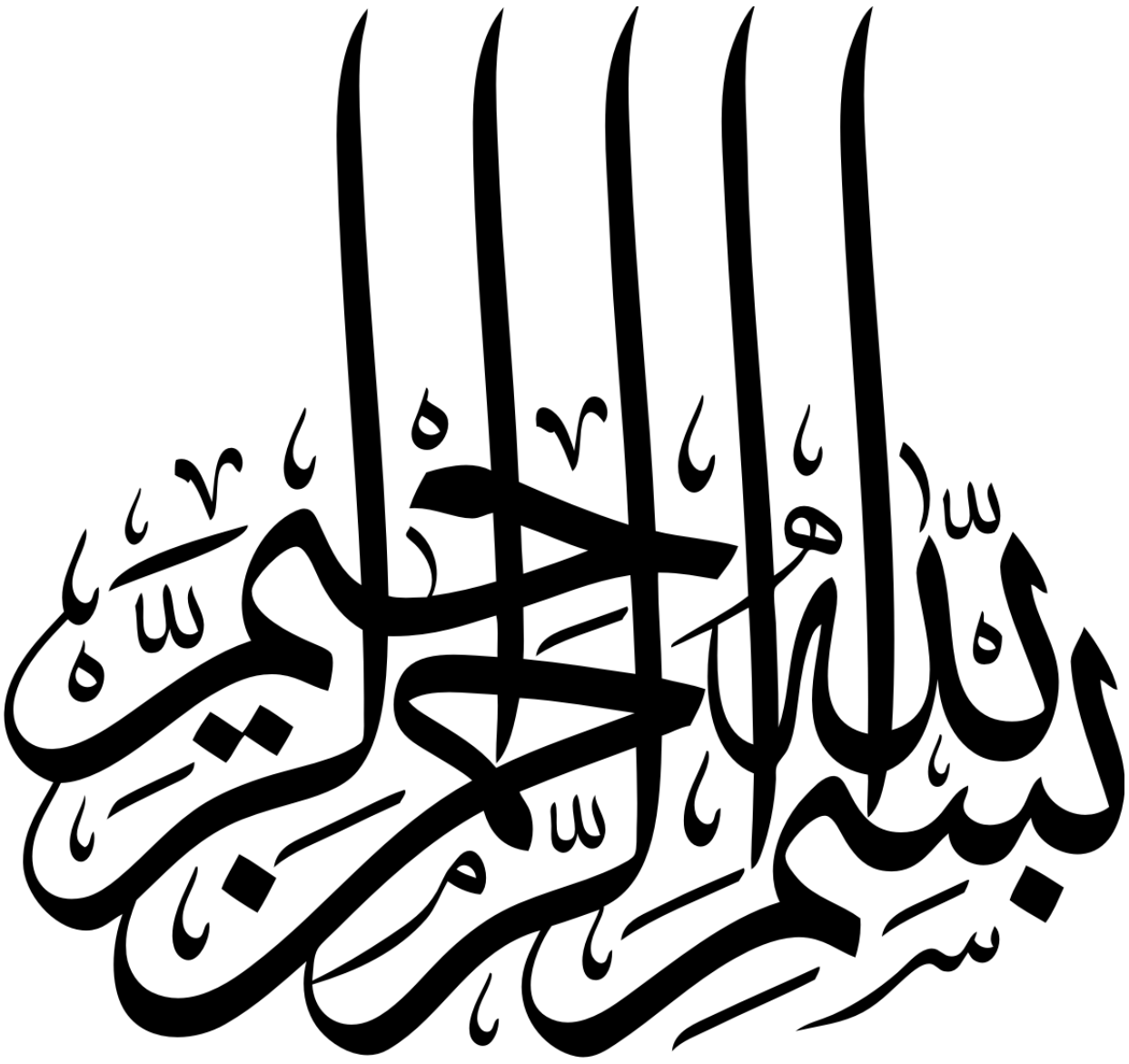
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد در گرایش نظری

موضوع:

ساخت و بررسی ویژگی‌های سنسورهای گاز بر پایه‌ی نانولوله‌های کربنی

استاید راهنما:

دکتر محمد تقی احمدی – دکتر هادی گودرزی

نگارش:

توحید شوکتی مغانجوقی

شهریور ماه ۱۳۹۳

«حق چاپ برای دانشگاه ارومیه محفوظ می‌باشد»

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای / خانم : به تاریخ شماره

با رتبه و نمره (به حروف) مورد پذیرش هیات محترم داوران قرار گرفت.

۱- استاد راهنما و رئیس هیئت داوران: دکتر

۲- استاد مشاور: دکتر

۳- داور خارجی: دکتر

۴- داور داخلی: دکتر

۵- معاون تحصیلات تکمیلی: دکتر کریم اکبری دیلمقانی

تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم

تقدیم به آنان که لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه های زیبا و یکتای زندگیم مدیون حضور سبز آنها است.

