بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی فناوریهای نوین
گروه مهندسی نانوالکترونیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی نانوفناوری

عنوان

طراحی، شبیه سازی و ساخت آشکارساز تراهرتز مبتنی بر گرافن

استاد راهنما

پروفسور علی رستمی

استاد مشاور

دکتر حامد باغبان

پژوهشگر

مهرداد سیاه سر مقدم جهانتیغ

بهمن ماه ۱۳۹۲

تقدیم به

پدر عزیز و مادر مهربانم

خدایا شکرت،

که یاریت را از من حقیر دریغ نکردی تا از آنچه که از استعداد و توانایی در وجودم داشتم در مسیر علم بکار گیرم. حال از ژرفای وجود سخن آن بزرگوار یعنی "من علمنی حرفا و قد سیرنی عبدا" را بر زبان جاری می کنم و با یاری قلم خالصانه ترین ارادتها را از **پروفسور علی رستمی** به خاطر راهنمایی های ارزشمند و راهگشای ایشان در تمام مراحل این پروژه ابراز دارم و همچنین از راهنمایی ها و مساعدتهای **دکتر محبوبه دولتیاری** تشکر و قدردانی می نمایم.

بهمن ماه ۱۳۹۲

نام خانوادگی: سیاه‌سر مقدم جهانتیغ نام: مهرداد
عنوان پایان نامه: طراحی، شبیه سازی و ساخت آشکارساز تراهرتز مبتنی بر گرافن
استاد راهنما: دکتر علی رستمی استاد مشاور: دکتر حامد باغبان
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی نانو فناوری گرایش: مهندسی نانوالکترونیک دانشگاه: تبریز دانشکده: مهندسی فناوریهای نوین تاریخ فارغ التحصیلی: بهمن ۱۳۹۲ تعداد صفحات: ۱۰۲
کلید واژه ها: آشکارساز، گرافن، لیگاند، غیرفعال‌سازی، تراهرتز، مادون‌قرمز
چکیده: گرافن لایه دو بعدی از اتم‌های کربن با پیوند sp^2 در شبکه لانه زنبوری می‌باشد. پیکربندی منحصر بفرد اتم‌های کربن منجر به یک رابطه‌ی پراکندگی جدید در حوالی انرژی دیراک می‌شود. در حوالی نقطه دیراک طیف دو بعدی، خطی است و در نتیجه الکترون‌ها با سرعت ثابت (۱۰۰ برابر بیشتر از سیلیکان) در حرکت هستند. بسیاری از ویژگی‌های جذاب گرافن ناشی از این رابطه پراکندگی است که ناشی از فرمیون‌های نسبی بی‌جرم می‌باشد. در قطعات الکترونیکی مبتنی بر سیلیکان، سرعت عملکرد قطعه توسط حفره‌ها محدود می‌شود. ولی در گرافن تحرک حفره‌ها برابر با تحرک الکترون هاست. در نتیجه، قطعات الکترونیکی مبتنی بر گرافن سریع‌تر عمل می‌کنند. به دلیل عدم وجود گاف انرژی در طیف انرژی، گرافن می‌تواند طیف وسیعی از تابش الکترومغناطیسی را جذب نماید. در نهایت، گرافن می‌تواند در ادوات الکترونیکی از قبیل سلول خورشیدی، دیودهای نورگسیل آلی، آشکارسازهای نوری و سایر موارد مورد استفاده قرار گیرد. از طرفی دیگر تمام اتم‌های کربن در سطح گرافن قرار گرفته است و چگالی الکترون‌ها در آن بالا می‌باشد و همچنین گرافن تحت تاثیر گازهای محیط اطراف قرار می‌گیرد که این به نوبت خود باعث ناپایداری شیمیایی گرافن شده و برای بدست آوردن نتایج قابل تکرار به شرایط خلا نیازمند است. چالش اساسی در تحقیقات بر روی گرافن ، اصلاح سطح در معرض تماس آن است. به معرفی گاف انرژی ناشی از اندرکنش مولکول‌های شیمیایی با

