴۲] ..... ۳۶
- شکل ۲-۲۴: مشخصه جریان بر حسب ولتاژ گیت الف) منحنی لگاریتمی ب) منحنی خطی برای نانونوار های با ۱۲ ، ۱۴ و ۱۶ اتم در عرض [۴۲] ..... ۳۷
- شکل ۲-۲۵: الف) شماتیک ترانزیستور اثر میدان مبتنی بر نانونوار گرافن با دو گیت بالا و پایین ب) نانونوار استفاده شده در ساختار [۴۳] ..... ۳۸
- شکل ۲-۲۶: الف) منحنی جریان  $I_{DS}-V_{DS}$  به ازای عرض  $1/4$  نانومتر و طول کانال  $12/5$  نانومتر ب) منحنی جریان  $I_{DS}-V_{GS}$  به ازای عرض های  $1/4$  و  $1/8$  نانومتر و طول کانال  $12/5$  نانومتر در ولتاژ  $V_{DS}= 0.4 V$  [۴۳] ..... ۳۹
- شکل ۳-۱: ساختار یک ترانزیستور اثر میدان با دو گیت. ضخامت بدنه و همچنین ضخامت اکسید  $1/5$  نانومتر است. هر دو ناحیه ی سورس و درین به میزان  $10^{20} /cm^3$  ناخالص شده اند [۴۴] ..... ۴۰
- شکل ۳-۲: تابع توزیع بالستیک برای ترانزیستور اثر میدان در حالت روشن [۴۴] ..... ۴۱
- شکل ۳-۳: الف) چگالی حالات بر حسب مکان ب) چگالی الکترون بر حسب مکان [۴۴] ..... ۴۱
- شکل ۳-۴: دیگرام باند انرژی در لبه نوار هدایت و به ازای ولتاژهای مختلف برای گیت الف)  $V_{ds}= 0.5 V$  ب)  $0.6 V$  ..... ۴۲
- شکل ۳-۵: شماتیک ساختار یک ترانزیستور اثر میدان مبتنی بر نانو نوار گرافن به همراه نحوه مش بندی ..... ۴۵

- شکل ۳-۶: نانونوار آرمچیر که اتم های کربن موجود در لبه با اتم های هیدروژن پیوند برقرار کرده است. مستطیل های مشکی و قرمز نشان دهنده سلول واحد می باشد که شامل چهار اتم کربن است. مستطیل های نقطه چین ابر سلول واحد می باشند ..... ۴۷
- شکل ۳-۷: انتخاب ابر سلول واحد در اتصالات سورس و درین [۴۹] ..... ۵۰
- شکل ۳-۸: الگوریتم خودسازگار بین معادله ی پوآسن و معادله ی شرودینگر که از روال تابع گرین غیر تعادلی به دست می آید ..... ۵۲
- شکل ۳-۹: مدل شبه یک بعدی نانونوار گرافن که دارای اتصالات نیمه بی نهایت می باشد [۵۰] ..... ۵۳
- شکل ۳-۱۰: منحنی لگاریتمی خطا بر حسب تعداد چرخش ..... ۶۰
- شکل ۴-۱: ساختار باند نانو نوار گرافن از نوع آرمچیر با ۱۲ ، ۱۰ ، ۸  $n$  اتم در عرض و با در نظر گرفتن همسایگی اول ..... ۶۲
- شکل ۴-۲: چگالی حالات بر حسب انرژی برای نانو نوار با ۱۲ و ۱۰  $n$  اتم در عرض و با در نظر گرفتن اثر همسایگی اول ..... ۶۲
- شکل ۴-۳: ساختار باند نانو نوار گرافن از نوع آرمچیر با ۱۲ ، ۱۰ ، ۸  $n$  اتم در عرض و با در نظر گرفتن همسایگی سوم ..... ۶۳
- شکل ۴-۴: ضریب انتقال بر حسب انرژی برای نانو نوار با ۱۲ و ۱۰  $n$  اتم در عرض و با در نظر گرفتن اثر همسایگی سوم ..... ۶۴
- شکل ۴-۵: ساختار باند نانو نوار گرافن از نوع آرمچیر با ۱۲ ، ۱۰ ، ۸  $n$  اتم در عرض و با در نظر گرفتن اثرات لبه نانو نوار گرافن ..... ۶۵
- شکل ۴-۶: ضریب انتقال بر حسب انرژی برای نانو نوار با ۱۲ و ۱۰  $n$  اتم در عرض و با در نظر گرفتن اثرات لبه ی نانو نوار گرافن ..... ۶۶
- شکل ۴-۷: ساختار ترانزیستور اثر میدان مبتنی بر نانو نوار گرافن شبیه سازی شده با دو گیت بالا و پایین و طول کانال ده نانومتر ..... ۶۷
- شکل ۴-۸: منحنی مشخصه ی  $I_{DS}-V_{GS}$  در ولتاژ درین-سورس ۰/۴ ولت (شکل سمت راست) و هدایت انتقالی (شکل سمت چپ) برای ترانزیستور اثر میدان گرافنی شبیه سازی شده ..... ۶۷
- شکل ۴-۹: دیاگرام باند انرژی بر حسب طول افزاره برای ترانزیستور اثر میدان گرافنی معمولی شبیه سازی شده در ولتاژ  $V_{DS}= 0.4 V$  و  $V_{GS}= -0.4 V$  ..... ۶۸