سپاسگزاری...

بر خود فرض می دانم سپاسگزار کسانی باشم که مرا در این راه یاری و تشویق نموده اند، از پدر و مادرم که دعای خیرشان همیشه بدرقه راهم بوده و همواره از حمایتشان برخوردار بوده ام.

همچنین قدردان زحمات استاید گرانقدرم می باشم که به عنوان الگو و راهنمای اینجانب بوده اند.

توحید شوکتی مغانجوقی

شهریور ۹۳

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه و پیش زمینه

۱-۱ انگیزه‌ها و اهداف..... ۱

۱-۲ خلاصه..... ۲

۱-۳ ویژگی‌های نانولوله‌های کربنی..... ۳

۱-۳-۱ مرور کلی تاریخی..... ۳

۱-۳-۲ ساختار..... ۷

۱-۳-۳ ویژگی‌های الکتریکی ۸

۱-۴ وسایل نانولوله‌ای..... ۱۲

۱-۴-۱ پراکندگی نانولوله‌ها..... ۱۲

۱-۴-۲ گذار ۱۴

۱-۴-۳ شبکه‌های نانولوله‌ای..... ۱۴

۱-۴-۴ اتصال نانولوله / فلز..... ۱۹

۱-۴-۵ ترانزیستورهای اثر میدانی..... ۲۱

۱-۵ حسگرهای نانولوله‌ای و حساسیت آن‌ها..... ۲۲

۱-۶ جذب سطحی ۲۹

۱-۶-۱ ساز و کار..... ۲۹

۱-۶-۲ جنبش شناسی جذب سطحی..... ۳۰

۱-۷ اصول خازن‌های ***MOS***..... ۳۴

۱-۸ روش شناسی میکرو حسگری..... ۳۸

۱-۸-۱ مقایسه با سنسورهای نانولوله‌ای ۴۵

فصل ۲: تکنیک‌های آزمایشگاهی

۲-۱ آماده سازی نمونه و شناسایی..... ۴۷

۲-۱-۱ نحوه‌ی آماده سازی..... ۴۷

۲-۱-۲ لایه گذاری ۴۷

۲-۱-۳ شناسایی نمونه..... ۵۰

۲-۱-۴ ساخت دستگاه..... ۵۹

۲-۲ خصوصیات انتقالی شبکه‌های نانولوله‌ای..... ۶۱

۲-۲-۱ تعیین خطاها..... ۶۲

۲-۳ آزمایش‌های حسگری..... ۶۵

۲-۳-۱ آزمایشگاهی..... ۶۵

۲-۳-۲ حسگری با استفاده از رسانایی..... ۶۶

۲-۳-۳ حسگری با بگار گیری اثر میدان..... ۶۷

فصل ۳: ویژگی‌های انتقالی شبکه

۳-۱ ویژگی‌های دستگاه ۶۹

۳-۲ تغییرات رسانایی بر حسب دما..... ۷۰

۳-۳ نتیجه گیری..... ۸۳

فصل ۴: حسگری با استفاده از رسانایی

۴-۱ پاسخ رسانایی شبکه‌ی SWNT..... ۸۵

۴-۲ جنبش شناسی جذب سطحی اکسیژن ۹۳

۴-۳ بازآفرینی اندازگیری..... ۱۰۱

۴-۴ نتیجه گیری..... ۱۰۱

فصل ۵: حسگری با استفاده از فیلم‌های کربنی ساخته شده با روش تخلیه‌ی قوس الکتریکی

۵-۱ دورنمای کار..... ۱۰۳

۵-۲ ستاپ ساخت سنسور..... ۱۰۴

۵-۳ بررسی فیلم کربنی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی ۱۰۶

۵-۴ نتایج طیف نمایی نشر نوری..... ۱۰۸

۵-۵ اندازه‌گیری‌های ویژگی‌های الکتریکی فیلم کربنی..... ۱۱۰

۵-۶ بحث و بررسی نتایج..... ۱۱۲

ضمیمه‌ی A..... ۱۱۴

ضمیه‌ی B..... ۱۱۸

پیشنهادات..... ۱۲۰

منابع و ماخذ..... ۱۲۲

فهرست جدول‌ها

۱-۱ خصوصیات جالب توجه نانو لوله‌های کربنی..... ۴

۱-۲ ویژگی‌های ذاتی آلوتروپ‌های کربن [۳] ۵

۱-۳ مروری مختصر بر ویژگی‌های سنسورهای میکرو الکترونیک..... ۴۶

۲-۱ شدت‌های نسبی $\left(I_G \text{ و } I_D\right)$ و عددهای موج انتقال رامان $\left(\nu[I_G] \text{ و } \nu[I_D]\right)$ برای باند D و باند G ی نانولوله‌های تک دیواره‌ی $HiPco$ حداکثر در طول موج‌های تحریک $\boldsymbol{\lambda_{exc}}$ مختلف ۵۲