سطح گرافن برای دستیابی به آشکارساز مادون قرمز در ناحیه ۳ تا ۵ میکرومتر پرداخته‌ایم. در این پژوهش نشان‌داده شده است که به دلیل اندرکنش بین اتم‌های کربن در گرافن با هیدروژن لیگاندهای شیمیایی، ساختار گرافن به‌شدت تغییر می‌کند. در نهایت، آشکارساز مادون قرمز مبتنی بر گرافن ترکیبی با گاف انرژی مهندسی شده را ارائه دادیم. ساختار ارائه شده قابلیت کار در دمای اتاق را دارد و در مقایسه با دیگر آشکارسازهای ساخته شده بر اساس گرافن سریع‌تر می‌باشد.

فهرست مطالب

فصل اول: بررسی منابع

مقدمه ۱

۱-۱- **طبقه‌بندی آشکارسازهای نوری** ۲

۱-۱-۱- آشکارساز نور رسانا ۴

۱-۱-۲- آشکارساز نوری p-i-n ۵

۱-۱-۳- آشکارساز نوری بهمنی ۵

۱-۱-۴- آشکارساز نوری ترانزیستوری ۶

۱-۱-۵- آشکارساز نوری فلز-نیمه‌رسانا ۶

۱-۱-۵-۱- حالت شاتکی ۶

۱-۱-۵-۲- حالت اهمی ۷

۱-۱-۶- آشکارساز نوری فلز-نیمه‌رسانا-فلز ۷

۱-۲- معیارهای عملکرد آشکارساز ۷

۱-۲-۱- بازده کوانتومی ۸

۱-۲-۲- پاسخ‌دهی ۸

۱-۲-۳- پاسخ زمانی و پهنای باند ۹

۱-۲-۳- نویز ۹

۱-۲-۴- جریان تاریکی ۱۰

۱-۲-۴- آشکارکنندگی ۱۰

۱-۲-۵- حساسیت نوری ۱۰

۱-۳- کربن ۱۱

۱-۳-۱- هیبریداسیون اتم های کربن ۱۱

۱-۳-۲- دگرشکل‌های کربن ۱۳
۱-۳-۲-۱- دگرشکل‌های سه بعدی کربن ۱۳
۱-۳-۲-۱- الماس ۱۳
۱-۳-۲-۲- گرافیت ۱۴
۱-۳-۲-۲- دگرشکل دو بعدی کربن ۱۴
۱-۳-۲-۳- دگرشکل یک بعدی کربن ۱۶
۱-۳-۲-۴- دگرشکل صفر بعدی کربن ۱۷
۱-۳-۳- روش‌های ساخت گرافن ۱۸
۱-۳-۴- ویژگی‌های گرافن ۲۱
۱-۳-۵- کاربردهای گرافن ۲۳
۱-۳-۵-۱- مسیر جدید برای تماپس‌های قطبیده-اسپینی روی سیلیکان ۲۳
۱-۳-۵-۲- جداسازی مؤثرتر گازها با کمک غشاءهای گرافنی ۲۴
۱-۳-۵-۳- جلوگیری از خوردگی فلزها با روکش نامرئی ۲۵
۱-۴- ضرورت و هدف ۲۸

فصل دوم: مبانی و روش ها ۲۹
۲-۱- مواد شیمیایی استفاده شده در این پژوهش ۳۰
۲-۲- دستگا ه های مورد استفاده دراین پژوهش ۳۱
۲-۲-۱- دستگاه سانتریفیوژ ۳۲
۲-۲-۲- خشک‌کن الکتریکی ۳۲
۲-۲-۳- دستگاه مولد فراصوت ۳۲
۲-۲-۴- دستگاه پراش اشعه ایکس ۳۴
۲-۲-۵- طیف سنج ماورا بنفش-مرئی ۳۴
۲-۲-۶- میکروسکوپ الکترون روبشی ۳۴