شکل ۴-۱۰ منحنی مشخصه ی  $I_{DS}-V_{GS}$  در ولتاژ درین-سورس ۰/۴ ولت (شکل سمت چپ) و منحنی مشخصه ی  $I_{DS}-V_{DS}$  در ولتاژ گیت-سورس ۰/۴ ولت. دوپینگ سمت درین ثابت و دوپینگ سمت سورس به میزان ۰/۰۰۱ ، ۰/۰۰۳ ، ۰/۰۰۷ و ۰/۰۰۹ اتم دوپ بر تعداد اتم می باشد ..... ۶۸

شکل ۴-۱۱ منحنی مشخصه ی  $I_{DS}-V_{GS}$  در ولتاژ درین-سورس ۰/۴ ولت (شکل سمت چپ) و منحنی مشخصه ی  $I_{DS}-V_{DS}$  در ولتاژ گیت-سورس ۰/۴ ولت. دوپینگ سمت سورس ثابت و دوپینگ سمت درین به میزان ۰/۰۰۱ ، ۰/۰۰۳ ، ۰/۰۰۷ و ۰/۰۰۹ اتم دوپ بر تعداد اتم می باشد ..... ۶۹

شکل ۴-۱۲ شماتیک ساختار پیشنهادی اول با دو گیت بالا و پایین و طول کانال ۱۰ نانومتر. طول هر کدام از بخش های سورس و درین ۵ نانومتر می باشد و دوپینگ بخش های اول تا سوم در آن به ترتیب برابر با ۰/۰۰۹ ، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۱ اتم دوپ بر تعداد اتم می باشد ..... ۷۰

شکل ۴-۱۳ منحنی مشخصه ی  $I_{DS}-V_{GS}$  در ولتاژ درین-سورس ۰/۴ ولت (شکل سمت چپ) و منحنی مشخصه ی  $I_{DS}-V_{DS}$  در ولتاژ گیت-سورس ۰/۱ ، ۰/۳ و ۰/۴ ولت (شکل سمت راست) برای ساختار پیشنهادی اول و همچنین ترانزیستور اثر میدان گرافنی معمولی ..... ۷۱

شکل ۴-۱۴ دیاگرام باند انرژی برحسب فاصله برای ساختار پیشنهادی اول در ولتاژ  $V_{GS} = -0.4 V$  و  $V_{DS} = 0.4 V$  ..... ۷۱

شکل ۴-۱۵ چگالی جریان برای ساختار پیشنهادی اول در ولتاژ  $V_{GS} = -0.4 V$  و  $V_{DS} = 0.4 V$  ..... ۷۲

شکل ۴-۱۶ هدایت انتقالی ( $g_m$ ) برای ساختار پیشنهادی اول و مقایسه آن با ترانزیستور اثر میدان گرافنی معمولی (شکل سمت چپ) و منحنی نسبت جریان حالت روشن به خاموش بر حسب جریان حالت روشن برای ساختار پیشنهادی اول و مقایسه با ترانزیستور اثر میدان گرافنی معمولی (شکل سمت راست) ..... ۷۲

شکل ۴-۱۷ منحنی مشخصه جریان درین-سورس برحسب ولتاژ گیت-سورس ساختار پیشنهادی اول در دو حالت طول کانال ۱۰ و ۱۵ نانومتر ..... ۷۳