۲-۲ مقایسه روش‌های تولید $SWNT$ ها و نسبت شدت پیک وابسته‌ی باند G به باند D..... ۵۳

۲-۳ اندیس‌های (n,m) اختصاص داده شده و مقایسه‌ی مشاهدات تجربی با انتقال رامان پیش بینی شده و انرژی‌های تحریک. مقادیر نظری با $\gamma_0 = 2.9\ eV$ محاسبه شده‌اند [۹]..... ۵۵

۲-۴ دقت اندازگیری‌های مقدار جذب..... ۵۸

۲-۵ دقت واحد شناسایی Keithley 4200. دقت یافتن منابع/اندازگیری جریان/ولتاژ به دامنه‌ی اندازگیری بستگی دارد، دقت نسبی با دامنه‌ی اندازگیری کاهش می‌یابد..... ۶۳

۲-۶ خطای شبکه‌ی$SWNT$ باریک فرابنفش – واجذب شده در دیفرانسیل رسانایی بایاس صفر، G، با رجوع به دقت‌های دامنه‌ی جریان متناسب..... ۶۴

۲-۷ خطای شبکه ی $SWNT$ باریک که جذب O_2 دارد در دیفرانسیل رسانایی بایاس صفر، G، با رجوع به دقت های جریان متناسب..... ۶۴

۲-۸ خطای شبکه‌ی $SWNT$ ضخیم که جذب O_2 دارد در دیفرانسیل رسانایی بایاس صفر، G، با رجوع به دقت‌های جریان متناسب..... ۶۴

۲-۹ خطای متوسط برای آزمایشات واجذب – فرابنفش و جذب O_2 در فصل ۴. خطا در جذب و واجذب همان مقادیر بالا است مگر این که صراحتا مقدار دیگری بیان شود. در شبکه‌ی $SWNT$ نمد ضخیم بایاس یک میلی ولتی بکار گرفته شده است که منجر به خطای بیشتر در G شده است، در حالی که برای همه‌ی دیگر شبکه‌های بایاس اعمالی ده میلی ولت بوده است..... ۶۷

۳-۱ مقاومت دو ترمیناله و جذب سطحی در $500nm$ برای شبکه‌های SWNT ضخیم و باریک که بر روی اسلاید شیشه‌ای میکروسکوپ از طریق تکنیک اسپری محلول SDS-SWNT لایه گذاری شده‌اند و سپس توسط آب یون زدوده شسته شده‌اند..... ۷۰

۳-۲ نتایج برازش برای شبکه‌ی متداخل باریک به معادله‌ی ۳-۲ و نتایج برازش برای شبکه‌ی متداخل ضخیم به معادله‌ی ۳-۳ در سرتاسر گستره‌ی دمایی $4\ K < T < 300\ K$، شکل ۳-۳ را ببینید. مقادیر خطا مانند خطای استاندارد پارامترها از طریق برازش وزنی خطای داده‌ها حاصل می‌گردد..... ۷۴

۳-۳ مقایسه‌ی انرژی‌های فونون ناحیه‌ی مرزی که بطور آزمایشگاهی بدست آمده‌اند..... ۷۴

۳-۴ نمونه‌ای از مقادیر گزارش شده‌ی T_0 که از وابستگی دمایی شبکه‌های SWNT موجود در نشریات استخراج شده است..... ۸۰

۳-۵ پارامترهای استخراج شده مربوط به رسانایی VRH غیر اهمی، رابطه‌ی ۳-۶ و شکل ۳-۵ را ببینید..... ۸۲

۴-۱ مقایسه‌ی تغییرات در رسانایی شبکه‌های نانولوله‌ای تا فشار یک اتمسفر. مواجهه با اکسیژن از خلاء آغاز می‌گردد. در صد تغییر شبکه‌ی متداخل باریک در محدوده‌ی خطایی برای ندازگیری معرفی شده است..... ۸۹

۴-۲ درصد تغییر رسانایی شبکه‌ی متداخل باریک به محض مواجهه با O_2 از فشار خلاء..... ۸۹

۴-۳ برازش پارامترها برای برازش خطی نسبت به شکل ۴-۸..... ۹۶

۴-۴ پارامترهای برازش شده برای برازش خطی به شکل ۴-۹..... ۹۹

۵-۱ پارامترهای عملیاتی فرآیند تجزیه‌ی متان در تخلیه‌ی قوس الکتریکی..... ۱۰۶

۵-۲ گونه‌های متان خالص که در طی فرآیند تجزیه تکامل یافته‌اند..... ۱۰۹

۵-۳ مقادیر ثابت‌های α، β، γ، ξ رابطه‌ی ۵-۱..... ۱۱۲

B-۱ خطا در رسانایی دیفرانسیلی بایاس صفر، G، ی شبکه‌ی SWNT باریک واجذب – فرابنفش شده در گستره‌ی دمایی $4\ K \leq T \leq 300\ K$..... ۱۱۸

