

اللَّهُمَّ اللَّهُمَّ اللَّهُمَّ



بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

خاتم نرجس مقدم پایان نامه ۹ واحدی خود را با عنوان طراحی و شبیه سازی
ترانزیستور اثر میدان نانو لوله کربنی با سورس و درین مهندسی شده در تاریخ
۱۳۸۹/۱۰/۲۸ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا
برای اخذ درجه کارشناسی ارشد الکترونیک پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر محمدکاظم مروج فرشی	استاد	
استاد ناظر	دکتر ابومسلم جان نثاری	استادپار	
استاد ناظر	دکتر وحید احمدی	استاد	
استاد ناظر	دکتر مهاجر زاده	استاد	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر ابومسلم جان نثاری	استادپار	

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان‌نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه / رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد. تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه / رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

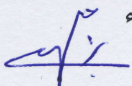
ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم‌الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می‌شود.

نام و نام خانوادگی: رحمن سید

امضاء



آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته _____ است که در سال _____ در دانشگاه _____

، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر _____ و مشاوره سرکار

خانم/جناب آقای دکتر _____ از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب _____ نرجس مقدم _____ دانشجوی رشته _____ برق-الکترونیک _____ مقطع _____ کارشناسی ارشد _____

تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: نرجس مقدم

تاریخ و امضا: ۹۰/۳/۳۰ [Signature]



دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی برق - الکترونیک

طراحی و شبیه‌سازی ترانزیستور اثر میدانی نانولوله کربنی با

سورس و درین مهندسی شده

نرجس مقدم

استاد راهنما:

دکتر محمد کاظم مروج فرشی

دی ۱۳۸۹

تقدیم بہ مادرم کہ می ستایش بہ یگانگی و مہر

و پدرم کہ پشتکرمی اش بزرگترین خوشبختی است

و بہ تمامی اساتیدی کہ روشنگر راہ علم و زندگی ام بودند

و خواہرم ؛ دوستم، یارم و ہمراہم.

تشکر و قدردانی

اینجانب کمال تشکر و قدردانی خود را از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر مروج فرشی دارم که با راهنمایی‌های با ارزششان اینجانب را در تکمیل این پایان نامه یاری رساندند و راه بهتر زیستن، بهتر دیدن و بهتر آموختن را به من آموختند.

در اینجا بر خود می‌دانم که از کلیه اساتید گروه الکترونیک دانشگاه تربیت مدرس که در این مدت از دانش ایشان بهره‌مند گشتم به خصوص جناب آقای دکتر احمدی، تشکر و قدردانی کنم.

در انتها از همه دوستانم در آزمایشگاه شبیه‌سازی ادوات پیشرفته و آزمایشگاه الکترونیک نوری، خصوصا جناب آقای مهندس عزیزیان به دلیل همکاری مؤثر ایشان در به ثمر رسیدن این پایان نامه کمال تشکر را می‌نمایم.

چکیده

رفتار دوقطبی همسان^۱ و تونل زنی نوار به نوار^۲ در ترانزیستورهای ساخته شده از نانولوله‌های کربنی، سد راه مجتمع‌سازی این افزاره‌ها است. از این رو، بر آن شدیم تا ساختاری را طراحی و پیشنهاد کنیم که این دو مشکل را مرتفع سازد.

در این پایان‌نامه، ساختار ماسفت جدیدی بر پایه‌ی نانولوله‌های کربنی پیشنهاد و شبیه‌سازی می‌شود. نواحی سورس درین این ترانزیستور تشکیل شده از نانولوله‌ی چند جداره که با پیش‌روی به سوی کانال جداره‌های آن‌ها به‌طور پلکانی برش داده می‌شود، تا نهایتاً از هر دو سو به نانولوله‌ی تک جداره‌ای منتهی شود که نقش کانال را ایفا می‌کند. نانولوله‌ی آغازین از نوع زیگزاگ هفت‌جداره با پیچش^۳ $(0, 16)$ درون‌ترین نانولوله است. با این انتخاب، بخش هفت‌جداره‌ی سورس و درین با چگالی حامل‌های $n=10^9$ m^{-1} دارای خاصیت کاملاً فلزی است و با پیش‌روی به سوی کانال و حذف هر جداره‌ی خارجی، از چگالی حامل‌ها و همچنین خاصیت فلزی آن کاسته می‌شود، به‌گونه‌ای که چگالی حامل‌ها در کانال تک جداره‌ی ترانزیستور، با خاصیت نیم‌رسانایی، $n=10^7 m^{-1}$ است. در حقیقت با این روش، ساختار نوار به‌گونه‌ای مهندسی می‌شود که هم نواحی سورس و درین ترانزیستور از ناخالص‌سازی بی‌نیاز می‌شوند و هم تونل زنی نوار به‌نوار تاحدی کاهش می‌یابد که رفتار دوقطبی همسان ناشی از آن تقریباً به‌طور کامل حذف می‌شود.