شکل ۴-۱۸ شماتیک ساختار پیشنهادی دوم با دو گیت بالا و پایین و طول کانال ۱۰ نانومتر. طول هر کدام از بخش های سورس و درین ۵ نانومتر می باشد. تعداد اتم های موجود در عرض نانو نوار گرافن در ناحیه ی کانال برابر  $n = 12$  و در بخش های سورس و درین به ترتیب برابر ۲۴ ، ۳۶ ، ۴۸ اتم در عرض می باشد ..... ۷۴

شکل ۴-۱۹ نانو نوار مورد استفاده در ساختار پیشنهادی دوم و نحوه ی انتخاب آن ها ..... ۷۵

شکل ۴-۲۰ منحنی مشخصه ی  $I_{DS}-V_{GS}$  در ولتاژ درین-سورس ۰/۴ ولت (شکل سمت چپ) و منحنی مشخصه ی  $I_{DS}-V_{DS}$  در ولتاژ گیت-سورس ۰/۱ ، ۰/۳ و ۰/۴ ولت (شکل سمت راست) برای ساختار پیشنهادی دوم و مقایسه با ساختار پیشنهادی اول و ترانزیستور اثر میدان گرافنی معمولی ..... ۷۵

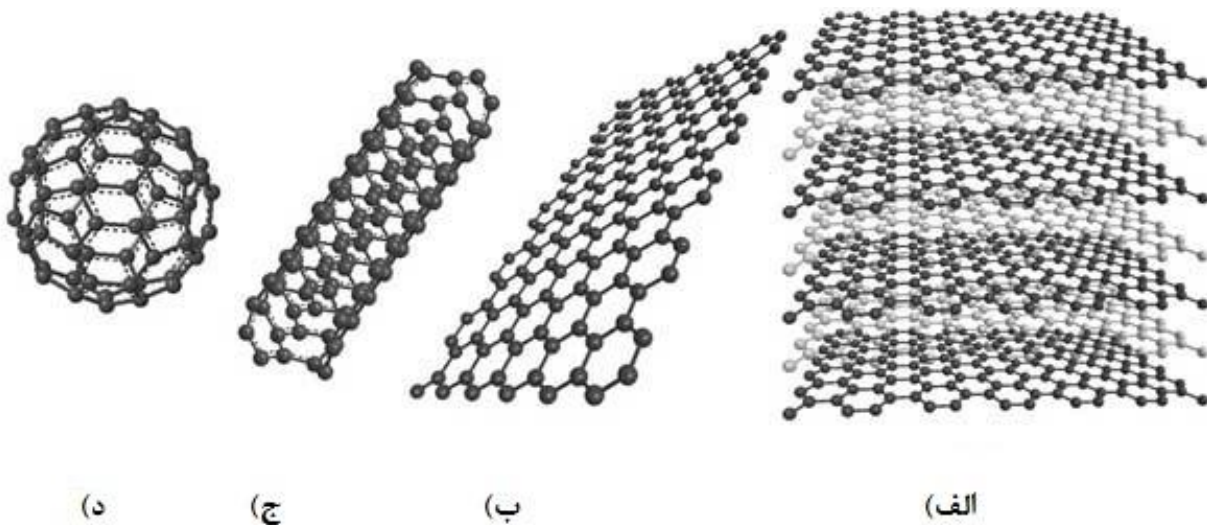
شکل ۴-۲۱ منحنی دیاگرام باند و چگالی حالت ها برای ساختار پیشنهادی دوم (شکل سمت راست) و همچنین ترانزیستور اثر میدان گرافنی معمولی (شکل سمت چپ) ..... ۷۶

شکل ۴-۲۲ هدایت انتقالی (gm) برای ساختار پیشنهادی دوم و مقایسه آن با ترانزیستور اثر میدان گرافنی معمولی (شکل سمت چپ) و منحنی نسبت جریان حالت روشن به خاموش بر حسب جریان حالت روشن برای ساختار پیشنهادی دوم و مقایسه با ساختار پیشنهادی اول و همچنین ترانزیستور اثر میدان گرافنی معمولی ..... ۷۷