فهرست شکل‌ها

۱-۱ i) تصویر TEM ازMWNT که توسط ایجیما کشف شد. مقطع عرضی هر لوله نیز نشان داده شده است. اقتباس شده از [۱]

ii) ساختار نانولوله (Chiral) با سرپوش نیم کره، اقتباس شده از [۲]..... ۵

۱-۲ شبکه‌ی شش ضلعی پیچیده نشده نانولوله. اگر نقطه‌ی O به A و B به B' متصل شود، نانولوله با بردار کایرال $C_h = (4,2)$ بدست می‌آید. θ زاویه‌ی کایرال لوله را نشان می‌دهد، در حالی که بردار انتقال که بر محور لوله عمود است با T نشان داده می‌شود. بر گرفته از [۳]..... ۷

۱-۳ ساختار باند نانولوله. a) نمودار کلی برای نمایش ساختار باند نانولوله‌ی شبه‌رسانا. b) نمودار کلی برای نمایش ساختار باند نانولوله-ی فلزی. حالات الکترونی مجاز به وسیله‌ی فصل مشترک بردار موج مجاز (خطوط سبز- قرمز) و ساختار باند گرافن مشخص شده است. c) نمودار کلی رابطه‌ی پراکندگی فلزی و شبه‌رسانا، اولین زیر باندها نشان داده شده‌اند. d) نمودار کلی ساختار نانولوله‌ی شبه-رسانای زیگزاگ. e) نمودار کلی ساختار نانوله‌ی فلزی آرمچیر. اقتباس شده از [۴]..... ۱۰

۱- ۴ a) وb) چگالی حالت‌های الکترونیکی برای دو نانولوله‌ی زیگزاگ [۵]. $(n_1, n_2) = (10,0)$ در تراز فرمی چگالی صفری از حالت‌ها را به نمایش می‌گذارد و بنا بر این نیمه‌رسانا است. $(n_1, n_2) = (9,0)$ در تراز فرمی چگالی حالت غیر صفر از خود نشان می‌دهد و بنابراین فلزی است. c) و d) گذار vHs باند داخلی فلزی، E_{ii}^{M}، و شبه رسانا، E_{ii}^{S}، نانولوله‌های کربنی. زمانی که انرژی برانگیزش لیزر با گذار باند داخلی در حالت تشدید است، ویژگی‌های متمایز برای مقادیر خاص (n,m) در طیف رامان با این گذارها جفت می‌شود، اقتباس شده از [۶]..... ۱۱

۱-۵ یک مولکول سدیم دودسیل سولفات سورفکتانت آنیونی (SDS)، $C_{12}H_{25}SO_4Na$، دنبالهای از۱۲ کربن آبگریز[۱] و یک گروه سولفاته‌ی قطبی..... ۱۳

۱-۶ طرح کلی دیاگرام باندی که تزریق حفره‌ها از یک فلز به باند ظرفیت یک $SWNT$ با آلایش نوع P را در ولتاژهای گیت متفاوت نشان می‌دهد. ولتاژهای منفی گیت خمیدگی باندی به طرف بالا را القا می‌کند و سطح فرمی را به باند والانس انتقال می‌دهد. سد شاتکی در سطح مشترک فلز/ نانولوله باریک شده است که سبب افزایش احتمال تونل زنی می‌گردد. ولتاژهای گیت مثبت یک خمیدگی به طرف پایین در باند والانس القا می‌کنند و به وسیله‌ی تزریق حفره‌ها از اتصال سمت چپ فلزی باید بطور موثری یک سد بلند غالب گردد..... ۲۰

۱-۷ a) اثر جذب سطحی اکسیژن در یک حالت حرارت دیده (خط قزمز) به همراه افزایش فشار اکسیژن (نارنجی، سبز روشن، سبز تیره و آبی روشن) و شرایط محیطی (آبی) که بطور آزمایشگاهی اندازگیری شده است. b) اثر آلایش پتاسیم بر روی $SWNT\text{-}FET$ ها که بطور آزمایشگاهی اندازگیری شده است، منحنی‌ها از راست به چپ به افزایش مقدار پتاسیم پاسخ داده‌اند [۷]..... ۲۵

[۱] Hydrophobic

۱-۸ انرژی پتانسیل (U) یک کمپلکس ماده‌ی جذب شده / زیر لایه هنگامی که ماده‌ی جذبی از $z = \infty$ به سطح یعنی $z = 0$ نزدیک می‌شود. سه وضعیت تعادل در نمودار نشان داده شده است: a) جذب فیزیکی مولکولی. b) جذب شیمیایی مولکولی. c) جذب شیمیایی تفکیکی. اقتباس شده از [۸]..... ۳۰