۲-۲-۷- میکروسکوپ نیروی اتمی ۳۵
۲-۲-۸- میکروسکوپ الکترون عبوری ۳۶
۲-۲-۹- طیف سنج تبدیل فوریه مادون قرمز ۳۶
۲-۲-۱۰-مولتی متر ۳۶
۲-۲-۱۱-ترازوی دیجیتالی ۳۷
۲-۲-۱۲-همزن مغناطیسی-هیتر ۳۷
۲-۲-۱۳-اسیلوسکوپ ۳۸
۲-۳- نرم افزارهای مورد استفاده دراین پژوهش ۳۸
۲-۳-۱- **نرم افزار** Materials studio ۳۸
۲-۳-۲- **نرم افزار** Matlab ۳۸
۲-۳-۳- **نرم افزار** Excel ۳۸
۲-۴- روش سنتز گرافن ۳۹
۲-۴-۱- **سنتز گرافیت اکسید** ۳۹
۲-۴-۲- **سنتز گرافن اکسید** ۴۰
۲-۴-۳- **سنتز گرافن از گرافن اکسید** ۴۰
۲-۴-۴- **پودر گرافن** ۴۰
۲-۵- غیرفعال‌سازی سطح گرافن با استفاده از لیگاندهای مختلف ۴۰
۲-۵-۱- بهره‌گیری از لیگاند تیوسمی کاربازید ۴۱
۲-۵-۲- بهره‌گیری از لیگاند تیوفن-دو-کربوکسیلیک اسید ۴۱
۲-۵-۳- بهره‌گیری از لیگاند تیوفن-دو-کاربالدهید ۴۲
۲-۵-۴- بهره‌گیری از لیگاند مرکاپتو استیک اسید ۴۲
۲-۵-۵- بهره‌گیری از لیگاند تیواستامید ۴۳
۲-۵-۶- بهره‌گیری از لیگاند هیدرازین ۴۳
۲-۵-۷- بهره‌گیری از لیگاند۴-پیریدین کربوکسیلیک اسید ۴۴
۲-۶- تهیه زیرلایه ۴۴