## فصل ۱ - مقدمه

### ۱-۱ - گرافن

گرافن<sup>۱</sup> یک شبکه دو بعدی از اتم های کربن می باشد که در یک ساختار شش ضلعی منظم تشکیل می شود. این ساختار دو بعدی بلوک پایه ای برای نانو نوارهای گرافنی<sup>۲</sup>، نانو لوله های کربنی<sup>۳</sup>، گرافیت<sup>۴</sup> و ... بوده و جدیدترین عضو خانواده مواد کربنی چند بعدی می باشد. این خانواده شامل فولرن به عنوان نانوماده صفر بعدی، نانولوله های کربنی به عنوان نانوماده یک بعدی و گرافیت به عنوان یک ماده سه بعدی می باشد (شکل ۱-۱). در واقع گرافن یک تک لایه از گرافیت است که در یک ساختار بزرگتر مانند ترکیبات بین لایه ای گرافیت مورد استفاده قرار می گیرد و در شکل ۱-۲ نشان داده شده است [۱]. در ساختار شبکه ی گرافن هر اتم کربن با سه اتم مجاور پیوند داده و دارای یک الکترون آزاد می باشد که در هدایت الکتریکی شرکت می کند.



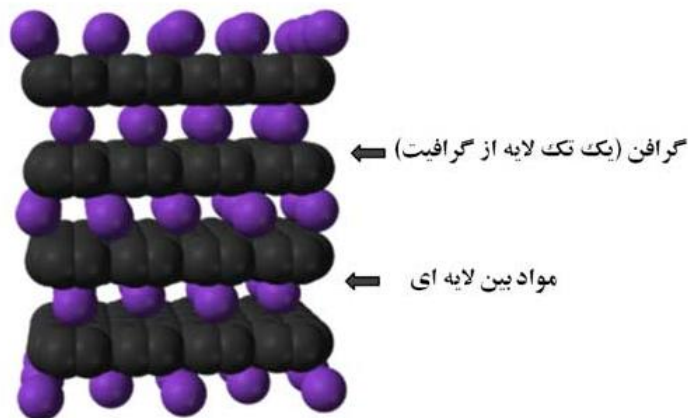
شکل ۱-۱ ساختار شبکه الف) گرافیت ب) گرافن ج) نانولوله کربنی د) فولرن [۱].

<sup>1</sup> Graphene

<sup>2</sup> Graphene Nanoribbon

<sup>3</sup> Carbon Nanotube

<sup>4</sup> Graphite



شکل ۱-۲ ساختار گرافیت و مواد بین لایه ای آن [۱].

با وجود مطالعات تئوری فراوان روی گرافن، عواملی باعث می‌شد که این ماده از جنبه عملی چندان مورد توجه قرار نگیرد. اول اینکه دیدن این ماده بسیار نازک، خیلی دشوار بود، و دوم اینکه نزدیک به هفتاد سال پیش، دو فیزیکدان معروف به نام‌های پیرز<sup>۱</sup> [۲] و لاندو<sup>۲</sup> [۳] استدلال کردند که شبکه اکیداً دوبعدی به لحاظ ترمودینامیکی ناپایدار است و نمی‌تواند وجود داشته باشد. در سال ۱۹۴۷ والاس<sup>۳</sup> در مقاله ای در مورد گرافیت، برای اولین بار ساختار نوارهای انرژی گرافن را به دست آورد [۴]. در سال ۱۹۵۸ سلونزسکی و ویس مدل تنگ بست<sup>۴</sup> را ارائه کردند که شامل مطالعات جدیدی در رابطه با مشخصات الکتریکی گرافن می‌شد [۵]. در سال ۲۰۰۴ صفحه گرافن با ضخامت اتمی برای اولین بار با یک میکروسکوپ معمولی دیده شد و دلیل این امر این بود که صفحه ی گرافن ایجاد شده روی بستر سیلیسیم اکسید<sup>۵</sup> اثر نوری دارد [۶]. گرافن دارای ویژگی های منحصر به فردی می باشد که در مقایسه با همتایان کربنی خود مثل نانولوله های کربنی آن را متمایز ساخته و همین امر باعث شد که این ماده، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کند. شکل ۱-۳ سرعت پیشرفت گرافن را نسبت به نانولوله های کربنی نشان می دهد [۷].