با توجه به طول‌های انتخابی، ترابرد حامل‌ها در سراسر طول ترانزیستور به‌صورت حرکت پرتابی (ترابرد بالیستیکی^۴) است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که نسبت جریان‌های روشن به خاموش ترانزیستور پیشنهادی ۱۰۰ برابر بزرگتر از ساختارهای ارائه شده‌ی پیشین با ابعاد مشابه است. به علاوه، مزیت دیگر این ساختار بر ساختارهای پیشین عدم نیاز به ناخالص‌سازی شیمیایی برای ایجاد نواحی سورس و درین است. در همه‌ی ساختارهای پیشین، برای ایجاد سورس و درین از ناخالص‌سازی نانولوله تک جداره‌ی

¹ ambipolarity

² band-to-band-tunnelling (BTBT)

³ chirality

⁴ ballistic transport

نیم‌رسانا به روش متداول شیمیایی استفاده شده است. لازم به ذکر است که نه تنها تاکنون روشی برای کنترل دقیق چگالی ناخالصی‌های شیمیایی وجود ندارد، بلکه این‌گونه ناخالصی خود موجب ناپایداری قطعه نیز می‌شوند. لذا انتظار بر این است که در صورت میسر شدن امکان ساخت ماسفت پیشنهادی، افزاره‌ی پیشنهادی از افزاره‌های موجود پایدارتر خواهد بود. در ضمن امکان کنترل دقیق‌تر توزیع چگالی حامل‌های در طول افزاره، با برش‌های انتخابی وجود خواهد داشت.

مشخصه‌های ماسفت پیشنهادی از حل هم‌زمان معادله‌های پواسن و شرودینگر به روش خودسازگار و با بهره‌گیری از یک تابع گرین غیرتعادلی با در نظر گرفتن فضای مدی شبیه‌سازی شده است. در ضمن، برای شبیه‌سازی ساختار نوار مهندسی شده، صرفاً اوربیتال‌های p_z را در نظر گرفته و از تقریب تنگ‌بست^۵ استفاده کرده‌ایم.

کلید واژه: نانولوله‌ی کربنی چندجداره، سورس و درین پلکانی، ساختار نوار مهندسی شده، انتقال بالستیکی (حرکت پرتابی).

⁵ tight-binding approximation

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

ج.....	فهرست شکل
۱.....	فصل ۱- نانولوله کربنی؛ معرفی و کاربرد
۱.....	۱-۱- مقدمه
۲.....	۱-۲- معرفی نانولوله های کربنی
۲.....	۱-۲-۱- ساختار هندسی و خواص نانولوله
۷.....	۱-۲-۲- خواص الکتریکی نانولوله های کربن
۱۱.....	۱-۳- اهداف و روند کلی پایان نامه
۱۳.....	فصل ۲- ترانزیستور ماسفت مبتنی بر نانولوله
۱۳.....	۱-۲- مقدمه
۱۴.....	۲-۲- ترانزیستورهای اثر میدانی اولیه مبتنی بر نانولوله های کربن
۱۷.....	۲-۳- بررسی اثر پیوند شاتکی و پیوند اهمی بین نانولوله و فلز اتصالات ترانزیستور نانولوله کربنی
۱۸.....	۲-۴- ساختارهای بهبود یافته ترانزیستوری
۱۹.....	۲-۴-۱- ترانزیستورهای تخت مبتنی بر نانولوله با دو گیت
۲۱.....	۲-۴-۲- ترانزیستورمبتنی بر نانولوله کواکسیالی
۲۵.....	۲-۴-۳- ترانزیستور مبتنی بر نانولوله کربنی کواکسیالی با دو گیت
۲۸.....	۲-۵- نتیجه
۲۹.....	فصل ۳- رویکردهای شبیه سازی
۲۹.....	۱-۳- مقدمه
۲۹.....	۲-۳- مدل تحلیلی نانو ترانزیستورها با انتقال بالیستیک
۲۹.....	۳-۲-۳-۱- فیزیک قطعه
۳۳.....	۳-۲-۳-۲- مدل
۳۶.....	۳-۲-۳-۳- کاربرد مدل در ماسفت بالیستیک
۳۶.....	۳-۲-۳-۴- پارامترهای مدل تحلیلی
۳۸.....	۳-۲-۳-۵- بار و سرعت در بالای سد
۳۸.....	۳-۲-۳-۶- ترانزیستورهای مولکولی
۴۱.....	۳-۳- ترانزیستورهای سد شاتکی