۱-۹ نفوذ در یک محیط همسانگرد. زمانی که به سیستم ما اعمال می‌گردد، منحنی A می‌تواند به عنوان تراکم اولیه مطرح گردد در مقابل x نیز نمایه‌ی شبکه‌ی نانولوله‌ای در $t = 1/64$ است. منحنی B کمی بعدتر را نشان می‌دهد $(t = 1/8)$ و نشان می‌دهد که نمایه‌ی تراکم بر روی x گسترش یافته است..... ۳۲

۱-۱۰ a) نمودار کلی از یک خازن MOS ساده. b) نمودار باند انرژی خازن $p\text{-}Si\ MOS$ در بایاس معکوس. Q_s بار القائی سطح، Q_n بار لایه‌ی وارونی[۱]، Q_w بار فضایی[۲]، W عرض لایه‌ی بار فضایی، V_G ولتاژ گیت، V_S ولتاژ بار سطحی و E_C، E_i، E_F و E_V انرژی های باند رسانش، به ترتیب انرژی سطح فرمی ذاتی و انرژی باند ظرفیت هستند..... ۳۴

۱-۱۱ a) طرح کلی مدار مدل مدار معادل $d.c$. b) مدل معادل سیگنال کوچک. در این جا C_o ظرفیت خازنی اکسید، V_{BI} ولتاژ داخلی موجود در شبه‌رسانا، C_s ظرفیت $d.c$ ی شبه‌رسانا، C_{IT} ظرفیت $d.c$ بارهای ذخیره شده در تله‌های فصل مشترک، C_P و C_n ظرفیت دیفرانسیلی حفره‌ها/الکترون‌ها در شبه‌رسانا و C_{it} نیز ظرفیت دیفرانسیلی بار ذخیره شده در تله‌های فصل مشترک است..... ۳۵

۱-۱۲ منحنی ولتاژ ظرفیت خازنی MOS یک دستگاه $p\text{-}Si$ در فرکانس سیگنال کوچک بالا، $f_{AC} = 100\ kHz$. مشتق ریاضی dC/dV_G یک پیک مینیممی در V_{FB} دارد. رفتار سیستم را می‌توان با شروع از سمت چپ تشریح کرد، $V \ll 0$، حفره‌ها انباشته می‌شوند. هنگامی که ولتاژ منفی کاهش می‌یابد یک لایه‌ی تخلیه به عنوان یک دی الکتریک سری با گیت اکسید عمل می‌کند. هنگامی که ولتاژ خیلی مثبت می‌گردد، بارهای منفی به سطح شبه‌رسانا جذب می‌شوند و حامل‌ها معکوس می‌گردند..... ۳۹

۱-۱۳ طرح کلی نمودار یک سنسور هیدروژن $MOSFET$ ۴۱

۱-۱۴ طرح ساده‌ی نمایش سرچشمه‌ی سیگنالِ سنسور اکسید – فلز شبه‌رسانا. شکل سمت چپ: جذب شیمیایی اکسیژن از فاز گازی منجر به عدم تحرک الکترون‌های رسانش در ناحیه‌ی نزدیک سطح می‌گردد. شکل سمت راست: گازهای کاهنده اکسیژن چسبیده به سطح را جدا می‌کنند، بنابراین الکترون‌ها را برای بازگشت به داخل کریستال آزاد می‌کنند..... ۴۲

[۱] Inversion layer
[۲] Space-charge

۲-۱ a) ستاپ آزمایشی برای آزمایش حس گاز. b) دیاگرام شماتیک نانولوله‌های اسپری شده بر روی دو الکترود اتصال طلایی سنسور.....۴۸

۲-۲ مد بدون اتصال، انحراف تنظیم شده است، تصویر AFM شبکه‌ی غیر تراوشی اسپری شده بر روی زیر لایه‌ی کوارتزی. کوچکترین ابعاد $2\ nm \sim$ است، اکثریت ساختارها بیش از این مقدار هستند که نشان دهنده‌ی بسته‌های $SWNT$ است.....۴۹

۲-۳ تفکیک انرژی vHs در چگالی حالت‌های $SWNT$ [۹]. محاسبه شده با تقریب تنگ بست با مقادیر انرژی برهمکنش کربن – کربن $\gamma_0 = 2.9\ eV$ و طول پیوند کربن – کربن $a_{C-C} = 0.144\ nm$.....۵۱

۲-۴ طیف رامان برای نانولوله‌های تک دیواره‌ی $HiPco$ با استفاده از طول موج‌های تحریک مختلف.....۵۳

۲-۵ طیف رامان برای $SWNT$ های $HiPco$ با استفاده از طول موج‌های تحریک مختلف.....۵۵