<sup>1</sup> Peierls

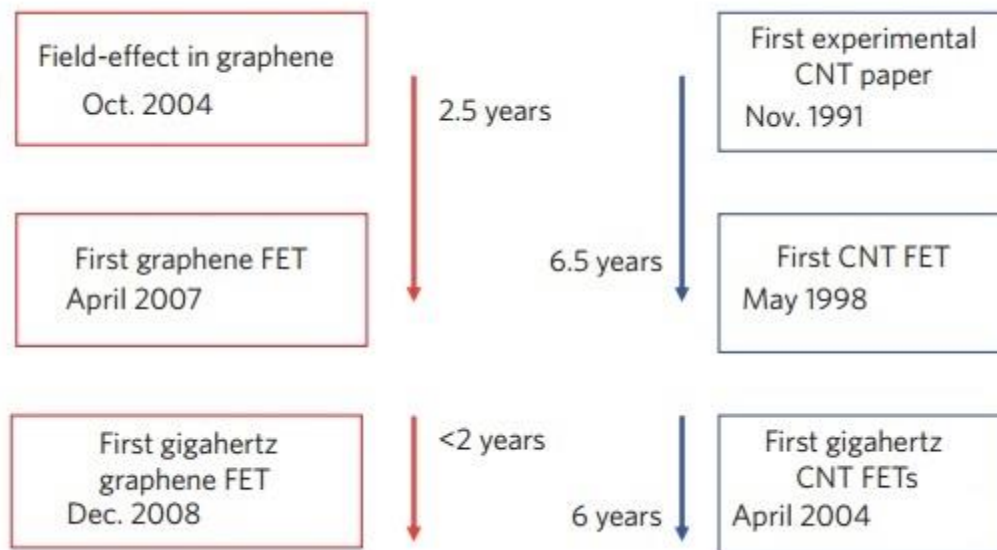
<sup>2</sup> Landau

<sup>3</sup> Wallace

<sup>4</sup> Tight binding

<sup>5</sup> SiO<sub>2</sub>



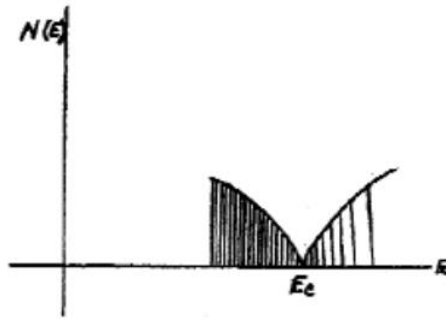


شکل ۱-۳ مقایسه سرعت پیشرفت و توسعه افزایه های مبتنی بر نانولوله کربنی و گرافن [۷].

این ماده در برابر فشار بسیار مقاوم بوده و توانایی تحمل فشار بالا را دارد [۸]. وجود ساختار یکپارچه در گرافن باعث می شود که این ماده از نظر سختی با الماس قابل مقایسه باشد. البته لازم به ذکر است که گرافیت و الماس هر دو از کربن ساخته شده اند ولی نحوه ی تشکیل هر کدام از این دو و چیدمان مختلف اتم های کربن در آن خواص متفاوتی را برای هر کدام از آن ها رقم زده است. از ویژگی های دیگر گرافن این است که به دلیل یکپارچگی ساختار آن فونون ها سریع تر انتقال پیدا کرده و انتقال گرما سریعتر می باشد و در واقع این ماده هدایت گرمایی بالایی دارد [۹].