۴۳	مدل سازی نانوترانزیستور به روش تابع گرین غیر تعادلی	۴-۳
۴۴	فرمول بندی تابع گرین غیر تعادلی	۳-۴-۱
۴۸	فرآیند شبیه سازی با تابع گرین غیر تعادلی	۳-۵
۵۲	نتایج شبیه سازی با تابع گرین غیر تعادلی	۳-۵-۱
۵۷	اعتبار سنجی مدل	۳-۶
۵۷	نتیجه	۳-۷
۵۹	ترانزیستور شبه ماسفت نانولوله کربنی با نواحی سورس و درین آلاینده	۴-۵۹
۵۹	مقدمه	۴-۱
۶۰	ترانزیستور نانولوله کربنی با نمودار خطی ناخالصی در نزدیک اتصال سورس و درین	۴-۲
۶۲	ترانزیستور اثر میدانی مبتنی بر نانولوله کربنی با سورس و درین کم آلاینش	۴-۳
۶۸	روش های ناخالص سازی نانولوله کربنی	۴-۴
۶۸	ناخالص سازی شیمیایی	۴-۴-۱
۶۹	ناخالص سازی الکترواستاتیک	۴-۴-۲
۷۱	ترانزیستور نانولوله کربنی با ناخالص سازی الکترواستاتیک	۴-۵
۷۳	ترانزیستور نانولوله کربنی با نواحی سورس و درین از جنس کربن نانولوله چند جداره مهندسی شده جهت ناخالص سازی پلکانی	۴-۶
۷۶	نتیجه	۴-۷
۷۷	ترانزیستور اثر میدانی نانولوله کربنی با نواحی سورس و درین پلکانی	۵-۷۷
۷۷	مقدمه	۵-۱
۷۷	مدل و شبیه سازی ترانزیستور با سورس و درین پلکانی	۵-۲
۸۰	نتایج شبیه سازی با مدل ترانزیستور بالیستیک	۵-۳
۸۵	شبیه سازی ساختار با نواحی سورس و درین پلکانی	۵-۴
۸۹	نتیجه	۵-۵
۹۰	نتیجه گیری و پیشنهادات	۶-۹۰
۹۰	مقدمه	۶-۱
۹۱	نتیجه گیری	۶-۲
۹۲	پیشنهاد	۶-۳

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱. تصویر دیواره ی یک نانولوله کربنی که در رأس هرشش ضلعی نشان داده شده، یک اتم کربن قرار دارد [۲]. ۳
- شکل ۱-۲. الف) توری از جنس گرافیت ، ب) نانولوله کربنی [۲]. ۴
- شکل ۱-۳. نوار هدایت و ظرفیت نانولوله کربنی ۵
- شکل ۱-۴. مدل شماتیک برای نانولولههای (الف) تک جداره و (ب) چند جداره [۴]. ۶
- شکل ۱-۵. ساختار یک نانولوله تک جداره (الف) آرمچیر، (ب) زیگزآگ، (ج) کایرال. (د) صفحه گرافیت مورد استفاده برای تولید نانولوله [۶]. ۸
- شکل ۱-۶. منحنی مشخصه پاشندگی نانولوله فلزی [۷]. ۱۰
- شکل ۱-۷. چگالی حالات نانولوله (13,0) محاسبه شده بر اساس معادله (۱-۱۴) [۷]. ۱۱
- شکل ۱-۲. الف) ساختار ترانزیستورهای اثر میدانی اولیه نانولوله کربنی که در آنها نانولوله کربنی بر روی الکترودها قرار داده شده (ب) ساختار ترانزیستورهای نانولوله کربنی بهبود یافته که در آن الکترودها روی نانولوله کربنی لایه نشانی شده اند [۱۱]. ۱۴
- شکل ۲-۲. ساختار یک ترانزیستور اثر میدانی نانولوله کربنی با گیت بالایی [۱۱]. ۱۶
- شکل ۲-۳. مقایسه بین ترانزیستورهای اثر میدانی نانولوله کربنی با ساختار گیت بالا و گیت پایینی [۱۱]. ۱۶
- شکل ۲-۴. طرحی از ساختار با دو گیت [۱۳]. ۱۹
- شکل ۲-۵. مشخصه جریان-ولتاژ ساختار تک گیت تخت در ولتاژ درین ۰.۳ و ۰.۶ ولت [۱۳]. ۲۰
- شکل ۲-۶. طرحی از ترانزیستور مبتنی بر نانولوله کواکسیالی [۱۴]. ۲۱
- شکل ۲-۷. نمودار نوارباند ترانزیستور کواکسیالی. (الف) در شرایط تعادل. (ب) با اعمال ولتاژ مثبت به گیت [۱۵]. ۲۲
- شکل ۲-۸. مشخصه جریان ولتاژ ترانزیستور کواکسیال با سد شاتکی با در نظر گرفتن نقش یکی از حاملها در جریان. (الف) جریان درین بر حسب ولتاژ گیت در ولتاژهای کم، (ب) مشخصه خروجی در ولتاژهای کم، (ج) جریان درین بر حسب ولتاژ گیت در ولتاژهای بالا، (د) مشخصه خروجی در ولتاژهای بالا [۱۵]. ۲۴
- شکل ۲-۹. مشخصه جریان-ولتاژ دوقطبی در یک ترانزیستور نانولوله کربنی با ساختار کواکسیال ۲۵
- شکل ۲-۱۰. طرح دو بعدی از ساختار ترانزیستور با دو گیت کواکسیالی [۱۷]. ۲۶
- شکل ۲-۱۱. منحنی جریان-ولتاژ برای دو ساختار کواکسیالی با تک گیت و دو گیت [۱۷]. ۲۷
- شکل ۲-۱۲. منحنی مشخصه خروجی یک ساختار دو گیتی کواکسیال [۱۷]. ۲۸
- شکل ۳-۱. ساختار و تابع توزیع بالستیک برای یک قطعه مدل. الف) ساختار ماسفت با دو گیت با ضخامت اکسید و ضخامت بدنه هر یک 1.5nm . هر دو ناحیه سورس و درین به میزان $10^{20}/\text{cm}^3$ ناخالص شده اند. تابع کار گیت برابر با 4.25eV است که جریان خاموش $1.6\text{nA}/\mu\text{m}$ را ایجاد می کند [۲۳]. ب) تابع توزیع بالستیک شکل الف در حالت روشن که با حل معادله انتقال بالستیک BTE بدست آمده است [۱۹]. ۳۰