۲-۷- ساخت آشکارساز ۴۵

۲-۸- تئوری آشکارساز p-i-n مبتنی بر گرافن ۴۶

فصل سوم: نتایج و بحث ۵۰

۳-۱- **نتایج شبیه‌سازی** ۵۱

۳-۱-۱- بررسی پاسخ فرکانسی آشکارساز p-i-n گرافنی سرعت بالا ۵۱

۳-۱-۲- بررسی پاسخ‌دهی آشکارساز p-i-n ۵۲

۳-۱-۳- بررسی آشکارکنندگی آشکارساز p-i-n ۵۲

۳-۱-۴- بررسی چگالی حالات و ساختار باندی در گرافن ۵۴

۳-۲- **نتایج عملی** ۵۶

۳-۲-۱- آشکارساز مبتنی بر گرافن خالص ۵۶

۳-۲-۱-۱- پراش اشعه ایکس گرافن خالص ۵۶

۳-۲-۱-۲-طیف UV-VIS گرافن خالص ۵۷

۳-۲-۱-۳-طیف FTIR گرافن خالص ۵۷

۳-۲-۱-۴-تصویر AFM گرافن خالص ۵۹

۳-۲-۱-۵-تصویر SEM گرافن خالص ۵۹

۳-۲-۱-۶-تصویر TEM گرافن خالص ۶۰

۳-۲-۱-۷-پاسخ زمانی آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۶۰

۳-۲-۱-۸-مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۶۱

۳-۲-۲- آشکارساز مبتنی بر گرافن غیرفعال‌شده با مقدار زیاد تیوسمی‌کاربازید ۶۲

۳-۲-۲-۱-پراش اشعه ایکس گرافن غیرفعال‌شده با مقدار زیاد تیوسمی‌کاربازید ۶۲

۳-۲-۲-۲-طیف FTIR گرافن غیرفعال‌شده با مقدار زیاد تیوسمی‌کاربازید ۶۲

۳-۲-۲-۳-تصویر AFM گرافن غیرفعال‌شده با مقدار زیاد تیوسمی‌کاربازید ۶۳

۳-۲-۲-۴-تصویر SEM گرافن غیرفعال‌شده با مقدار زیاد تیوسمی‌کاربازید ۶۴

۳-۲-۲-۵-تصویر TEM گرافن غیرفعال‌شده با مقدار زیاد تیوسمی‌کاربازید ۶۴

۳-۲-۲-۶- پاسخ زمانی آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۶۵
۳-۲-۲-۷- مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۶۶
۳-۲-۳- آشکارساز مبتنی بر گرافن غیرفعال‌شده با مقدار کم تیوسمی‌کاربازید ۶۶
۳-۲-۳-۱- طیف FTIR گرافن غیرفعال‌شده با مقدار کم تیوسمی‌کاربازید ۶۷
۳-۲-۳-۲- تصویر AFM گرافن غیرفعال‌شده با مقدار کم تیوسمی‌کاربازید ۶۸
۳-۲-۳-۳- تصویر SEM گرافن غیرفعال‌شده با مقدار کم تیوسمی‌کاربازید ۶۸
۳-۲-۳-۴- تصویر TEM گرافن غیرفعال‌شده با مقدار کم تیوسمی‌کاربازید ۶۸
۳-۲-۳-۵- پاسخ زمانی آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۶۹
۳-۲-۳-۶- مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۷۰
۳-۲-۴- آشکارساز مبتنی بر گرافن غیرفعال‌شده با تیوفن-دو-کربوکسیلیک‌اسید ۷۰
۳-۲-۴-۱- طیف FTIR گرافن غیرفعال‌شده با تیوفن-دو-کربوکسیلیک‌اسید ۷۰
۳-۲-۴-۲- تصویر AFMگرافن غیرفعال‌شده با تیوفن-دو-کربوکسیلیک‌اسید ۷۱
۳-۲-۴-۳- تصویر SEM گرافن غیرفعال‌شده با تیوفن-دو-کربوکسیلیک‌اسید ۷۲
۳-۲-۴-۴- پاسخ زمانی آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۷۲
۳-۲-۴-۵- مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۷۳
۳-۲-۵- آشکارساز مبتنی بر گرافن غیرفعال‌شده با تیوفن-دو-کاربالدهید ۷۳
۳-۲-۵-۱- طیف FTIR گرافن غیرفعال‌شده با تیوفن-دو-کاربالدهید ۷۴
۳-۲-۵-۲- تصویر AFMگرافن غیرفعال‌شده با تیوفن-دو-کاربالدهید ۷۴
۳-۲-۵-۳- تصویر SEM گرافن غیرفعال‌شده با مرکاپتو استیک اسید ۷۵
۳-۲-۵-۴- پاسخ زمانی آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۷۶
۳-۲-۵-۵- مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۷۷
۳-۲-۶- آشکارساز مبتنی بر گرافن غیرفعال‌شده با تیواستامید ۷۸
۳-۲-۶-۱- طیف FTIR گرافن غیرفعال‌شده با تیواستامید ۷۸
۳-۲-۶-۲- تصویر AFM گرافن غیرفعال‌شده با تیواستامید ۷۸
۳-۲-۶-۳- تصویر SEM گرافن غیرفعال‌شده با تیواستامید ۷۹