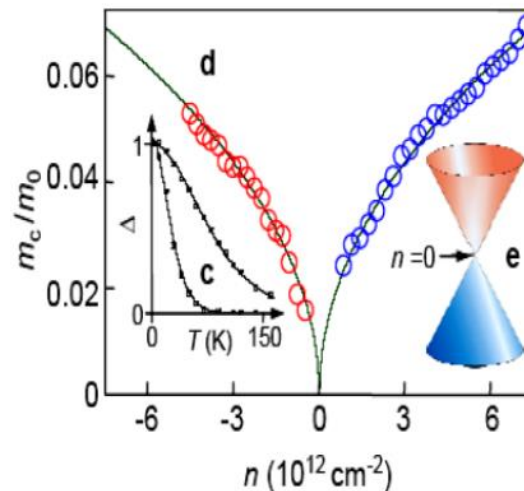
### ۱-۱-۱- ویژگی های الکتریکی گرافن

وجود ویژگی های الکتریکی قابل تامل در گرافن باعث شده است که استفاده از این ماده به عنوان یک گزینه بسیار مناسب برای جایگزینی سیلیکون در نسل بعدی قطعات الکترونیک در نظر گرفته شود و از این رو توجه کم سابقه ای را در تحقیقات بنیادی و کاربردی به خود جلب کرده است [۱۰]. در همین راستا برای اولین بار والاس ساختار باند انرژی گرافن را با مدل تنگ بست به دست آورد و مشاهده کرد که گرافن یک شبه فلز با شکاف باند انرژی تقریباً صفر است. شکل ۱-۴ چگالی حالات را در انرژی های مختلف برای یک لایه گرافیت نشان می دهد. از مشاهدات دیگر وی این بود که ساختار باند در انرژی های پایین به صورت خطی می باشد. بنابراین به دلیل این که ذره های نسبیتی شبیه فوتون دارای ساختار باند انرژی خطی هستند، نتیجه گرفت که الکترون ها در انرژی های پایین در داخل گرافن به صورت نسبیتی عمل کرده و دارای ساختار باند انرژی خطی هستند [۱۱].



شکل ۱-۴ چگالی حالات برای یک صفحه گرافیتی [۹].

همچنین نووسلوف<sup>۱</sup> جرم سیکلوترون را اندازه گرفت و مشاهده کرد که با ریشه دوم چگالی الکترون رابطه دارد [۶]. از نظر تئوری، اگر ذره ای نسبیتی باشد، جرم سیکلوترون به ریشه دوم چگالی الکترون وابسته است. بنابراین نتیجه ای که نووسلوف گرفت، با تئوری همخوانی داشت. این مشاهده بعلاوه پدیده خطی بودن ساختار باند در انرژی های پایین، اثبات می کرد که ذرات در داخل گرافن به صورت نسبیتی رفتار می کنند. شکل ۱-۵ نمودار جرم سیکلوترون برحسب چگالی الکترون ها را نشان می دهد.



شکل ۱-۵ نمودار جرم سیکلوترون برحسب چگالی الکترون ها [۶].

یکی از مهم ترین ویژگی های گرافن، قابلیت حرکت<sup>۲</sup> بالای آن است و این سرعت بالا به معنای توانایی این ماده ارزشمند در ساختارهای الکترونیکی با سرعت بالا می باشد. در واقع قابلیت حرکت بالا در گرافن به دلیل رابطه ی تقریباً خطی بین انرژی  $E_k$  و تکانه دوبعدی  $k = (k_x, k_y)$  در لبه های ناحیه بریلئون گرافن می باشد که به صورت

<sup>1</sup> Novoselov

<sup>2</sup> Mobility

$E = v_F k$  تقریب زده می شود و منجر به جرم موثر نزدیک به صفر برای الکترون در این ساختار می شود [۱۲]. اولین گزارش قابلیت تحرک گرافن توسط نووسلوف و همکارانش ارائه شد که بین  $3000$  تا  $10000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  بود. آنها نشان دادند که قابلیت تحرک در گرافن حساسیت بالایی به دما نشان نمی دهد، در حالی که در گرافن برهم کنش الکترون - الکترون و الکترون - فونون بسیار کم است و در حقیقت پراکندگی الکترون ها ناشی از برهم کنش آنها با نقص های کریستالی و ناخالصی های شبکه می باشد، که مقدار قابلیت تحرک را محدود می کند. بنابراین هرچه گرافن با کیفیت بالاتر ساخته شود، قابلیت تحرک بالاتری دارد.

### ۱-۱-۲- روش های ساخت گرافن

روش های گوناگونی برای تولید گرافن وجود دارد که در حالت کلی به دو دسته تقسیم می شود:

الف) روش های از پایین به بالا

- رسوب دهی بخار شیمیایی<sup>۱</sup> و رشد همبافته [۱۳و۱۴]

- رسوب دهی بخار شیمیایی با پلاسما غنی شده [۱۳]

- رسوب دهی شیمیایی در حضور بستر و عدم حضور بستر [۱۵و۱۶]

- رشد همبافته بر روی بستر عایق سیلیسیم کارباید<sup>۲</sup> [۱۷و۱۸]

ب) روش های از بالا به پایین

- لایه برداری مکانیکی [۱۹]

- سنتز شیمیایی [۲۰]

- باز کردن نانولوله کربنی [۲۱و۲۲]