شکل ۳-۲. فرمول بندی تابع گرین غیر تعادلی . الف) چگالی حالات بر حسب موقعیت ب) چگالی الکترون بر حسب موقعیت [۲۳]..... ۳۰

شکل ۳-۳. محاسبه نمودار انرژی. الف) ولتاژ درین کم ، ب) ولتاژ درین بالا (پارامتر ولتاژ گیت است). [۲۳] ... ۳۱

شکل ۳-۴. رفتار حامل ها در بالای سد کانال - سورس. الف) بار الکترون Q_n در بالای سد بر حسب ولتاژ درین - سورس V_{DS} ب) میانگین سرعت الکترون در بالای سد بر حسب ولتاژ درین - سورس V_{DS} [۲۳]..... ۳۲

شکل ۳-۵. چگونگی پر شدن حالات k توسط سطوح فرمی سورس یا درین در بالای سد [۲۳]..... ۳۳

شکل ۳-۶. مدل مداری دو بعدی برای ترانزیستور بالیستیک . U_{scf} توسط پتانسیل هر سه پایانه کنترل می شود. خازن غیر خطی نشان داده نشده است. [۲۳]..... ۳۳

شکل ۳-۷. مقایسه مدل تحلیلی و شبیه سازی عددی برای ماسفت بالستیک شکل ۳-۱. الف) مشخصه انتقال تحت بایاس درین کم و زیاد. ب) مشخصه خروجی. در هر دو منحنی، خط بیانگر مدل تحلیلی و نقطه شبیه سازی عددی است. [۲۳]..... ۳۷

شکل ۳-۸. رفتار حامل ها در بالای سد کانال - سورس. الف) بار الکترون Q_n در بالای سد بر حسب ولتاژ درین - سورس. ب) میانگین سرعت الکترون در بالای سد بر حسب ولتاژ درین - سورس [۲۳]..... ۳۸

شکل ۳-۹. الف) چگالی الکترون نرمالیزه شده در ابتدای کانال بر حسب ولتاژ درین در ولتاژ گیت 0.47 برای سه ماسفت نانولوله کربنی با قطر 3nm و خازن اکسید 0.4pF/cm (خط نقطه)، 5pF/cm (خط چین) و 90pF/cm (خط). ب) بار بر حسب ولتاژ گیت برای خازن کوانتومی 90pF/cm [۲۳]..... ۴۰

شکل ۳-۱۰. مشخصه تاخیر بر حسب جریان روشن به خاموش برای دو قطعه ، خط (ماسفت دو گیتی سیلیکونی) و نقطه چین (ترانزیستور نانولوله کربنی شبه-ماسفت) طول کانال در هر دو قطعه 10nm است [۲۳]..... ۴۱

شکل ۳-۱۱. مشخصه جریان-ولتاژ ترانزیستور با سد شاتکی. خط چین نمایانگر شبیه سازی با تابع گرین غیر تعادلی و خط، شبیه سازی با مدل تحلیلی [۲۳]..... ۴۲

شکل ۳-۱۲. اولین تراز نوار هدایت بر حسب مکان در یک ترانزیستور اثر میدانی با سد شاتکی. از حالت خاموش $V_G=0$ به حالت روشن $V_G=0.4$ [۲۳]..... ۴۳

شکل ۳-۱۳. مدل ترانزیستور با کانال مولکولی. کمیت های معادله تابع گرین غیر تعادلی نیز در شکل دیده می شوند. [۱۶]..... ۴۵