۳-۲-۶-۴- پاسخ زمانی آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۸۰
۳-۲-۶-۵- مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۸۱
۳-۲-۷- آشکارساز مبتنی بر گرافن غیرفعال‌شده با مرکاپتو استیک اسید ۸۲
۳-۲-۷-۱- طیف FTIR گرافن غیرفعال‌شده با مرکاپتو استیک اسید ۸۲
۳-۲-۷-۲- تصویر AFM گرافن غیرفعال‌شده با مرکاپتو استیک اسید ۸۳
۳-۲-۷-۳- تصویر SEM گرافن غیرفعال‌شده با مرکاپتو استیک اسید ۸۳
۳-۲-۷-۴- پاسخ زمانی آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۸۴
۳-۲-۷-۵- مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۸۵
۳-۲-۸- آشکارساز مبتنی بر گرافن غیرفعال‌شده با هیدرازین ۸۵
۳-۲-۸-۱- طیف FTIR گرافن غیرفعال‌شده با هیدرازین ۸۵
۳-۲-۸-۲- تصویر AFM گرافن غیرفعال‌شده با هیدرازین ۸۶
۳-۲-۸-۳- تصویر SEM گرافن غیرفعال‌شده با هیدرازین ۸۷
۳-۲-۸-۴- پاسخ زمانی آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۸۸
۳-۲-۸-۵- مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۸۹
۳-۲-۹- آشکارساز مبتنی بر گرافن غیرفعال‌شده با ۴-پیریدین کربوکسیلیک اسید ۹۰
۳-۲-۹-۱- طیف FTIR گرافن غیرفعال‌شده با ۴-پیریدین کربوکسیلیک اسید ۹۰
۳-۲-۹-۲- تصویر AFM گرافن غیرفعال‌شده با ۴-پیریدین کربوکسیلیک اسید ۹۱
۳-۲-۹-۳- تصویر SEM گرافن غیرفعال‌شده با ۴-پیریدین کربوکسیلیک اسید ۹۱
۳-۲-۹-۴- پاسخ زمانی آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۹۲
۳-۲-۹-۵- مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۹۳
نتیجه گیری ۹۴
مراجع ۹۸

فهرست شکل‌ها

شکل۱-۱: سازوکارهای متفاوت آشکارسازهای نوری، (۱) نوع ذاتی (۲) نوع غیرذاتی ۴

شکل۱-۲: ستون چهارم جدول تناوبیمندلیف ۱۲

شکل۱-۳: انواع هیبریداسیون اتم‌های کربن ۱۳

شکل۱-۴: ساختار الماس ۱۴

شکل۱-۵: ساختار لایه‌ای گرافیت ۱۵

شکل۱-۶: ساختار دو بعدی گرافن ۱۶

شکل۱-۷: انواع نانولوله‌های کربنی ۱۷

شکل۱-۸: نانولوله تک‌دیواره و نانولوله چند دیواره ۱۷

شکل ۱-۹: ساختار کروی انواع فلورن ۱۸

شکل۱-۱۰: نحوه‌ی تولید دگرشکل‌های کربن توسط گرافن ۱۹

شکل۱-۱۱: شمای ابر الکترونی روی سطح گرافن ۲۲

شکل۱-۱۲: منحنی E-K گرافن ۲۳

شکل ۱-۱۳: نمودار وابستگی هدایت گرافن به ولتاژ گیت ۲۳

شکل ۱-۱۴: شمای تماس قطبیده-اسپینی در سیلیکان ۲۵

شکل ۱-۱۵: جداسازی گاز توسط گرافن ۲۶

شکل ۱-۱۶: جلوگیری از خوردگی فلز توسط گرافن ۲۷

شکل ۱-۱۷: شمای ساختار باندی الف) نیمه‌هادی ب) فلز ج) گرافن دارای گاف انرژی د) گرافن ۲۹

شکل۲-۱: دستگاه سانتریفیوژ ۳۳
شکل ۲-۲: دستگاه خشک کن الکتریکی ۳۳
شکل ۲-۳: پراب اولتراسونیک ۳۴
شکل ۲-۴: حمام اولتراسونیک ۳۴
شکل ۲-۵: دستگاه پراش اشعه ایکس ۳۵
شکل ۲-۶: دستگاه طیف سنجی UV-Vis ۳۵
شکل ۲-۷: دستگاه میکروسکوپ الکترون روبشی ۳۶
شکل ۲-۸: دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی ۳۶
شکل ۲-۹: دستگاه میکروسکوپ الکترون عبوری ۳۷
شکل ۲-۱۰: دستگاه طیف سنج فوریه مادون قرمز ۳۷
شکل ۲-۱۱: مولتی متر ۳۸
شکل ۲-۱۲: ترازوی دیجیتال ۳۸
شکل ۲-۱۳: همزن مغناطیسی-هیتر ۳۸
شکل ۲-۱۴: اسیلوسکوپ ۳۹
شکل ۲-۱۵: ساختار تیوسمی‌کاربازید ۴۲
شکل ۲-۱۶: ساختار تیوفن-دو-کربوکسیلیک اسید ۴۳
شکل ۲-۱۷: ساختار تیوفن-دو-کاربالدهید ۴۳
شکل ۲-۱۸: ساختار مرکاپتو استیک اسید ۴۴
شکل ۲-۱۹: ساختار تیواستامید ۴۴
شکل ۲-۲۰: ساختار هیدرازین ۴۴