۲-۶ طیف جذبی فرابنفش – مرئی شبکه‌ی $SWNT$ بر روی زیر لایه‌ی شیشه‌ی میکروسکوپ، $\Delta\lambda = 10\ nm$. نواحی جذب مربوط به ساختار باند نانولوله‌های فلزی یا شبه رسانا در تصویر موجود است و می‌توان آن‌ها را به گذار از باند والانس به باند رسانش تکینگی-های وان هاو نسبت داد و به صورت $V_n \rightarrow C_n$ برچسب زد، که در آن n یک اندیس صعودی موقعیت تکینگی وان هاو از $E = 0$ است. گستردگی پیک و انتقال قرمز پیک‌ها به سبب فرونشانی بسته‌ها و برهمکنش با زیر لایه مورد انتظار بود.....۵۷

۲-۷ شکل سمت چپ: ساختار دستگاه $SWNT - MOS$ اتصال بالا شامل الکترود ساده‌ی سیلیکون آلاییده نوع p (بور) با $20\ nm\ SiO_2$ و $30\ nm\ Si_3N_4$، با $100\ nm$ اتصال اهمی آلومینیومی. شبکه‌ی $SWNT$ از طریق ماسک فشردگی مکانیکی به ناحیه‌ی تمرکز نانولوله لایه گذاری می‌گردد. شکل سمت راست: ساختار همان دستگاه که به عنوان یک $SWNT - FET$ بکار می‌رود، طول کانال $L_C = 2.5\ mm$ و عرض کانال $W = 4\ mm$.....۵۹

۲-۸ دو نمونه‌ی شبکه‌ی $SWNT$ که بر سرگاه سیستم دو در خط[۱] سوار شده است و دو نوع پیکربندی الکترود را که در این پایان نامه بکار رفته است نشان می‌دهد. الکترودها شامل: a) الکترود متداخل Au/Cr که بصورت تبخیر گرمایی بر روی زیرلایه‌ی شیشه‌ی میکروسکوپ لایه گذاری شده‌اند، b) الکترودهای نواری Au/Cr که بصورت تبخیر گرمایی بر روی زیر لایه‌ی سیلیکون آلاییده لایه گذاری شده‌اند، می‌باشند.....۶۱

[۱] DIL header

۲-۹ طیف لامپ فرابنش منبع برای عمل واجذبی در یک سرماسنج. پیک تیز در $365\ nm$ تابش از جیوه را نشان می‌دهد و لپ‌های پهن نمودار ناشی از تابش از روکش فسفری لامپ است.....۶۲

۲-۱۰ ستاپ آزمایشگاهی برای آزمایشات حسگری.....۶۶

۳-۱ مقاومت بر حسب جذب سطحی در $500\ nm$ و ضخامت شبکه‌های $SWNT$ فراهم شده بر اساس استنتاج از قانون بیر. میله‌های خطا، خطا در ضخامت شبکه‌های $SWNT$ استنتاج شده از قانون بیر را نشان می‌دهند، همان گونه که در قسمت ۲-۱-۳ نیز شرح داده شده است. نقاط مشخص شده متناظر با شبکه‌های $SWNT$ متداخل باریک (مقدار جذب کم) و متداخل ضخیمی (مقدار جذب زیاد) هستند که این فصل به آن‌ها منسوب است.....۷۱

۳-۲ ویژگی $I-V$ در دمای اتاق ($300\ K\sim$) و $4\ K$ برای شبکه‌های $SWNT$ متداخل ضخیم و متداخل باریک. میله‌های خطا توسط نقاط داده‌ها پوشیده شده‌اند.....۷۲

۳-۳ رسانایی دیفرانسیلی بایاس صفر بر حسب دما برای شبکه‌های $SWNT$ متداخل باریک و متداخل ضخیم، میله‌های خطا توسط نقاط داده پوشیده شده‌اند. برازش وزنی خطای داده بر روی رابطه‌ی ۳-۲ با خطوط توپر نشان داده شده است. مواجهه‌ی شبکه‌ی متداخل باریک با هوای آزمایشگاهی موجب افزایش رسانایی در دمای اتاق نسبت به حالت واجذب – فرابنفش تا حدود 640% می‌شود.....۷۲

۳-۴ رسانایی (G) بر حسب $1/T^{1/4}$ برای شبکه‌ی متداخل باریک و شبکه‌ی SWNT متداخل باریک در حالات واجذب – فرابنفش و در معرض هوای آزمایشگاهی قرار گرفته. خط تو پر برازش خطی داده‌ها را نشان می‌دهد.....۷۳

۳-۵ نتایج برازش وزنی خطا برای رسانش جهش دامنه متغییر (VRH) وابسته به میدان، رابطه‌ی ۳-۶، در دمای $T=4\ K$ و $T=10\ K$ در حالت‌های واجذب – فرابنفش و جذب اکسیژن. میله‌های خطا توسط نقاط داده‌ها پوشانده شده است.....۸۱