شکل ۳-۱۴. فلوچارت حل معادله شرودینگر با رویکرد تابع گرین غیر تعادلی برای بدست آوردن توزیع بار ۴۷

شکل ۳-۱۵. مدلی از ترانزیستور نانولوله کربنی کواکسیال با سورس و درین نانولوله که به شدت آرایش یافته اند، کانال بطور ذاتی فرض می شود و طول گیت برابر طول کانال است. در شکل ناحیه شبیه سازی، شبکه بندی شبیه سازی و مختصات استوانه ای برای حل معادله پواسن نشان داده شده است (مستطیل خط چین عنصر مورد استفاده برای گسسته سازی معادله پواسن در نقطه (x_i, z_j) را نشان می دهد). [۱۶]..... ۴۸

شکل ۳-۱۶. تکرار خودسازگار بین معادله پواسن الکترواستاتیک و انتقال تابع گرین غیر تعادلی..... ۵۰

شکل ۳-۱۷. فلوجارت حل معادله پواسن ۵۱

شکل ۳-۱۸. الف) چگالی حالات محلی و ب) طیف چگالی الکترون محاسبه شده در فضای حقیقی در ولتاژ گیت ۰.۲۵ ولت و ولتاژ درین ۰.۴ ولت. [۱۶]..... ۵۳

شکل ۳-۱۹. مشخصه جریان-ولتاژ محاسبه شده با رویکرد فضای حقیقی (خط) و فضای مدی با دو زیر باند (دایره) برای ترانزیستور نانولوله کربنی با طول کانال ۱۵ و کایرالیته (۱۳۰). [۱۶]..... ۵۴

شکل ۳-۲۰. الف) نمودار نوارهدایت که با رویکرد فضای حقیقی (خط) و رویکرد فضای مدی (دایره) در ولتاژ گیت و درین ۰.۴ ولت بدست آمده است. ب) چگالی بار محاسبه شده با رویکرد فضای حقیقی (خط) و رویکرد فضای مدی (خط چین) [۱۶]..... ۵۵

شکل ۳-۲۱. الف) ترانزیستور کواکسیالی با سد شاتکی و کانال نانولوله کربنی زیگزاگ (۱۳۰) و ضخامت اکسید ۲ نانومتر، ب) چگالی حالات محلی در ولتاژ گیت و درین ۰.۴ ولت که تونل زنی از سد شاتکی در آن به وضوح دیده میشود. [۱۶] ۵۶

شکل ۳-۲۲. منحنی جریان بر حسب ولتاژ گیت برای سه ولتاژ درین در یک ساختار ترانزیستور شبه ماسفت کواکسیالی متداول با طول کانال ۱۵ نانومتر، طول سورس و درین ۳۰ نانومتر، ضخامت اکسید ۲nm، ثابت دی الکتریک ۱۶. الف) نتیجه مرجع [۳۷]، ب) نتیجه شبیه سازی با روش پیاده سازی شده ۵۷

شکل ۴-۱. الف) طرح اولیه ترانزیستور مبتنی بر نانولوله کربنی کواکسیال با نمودار ناخالصی خطی، ب) نمودار ناخالصی خطی و پله ای بر حسب مکان برای ساختار معرفی شده [۳۶] ۶۰

شکل ۴-۲. جریان بر حسب ولتاژ درین برای ولتاژهای گیت مختلف در ساختار با نمودار ناخالصی خطی و طول کانال ۱۵ نانومتر و اکسید زیرکونیوم. [۳۶]..... ۶۱

شکل ۴-۳. منحنی مشخصه جریان درین بر حسب ولتاژ گیت بدست آمده برای ساختار با نمودار ناخالصی خطی و ترانزیستور شبه-ماسفت متداول در ولتاژهای درین مختلف [۳۶] ۶۱

شکل ۴-۴. شماتیک و نمودار ناخالصی ترانزیستور با سورس و درین با ناخالصی ضعیف [۳۷] ۶۳

شکل ۴-۵. مقایسه منحنی جریان درین بر حسب ولتاژ گیت برای مقادیر ولتاژ درین مختلف. الف) ساختار با ناخالصی کم سورس و درین و شبه-ماسفت، ب) ساختار با ناخالصی ضعیف و نمودار خطی [۳۷] ۶۴

شکل ۴-۶. نمودار چگالی الکترون ها به ازای هر واحد انرژی در طول محور نانولوله. الف) ترانزیستور نانولوله با ناخالصی کم سورس و درین، ب) با نمودار ناخالصی خطی و ج) ترانزیستور شبه-ماسفت. برای هر سه ساختار $V_{GS} = -0.4V$ و $V_{DS} = 0.4V$. [۳۷]..... ۶۵

شکل ۴-۷. مقایسه مشخصه جریان درین-ولتاژ درین برای ساختارهای با ناحیه سورس و درین با ناخالصی کم، با نمودار ناخالصی خطی و ترانزیستور نانولوله کربنی شبه-ماسفت، در ولتاژهای مختلف گیت [۳۷] ۶۵