شکل ۲-۲۱: ساختار ۴-پیریدین کربوکسیلیک اسید ۴۵

شکل ۲-۲۲: شمایی کلی ازساختار الکترودها روی زیر لایه (۱) وتصویر زیرلایه ساخته شده ازفایبرگلاس والکترودهای مسی(۲) ۴۶

شکل ۲-۲۳: شمای آشکارساز گرافنی غیر فعال شده با لیگاند با الکترودهای مسی ۴۶

شکل ۲-۲۴: تصویر آشکارساز p-i-n مبتنی بر گرافن ۴۷

شکل ۳-۱: نمودار پاسخ فرکانسی آشکارساز p-i-n مبتنی بر گرافن ۵۲

شکل ۳-۲: نمودار پاسخ‌دهی آشکارساز p-i-n مبتنی بر گرافن ۵۳

شکل ۳-۳: نمودار آشکارکنندگی آشکارساز p-i-n مبتنی بر گرافن ۵۴

شکل ۳-۴: نمودار آشکارکنندگی آشکارساز p-i-n مبتنی بر گرافن در دو دمای مختلف ۵۵

شکل ۳-۵: صفحه گرافن و مولکول تیوسمی‌کاربازید ۵۵

شکل ۳-۶: الف) ساختار باندی گرافن خالص ب) چگالی حالات گرافن خالص ۵۶

شکل ۳-۷: الف) ساختار باندی گرافن در مجاورت مولکول تیوسمی‌کاربازید ب) چگالی حالات گرافن در مجاورت مولکول تیوسمی‌کاربازید ۵۶

شکل ۳-۸: الگوی XRD گرافن سنتز شده با روش شیمیایی ۵۸

شکل ۳-۹: طیف UV-VIS گرافن خالص ۵۸

شکل ۳-۱۰: طیف IR گرافن خالص ۵۹

شکل ۳-۱۱: تصویر AFM گرافن خالص ۶۰

شکل ۳-۱۲: تصویر SEM گرافن خالص ۶۰

شکل ۳-۱۳: تصویر TEM گرافن خالص ۶۱

شکل ۳-۱۴: پاسخ زمانی آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۶۲
شکل ۳-۱۵: مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۶۲
شکل ۳-۱۶: الگوی XRD گرافن سنتز شده با روش شیمیایی ۶۳
شکل ۳-۱۷: طیف FTIR گرافن غیرفعال‌شده با مقدار زیاد تیوسمی‌کاربازید ۶۴
شکل ۳-۱۸ تصویر AFM گرافن غیرفعال‌شده با مقدار زیاد تیوسمی‌کاربازید ۶۴
شکل ۳-۱۹: تصویر SEM گرافن غیرفعال‌شده با مقدار زیاد تیوسمی‌کاربازید ۶۵
شکل ۳-۲۰: تصویر TEM گرافن غیرفعال‌شده با مقدار زیاد تیوسمی‌کاربازید ۶۶
شکل ۳-۲۱: پاسخ زمانی آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۶۶
شکل ۳-۲۲: مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۶۷
شکل ۳-۲۳: طیف IR گرافن غیرفعال‌شده با مقدار کم تیوسمی‌کاربازید ۶۸
شکل ۳-۲۴: تصویر AFM گرافن غیرفعال‌شده با مقدار کم تیوسمی‌کاربازید ۶۸
شکل ۳-۲۵: تصویر SEM گرافن غیرفعال‌شده با مقدار کم تیوسمی‌کاربازید ۶۹
شکل ۳-۲۶: تصویر TEM گرافن غیرفعال‌شده با مقدار کم تیوسمی‌کاربازید ۷۰
شکل ۳-۲۷: پاسخ زمانی آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۷۰
شکل ۳-۲۸: مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۷۱
شکل ۳-۲۹: طیف IR گرافن غیرفعال‌شده با تیوفن-دو-کربوکسیلیک‌اسید ۷۲
شکل ۳-۳۰: تصویر AFM گرافن غیرفعال‌شده با تیوفن-دو-کربوکسیلیک‌اسید ۷۲
شکل ۳-۳۱: تصویر SEM گرافن غیرفعال‌شده با تیوفن-دو-کربوکسیلیک‌اسید ۷۳
شکل ۳-۳۲: پاسخ زمانی آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۷۴
شکل ۳-۳۳: مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۷۴