۴-۱ مواجهه‌ی شبکه‌های متداخل باریک و متداخل ضخیم SWNT به تابش فرابنفش. میزان خطا برای شبکه‌های متداخل باریک و متداخل ضخیم SWNT$G\pm1.5\%$ است، میله‌های خطا نشان داده نشده‌اند.....۸۶

۴-۲ پاسخ شبکه‌های متداخل بارک و متداخل ضخیم به مواجهه با O_2 بعد از حالت واجذب – فرابنفش. افزایش رسانایی برای شبکه‌ی متداخل باریک SWNT بیش از شبکه‌ی متداخل ضخیم SWNT است. برای هر دو شبکه‌ی SWNT، $V=10\ mV$ است. خطا برای هر دو شبکه $G\pm1.5\%$ است، میله‌های خطا نشان داده نشده‌اند.....۸۷

۴-۳ پاسخ شبکه‌های SWNTی متداخل باریک و متداخل ضخیم به چرخه‌ی O_2/ خلاء ($\sim 1 \times 10^{-5}\ mbar$ و $\sim 1 \times 10^{-3}\ mbar$) از یک حالت در معرض هوای آزمایشگاهی قرار گرفته. برای هر دو شبکه‌ی SWNT ولتاژی برابر $V = 10\ mV$ بکار برده شده است. خطا برای هر دو شبکه‌ی متداخل باریک و متداخل ضخیم $G \pm 1.5\%$ است، میله‌های خطا در تصویر نشان داده نشده‌اند..... ۹۰

۴-۴ داده‌های مقدماتی مواجهه با گاز متان را برای شبکه‌ی SWNT که در حالت واجذب – فرابنفش شده و در خلاء ($\sim 1 \times 10^{-5}\ mbar$) قرار دارد را نشان می‌دهند. ولتاژی برابر $V = 10\ mV$ برای هر دو شبکه به کار برده شده است. ضخامت نمونه‌های ۱ و ۲ در حدود ضخامت نمونه‌های متداخل باریک و متداخل ضخیمی است که در ادامه‌ی این فصل ارائه خواهد شد.....۹۴

۴-۵ مقاومت بر حسب مقدار جذب شده در $\lambda = 500\ nm$ و ضخامت شبکه‌ی SWNT بر روی اسلاید شیشه‌ای میکروسکوپ لایه گذاری شده است. میله‌های خطا، خطا در استنتاج ضخامت شبکه‌ی SWNT از قانون بیر را نشان می‌دهند، قسمت ۲-۱-۲ را ببینید. خطا در اندازگیری‌های مقدار جذب برابر $\Delta A \pm 0.002\ A$ است.....۹۴

۴-۶ نمونه‌های باریک و ضخیم SWNT به مدت 50 ساعت در معرض تابش فرابنفش قرار داده شده‌اند. ولتاژاعمالی به نمونه باریک $V_{\text{نمونه باریک}} = 10\ mV$ و ولتاژ اعمالی به نمونه ضخیم برابر $V_{\text{نمونه ضخیم}} = 2\ mV$ بوده است. خطا در رسانایی $\Delta G_{\text{نمونه باریک}} = 6\%$ و $\Delta G_{\text{نمونه ضخیم}} = 12\%$ است، میله‌های خطا نشان داده نشده‌اند. ضخامت نمونه نرخ واجذب را معیین می‌کند.....۹۵

۴-۷ $G(t)/G(t=0)$ بر حسب زمان برای نمونه‌های باریک و ضخیم SWNT که در $t = 0$ بعد از یک دوره‌ی ۲۴ ساعته با اکسیژن مولکولی با دو فشار $50\ kPa$ و $102\ kPa$ مواجه می‌گردد. ولتاژاعمالی به نمونه باریک $V_{\text{نمونه باریک}} = 10\ mV$ و ولتاژ اعمالی به نمونه ضخیم برابر $V_{\text{نمونه ضخیم}} = 1\ mV$ بوده است. خطا در رسانایی $\Delta G_{\text{نمونه باریک}} = 3.5\%$ و $\Delta G_{\text{نمونه ضخیم}} = 11\%$ است، میله‌های خطا نشان داده نشده‌اند.....۹۵

۴-۸ $\boldsymbol{\Delta G} = \frac{G(t)}{G(t=0)} - 1$ بر حسب زمان برای نمونه‌های باریک و ضخیم که در مقیاس دو – لگاریتم رسم شده است. ولتاژاعمالی به نمونه باریک $V_{\text{نمونه باریک}} = 10\ mV$ و ولتاژ اعمالی به نمونه ضخیم برابر $V_{\text{نمونه ضخیم}} = 2\ mV$ بوده است. خطا در رسانایی $\Delta G_{\text{نمونه باریک}} = 3.5\%$ و $\Delta G_{\text{نمونه ضخیم}} = 11\%$ است، میله‌های خطا نشان داده نشده‌اند.....۹۷