شکل ۴-۸. ساختار نوار انرژی ترانزیستور نانولوله کربنی با ناخالصی ضعیف سورس و درین برای سه چگالی ناخالصی مختلف در ولتاژ بایاس $V_{DS} = 0.4V, V_{GS} = -0.6V$ [۳۷] ۶۶

شکل ۴-۹. ساختار مورد استفاده برای ایجاد پیوند p-n در نانولوله، و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نمودار نوار مربوط به آن [۳۸]. ۶۸

شکل ۴-۱۰. منحنی جریان-ولتاژ مربوط به پیوند p-n ایجاد شده توسط ناخالص سازی شیمیایی نانولوله کربن [۳۸]. ۶۹

شکل ۴-۱۱. الف) شماتیک ساختار p-n ایجاد شده توسط ناخالص سازی الکترواستاتیک و ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی آن [۳۹]. ۷۰

شکل ۴-۱۲. منحنی جریان-ولتاژ برای سه حالت مختلف (ولتاژهای گیت متفاوت) [۳۹]. ۷۰

شکل ۴-۱۳. منحنی جریان-ولتاژ افزاره به همراه منحنی جریان-ولتاژ دیود ایده آل [۳۹]. ۷۱

شکل ۴-۱۴. طرح دو بعدی ساختار یک ترانزیستور نانولوله کربنی با ناخالصی الکترواستاتیک [۴۰]. ۷۲

شکل ۴-۱۵. منحنی مشخصه انتقالی ترانزیستور با ناخالص سازی الکترواستاتیک با اعمال ولتاژهای گیت کنترلی مختلف و مقایسه آن با ترانزیستور نانولوله کربنی متداول [۴۰]. ۷۳

شکل ۴-۱۶. تصویر یک نانولوله چند جداره برش یافته [۴۱]. ۷۴

شکل ۴-۱۷. منحنی رسانش بر حسب ولتاژ گیت برای یک نانولوله چند جداره با ۱۳ جداره [۴۱]. ۷۵

شکل ۴-۱۸. طرح اولیه ترانزیستور نانولوله کربنی با نواحی نزدیک سورس و درین پلکانی ۷۵

شکل ۵-۱. شماتیک ساختار با نواحی سورس و درین پلکانی ۷۸

شکل ۵-۲. مدل مداری نانولوله کربنی چند جداره به عنوان نواحی سورس و درین و کانال ۸۰

شکل ۵-۳. منحنی مشخصه جریان درین-ولتاژ درین با تغییرات ولتاژ گیت از صفر تا یک ولت و با فواصل ۰.۱ ولت. ۸۱

شکل ۵-۴. متوسط سرعت حرکت حامل ها در کانال برای دو قطر ۲ نانومتر (خط) و یک نانومتر (خط چین) ۸۲

شکل ۵-۵. منحنی لگاریتمی جریان درین بر حسب ولتاژ گیت برای دو ولتاژ درین ۰.۱ و ۱ ولت. خط چین، خط مماس بر منحنی در ناحیه خطی را نشان می دهد که بیانگر ولتاژ آستانه ۰.۳ ولت است. منحنی داخلی جریان درین بر حسب ولتاژ گیت را نشان می دهد. ۸۳

شکل ۵-۶. منحنی لگاریتمی جریان درین بر حسب ولتاژ گیت و چگونگی محاسبه شیب زیر آستانه از روی منحنی و کاهش سد القایی ناشی از درین DIBL. ۸۴

شکل ۵-۷. منحنی جریان درین-ولتاژ گیت برای ساختار پلکانی و مقایسه آن با دو ساختار بهبود یافته و ساختار با نواحی سورس و درین با ناخالصی کم در $V_{DS}=0.4$ ۸۶

شکل ۵-۸. نمودار انرژی الکترون و نمودار نوار ساختار با نواحی سورس و درین پلکانی الف) با شش ناحیه، ب) ساختار بهبود یافته با ۴ ناحیه ۸۷

شکل ۵-۹. نمودار جریان درین بر حسب ولتاژ درین برای ساختار با ۶ بخش (خط پر) و ساختار بهبود یافته با ۴ بخش (دایره) ۸۷

شکل ۵-۱۰. الف) منحنی توان در تاخیر بر حسب ولتاژ گیت-سورس. ب) نسبت جریان روشن به خاموش ساختار با درین و سورس پلکانی ۸۸