شکل ۳-۳۴: طیف IR گرافن غیرفعال‌شده با تیوفن-دو-کربوکسیلیک‌اسید ۷۵
شکل ۳-۳۵: تصویر AFM گرافن غیرفعال‌شده با تیوفن-دو- کاربالدهید ۷۶
شکل ۳-۳۶: تصویر SEM گرافن غیرفعال‌شده با تیوفن-دو-کاربالدهید ۷۷
شکل ۳-۳۷: پاسخ زمانی آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۷۸
شکل ۳-۳۸: مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۷۸
شکل ۳-۳۹: طیف IR گرافن غیرفعال‌شده با مرکاپتو استیک اسید ۷۹
شکل ۳-۴۰: تصویر AFM گرافن غیرفعال‌شده با مرکاپتو استیک اسید ۸۰
شکل ۳-۴۱: تصویر SEM گرافن غیرفعال‌شده با مرکاپتواستیک اسید ۸۱
شکل ۳-۴۲: پاسخ زمانی آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۸۲
شکل ۳-۴۳: مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۸۲
شکل ۳-۴۴: طیف IR گرافن غیرفعال‌شده با تیواستامید ۸۳
شکل ۳-۴۵: تصویر AFM گرافن غیرفعال‌شده با تیواستامید ۸۴
شکل ۳-۴۶: تصویر SEM گرافن غیرفعال‌شده با تیواستامید ۸۵
شکل ۳-۴۷: پاسخ زمانی آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۸۵
شکل ۳-۴۸: مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۸۶
شکل ۳-۴۹: طیف IR گرافن غیرفعال‌شده با هیدرازین ۸۷
شکل ۳-۵۰: تصویر AFM گرافن غیرفعال‌شده با هیدرازین ۸۸
شکل ۳-۵۱: تصویر SEM گرافن غیرفعال‌شده با هیدرازین ۸۸
شکل ۳-۵۲: پاسخ زمانی آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۸۹
شکل ۳-۵۳: مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۸۹

شکل ۳-۵۴: طیف IR گرافن غیرفعال‌شده با ۴-پیریدین کربوکسیلیک اسید ۹۱

شکل ۳-۵۵: تصویر AFM گرافن غیرفعال‌شده با ۴-پیریدین کربوکسیلیک اسید ۹۲

شکل ۳-۵۶: تصویر SEM گرافن غیرفعال‌شده با ۴-پیریدین کربوکسیلیک اسید ۹۳

شکل ۳-۵۷: پاسخ زمانی آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۹۴

شکل ۳-۵۸: مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز فلز-گرافن-فلز ۹۴

فهرست جدول‌ها

جدول۲-۱: مشخصات مواد استفاده شده برای تهیه‌ی گرافن.....۳۱

جدول۲-۲: مشخصات مواد استفاده شده برای غیرفعال‌سازی سطح گرافن.....۳۲

فصل اول

بررسی منابع