البته هر یک از روش های فوق مزایا و معایبی هم دارند. به عنوان مثال در روش لایه برداری مکانیکی با استفاده از چسب نواری، برای تولید گرافن تک لایه و کم لایه مناسب می باشد. اما راندمان تولید پایین است. در روش رسوب دهی بخار شیمیایی برای تولید گرافن با سطح بزرگ با وجود اینکه پتانسیل زیادی از خود نشان می دهد، اما نیاز به انتقال نمونه به بستر های دیگر از طریق انتقال مکانیکی و یا از طریق فرآوری محلول به منظور ایجاد وسایل سودمند را دارد. این روش پتانسیل زیادی برای تولید مقدار زیادی از گرافن با هدف استفاده برای کاربردهای الکترونیکی را دارا می باشد. تجزیه حرارتی ویفر سیلیسیم کارباید تحت خلا با روش دیگری برای تهیه گرافن می باشد. این روش نیاز به درجه حرارتی برابر با  $1100$  درجه سانتیگراد برای تصعید سیلیکون دارد و کربن های باقی

<sup>1</sup> CVD

<sup>2</sup> SiC

مانده به شکل گرافن مرتب می شوند. این روش برای الگودهی گرافن<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار می گیرد که برای کاربرد های الکترونیکی مناسب می باشد. یکی از معایب این روش وجود نقص های ساختاری فراوان در لایه ها می باشد. علاوه بر آن انتقال به بسترهای دیگر دشوار است. همچنین نیاز به شرایط خلا بالا دارد و در نتیجه هزینه بالایی دارد. برای تهیه گرافن همچنین می توان از روش های ورقه ورقه شدن گرافیت توسط واکنش های شامل مواد بین لایه ای و یا از طریق شوک حرارتی بعد از در معرض قرار دادن گرافیت طبیعی یا بسط پذیر<sup>۲</sup> با اسید نیز استفاده کرد. لایه برداری الکتروشیمیایی از گرافیت، روش دیگری برای تولید گرافن می باشد. اما در این روش ها هم، نیاز به ولتاژ بالا داریم و معمولا چند مرحله ای و زمانگیر هستند. لازم به توضیح است که از امواج ماکروویو نیز برای شکافتن نانولوله های کربنی و تولید نانونوار گرافن استفاده می شود [۲۳]. در انتها یک نمای کلی از روش های ساخت گرافن در جدول ۱-۱ آمده است [۲۴].

جدول ۱-۱ خلاصه ای از روش های سنتز گرافن [۲۴].

روش های تولید	کیفیت الکترونیکی لایه ها	هزینه	تعداد لایه ها	حداکثر ظرفیت	طبیعت گرافن تولید شده	اندازه لایه ها	پیش ماده
۱ لایه برداری مکانیکی	زیاد	کم	تک و چند لایه	کم	آغازین	۱۰ میکرومتر	گرافیت
۲ سوسپانسیون مایع اکسید گرافن همراه با کاهش شیمیایی	کم	کم	تک و چند لایه	زیاد	اصلاح شده شیمیایی	چند صد نانومتر	اکسید گرافیت
۳ لایه برداری فاز مایع	زیاد	کم	تک و چند لایه	زیاد	آغازین	از ده ها میکرومتر تا اجزای کوچکتر	گرافیت
۴ رشد همبافته با دفع حرارتی اتم های سیلیس از سطح کاربرد سیلیسیم	زیاد	زیاد	تک و چند لایه	کم	آغازین	بیشتر از ۵۰ میکرومتر	کاربید سیلیکون
۵ رشد همبافته رسوب دهی شیمیایی بخار بر روی فلزات انتقالی	زیاد	زیاد	تک و چند لایه	کم	آغازین	بیشتر از ۱۰۰ میکرومتر	هیدروکربن
۶ سنتز حلالی - حرارتی	نامشخص	کم	تک لایه و چند لایه	زیاد	اصلاح شده شیمیایی	از ده ها میکرومتر تا اجزای کوچکتر	اتانول
۷ نانولوله های کربنی جدا شده	در مقایسه با مرجع ۲۳ کمتر است	کم	تک و چند لایه	زیاد	اصلاح شده شیمیایی	نانو تراشه با اندازه ۴ میکرومتر	نانولوله های کربنی چند لایه

<sup>1</sup> Patterned Graphene

<sup>2</sup> Expandable Graphite