فصل ۱ - نانولوله کربنی؛ معرفی و کاربرد

۱-۱- مقدمه

در سال ۱۹۹۱ برای اولین بار نانولوله‌های کربنی چند جداره^۶ (MWCNTs) توسط آقای ایجیما بطور اتفاقی ساخته شد. دو سال بعد، دونالد بتون ساخت اولین نانولوله‌های تک جداره^۷ (SWNTs) را گزارش کرد. از آن زمان تا کنون پیشرفت‌های زیادی در زمینه روش‌های ساخت و درک خواص آنها حاصل شده است. در حال حاضر نانولوله‌هایی با طول سانتیمتری می‌توانند بر روی زیر لایه رشد داده شوند. همچنین برای کاربردهای صنعتی می‌توان مقادیر زیادی از نانولوله را تولید کرد. بعلاوه، پیشرفت‌های مهمی در زمینه تولید نمونه‌های نسبتاً همگن با تغییرات کم قطر و کایرالیته^۸ نانولوله‌ها حاصل شده است. روشهای فیزیکی و شیمیایی نیز برای جدا کردن نانولوله‌های متفاوت (فلزی و نیمه هادی) از یکدیگر، در حال گسترش هستند.

در کنار کارهایی که برای سنتز نانولوله‌ها انجام می‌شود، فعالیت‌هایی در زمینه کشف خواص آنها نیز در حال انجام است. نانولوله‌ها دارای خواص مکانیکی، الکتریکی، حرارتی، اپتوالکترونیک، نوری و ساختاری منحصر به فردی هستند. برای مثال از خواص مکانیکی فوق العاده نانولوله‌ها (NTs) برای ساخت کامپوزیت‌های قوی استفاده می‌شود. از خاصیت گسیل میدان آنها برای ساخت نمایشگرهای تخت و ساطع کننده نور مادون قرمز، از خاصیت انتقال بالستیک حامل‌ها در نانولوله‌های تک جداره برای ساخت ترانزیستورهای مبتنی بر نانولوله‌های کربنی، از خاصیت بازدهی فتوولتائیک آن برای ساخت آشکارساز فوتونی و در نهایت از حساسیت خواص الکتریکی آنها به برهم کنش با محیط برای تولید سنسورهای شیمیایی استفاده می‌شود. در حال حاضر کاربردهای جدید نانولوله‌ها در حال ارائه است و می‌توان گفت کشف نانولوله‌های کربنی تحولی در ادوات و

⁶ Multi-walled carbon nanotubes

⁷ single-walled carbon nanotube

⁸ chirality

قطعات کاربردی ایجاد کرده است و شاید بتوان نانولوله های کربنی را نقطه عطفی در کاربردهای علمی قرن بیست و یکم دانست [۱].

همانطور که می دانیم، طبق قانون مور هر ۱۸ ماه طول کانال نصف می شود ولی این کاهش حجم مشکلاتی مثل نیاز به دقت بالا، گرمای تلف شده بیشتر و معادلات پیچیده تر دارد. پس صنعت به سمت قطعات نانو رفت. یکی از موادی که کشف آن کمک زیادی به صنعت نانوالکترونیک و ساختن نانوترانزیستورها کرد، نانولوله های کربنی می باشد.

۱-۲- معرفی نانولوله های کربنی

۱-۲-۱- ساختار هندسی و خواص نانولوله

نانولوله های کربنی (CNT) ورقه های تاشده (رول شده) گرافیت هستند که به شکل استوانه در آمده اند. خواص الکتریکی آنها به شعاع و اندازه زاویه محور آنها با شش ضلعی موجود در ساختار گرافیت وابسته می باشد. این لوله کردن اگر در جهت های مختلف انجام شود باعث ایجاد نانو لوله رسانا یا نارسانا می شود که بر اساس نتایج عملی و محاسبات تئوری، وجود دو نوع عمده نانولوله های کربنی هادی و نیمه هادی تأیید شده است. ویژگی های منحصر به فرد نانولوله های کربنی توجه محققان را برای استفاده آنها در صنعت الکترونیک جلب نموده است. رسانایی بالا (تقریباً ۸ برابر مس برای نانولوله های هادی)، تحمل چگالی جریان های زیاد، تحمل فشارهای مکانیکی زیاد، تغییر گاف انرژی با تغییر قطر نانولوله و انتقال تقریباً بالستیک حامل های جریان الکتریکی از این ویژگی ها می باشند.

در سال ۱۹۸۵ به صورت کاملاً اتفاقی ساختارهایی از جنس کربن در طی یک سری آزمایشات کشف شدند که ویژگی های متفاوتی را نسبت به ساختارهای دیگر کربن که تا آن زمان شناخته شده بودند مثل الماس،

گرافیت، کربن آمورف (بی شکل یا دوده) داشتند، این ویژگی‌ها آنقدر متفاوت بود که یک دسته بندی خاص ایجاد و نام آنها فلورین شد. فلورین یعنی قفس‌های بسته شده که از اتم‌های کربن تشکیل شده اند.

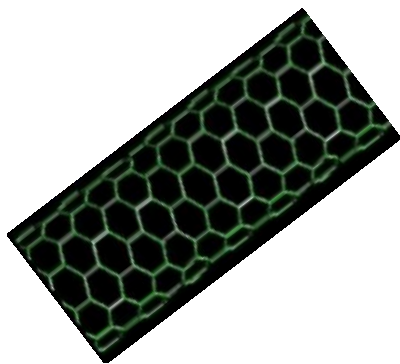
اولین فلورین کشف شده C60 بود. مجموعه ای از ۶۰ اتم کربن که به صورت یک توپ کروی بر روی یک کره با قطر چند نانومتر قرار گرفته اند و مجموعه ای از شش ضلعی ها و پنج ضلعی های منتظم هستند که در هر رأس آنها یک اتم کربن قرار دارد.

در سال ۱۹۹۱ طی یک آزمایش توسط آقای سومیو ایچیمیا در ژاپن، به طور اتفاقی او ماده ای از جنس کربن را یافت که ویژگیهای آن با ساختارهای قبلی تشکیل شده از عنصر کربن مانند الماس، گرافیت، دوده و فلورین فرق داشت و حالت خاصی از فلورین ها بود. با بررسی های بیشتر نام این ساختار جدید کشف شده را نانولوله-کربنی گذاشتند [۲]. در شکل ۱-۱ تصویر شماتیکی از یک نانولوله کربنی دیده می شود.

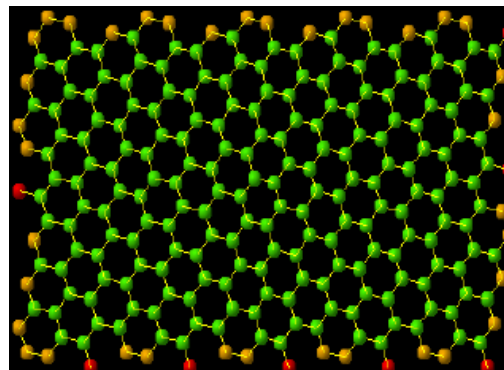


شکل ۱-۱. تصویر دیواره ی یک نانولوله کربنی که در رأس هر شش ضلعی نشان داده شده، یک اتم کربن قرار دارد [۲].
برای درک نانولوله کربنی، فرض کنید یک فلورین که به صورت کامل است و از ۶۰ اتم کربن ساخته شده را به صورت تئوری نصف کرده تا به صورت دو نیم کره شود. هر کدام از این نیم کره ها ۳۰ تا اتم کربن دارند و حالا این دو نیم کره را از هم جدا کرده و یک حلقه ۱۰ تایی کربن را که هم شعاع با آنها می شود در بین آنها قرار دهیم و دو نیم کره را به هم بچسبانیم تا شامل ۷۰ اتم کربن شود که به آن C70 می گویند و مثل C60 است که مقداری کشیده شده باشد. حالا بیایید یک حلقه ده تایی هم اضافه کنید تا بشود C80، C90، C100، C110 و ... C ∞ . شکلی همقوس با فلورین به صورت استوانه کشیده شده که دو طرف آن با دو تا نیم کره ۳۰ تایی از اتم کربن بسته شده است. اسم این ساختار، نانولوله کربنی است که دیگر وجود دو کلاهدک اطرافش

مهم نیست. این ساختار به خودی خود ویژگیهای بسیار جالبی دارد که به صورت زیر شاخه ای از فلورینها مورد بحث قرار می گیرد. به صورت تئوری فرض می شود که یک نانو لوله از لوله کردن یک صفحه گرافیت به وجود می آید. در تئوری یک صفحه گرافیت مجموعه ای از اتمهای کربن است که در راس های یک شش ضلعی به صورت یک لانه زنبور عسل قرار گرفته اند. حالا اگر یکی از صفحات گرافیت را لوله کنید لوله ای با نام نانولوله کربنی به وجود می آید که قطر آن در حدود چند نانو متر و طول آن در حدود چند میکرومتر است. بنابراین نسبت طول به قطر آنها حدود ۱۰۰۰ است. یعنی نانولوله ها مواد خیلی طویل و خیلی باریکی هستند، از اینرو می توان آنها را مواد یک بعدی فرض کرد. لذا دانشمندان نامهای دیگری مانند نانوسیمها یا سیمهای اتصال نانومتری را نیز به نانولوله های رسانا نسبت می دهند [۲]. در شکل ۱-۲ یک صفحه توری گرافیت و نانولوله کربنی نشان داده شده است.



ب



الف

شکل ۱-۲. الف) توری از جنس گرافیت ، ب) نانولوله کربنی [۲]

نانو لوله های کربنی با توجه به فاصله نوار هدایت و ظرفیت از هم می توانند مانند هادی، نیمه هادی و یا عایق عمل کنند [۳]. شکل ۱-۳ نوار هدایت و ظرفیت این ماده را نشان می دهد. در دو نقطه ی مشخص شده با فلش، نوار هدایت و ظرفیت با هم فاصله ای ندارند و نانو لوله مثل رسانا عمل کرده و برای اتصالات داخلی مناسب است.