۹-۴ $\Delta G(t)$ بر حسب زمان برای نمونه‌های باریک و ضخیم که در محورهای $-\log(\Delta G(t))$– خطی – زمان ترسیم شده است. ولتاژ اعمالی به نمونه باریک $V_{\text{نمونه باریک}} = 10\,mV$ و ولتاژ اعمالی به نمونه ضخیم برابر $V_{\text{نمونه ضخیم}} = 2\,mV$ بوده است. خطا در رسانایی $\Delta G_{\text{نمونه باریک}} = 3.5\%$ و $\Delta G_{\text{نمونه ضخیم}} = 11\%$ است، میله‌های خطا نشان داده نشده‌اند.....۹۹

۱۰-۴ انتقال بار از سد پتانسیل V_S. علاوه بر تحریک گرمایونی از میان سد، الکترون‌ها ممکن است از میان حالت‌های دهنده‌ی جایگزیده جهش کنند [۱۰]. هنگامی که جذب سطحی و انتقال بار همراه با آن انجام شد، یک لایه‌ی دوقطبی تشکیل می‌گردد که شامل مولکول‌های O_2 که با بار منفی شارژ شده‌اند و ناحیه‌ی بار فضا که بطور مثبت شارژ شده است. این که نرخ ورود الکترون‌ها در سطح بطور نمایی به ارتفاع سدی وابسته است که خود با شمار الکترون‌های در سطح افزایش می‌یابد، یک فرآیند خود محدود کننده است.....۱۰۰

۱-۵ ستاپ فرآیند تجزیه‌ی متان با تخلیه‌ی قوس الکتریکی.....۱۰۴

۲-۵ الف) تصویر میکروسکوپ نوری از دو الکترود، قبل از شروع فرآیند رشد فیلم کربنی، ب) تصویر میکروسکوپ نوری از دو الکترود، بعد از رشد فیلم کربنی.....۱۰۵

۳-۵ تصاویر SEM از فیلم کربنی ساخته شده. حالت تصویر برداری الف) $1{,}100\times$ در $20\,kV$، ب) $1{,}200\times$ در $10\,kV$، ج) $1{,}800\times$ در $20\,kV$ و د) $2{,}000\times$ در $20\,kV$.....۱۰۷

۴-۵ طیف اسپکتروسکوپی نشر نوری فاز نخست گونه‌های نمو کرده در متان.....۱۰۹

۵-۵ طیف اسپکتروسکوپی نشر نوری دومین فاز گونه‌های نمو کرده در متان.....۱۰۹

۶-۵ طرح شماتیک ستاپ بکار رفته برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیلم کربنی.....۱۱۰

۷-۵ نمودارهای جریان – ولتاژ فیلم کربنی، الف) بدون حضور گاز متان، ب) در مواجهه با ppm ۲۰۰ گاز متان، ج) در مواجهه با ppm ۴۰۰ گاز متان، د) در مواجهه با ppm ۸۰۰ گاز متان، هـ) در مواجهه با ppm ۱۰۰۰ گاز متان، ز) همه‌ی داده‌های اندازه‌گیری شده. نقاط در نمودارها داده های حاصل از آزمایش را نشان می دهد و منحنی‌ها حاصل برازش داده‌ها به مدل نمایی است.....۱۱۱

A-۱ ستاپ آزمایشگاهی برای اندازگیری‌های جریان نشتی. الکترود مرجع متشکل از Ag/AgCl، الکترود شمارنده متشکل از فویل پلاتینی و الکترود کار نیز با اتصال الکتریکی به صفحه‌ی برنجی وصل می‌گردد که خود به اتصال اهمی آلومینیومی ویفر سیلیکونی متصل

است. پتانسیواستات پتانسیل الکترود کار را نسبت به الکترود مرجع کنترل می‌کند و به طور هم زمان جریان بین الکترودهای کار و شمارنده را اندازگیری می‌کند..... ۱۱۶

چکیده

نانولوله‌های کربنی موادی جالب با ویژگی‌های مکانیکی و الکترونیکی فوق العاده‌ای هستند. نانولوله‌های کربنی می‌توانند فلزی یا شبه‌رسانا باشند. هر دو نوع ویژگی‌هایی دارند که مواد متعارف را به مبارزه می‌طلبند. ماهیت الکترونیکی یک بعدی این مواد منجر به بیشترین میزان حساسیت به تغییرات انرژی موضعی می‌گردد که برای یک قطعه به عنوان حسگر خاصیتی ایده‌ال و مطلوب است.

در حال حاضر روشی برای تولید نانولوله‌هایی با ویژگی الکترونیکی معیین وجود ندارد و هر نوع تمایزی تنها از طریق فرآوری مجموعه‌ای ناهمگن از نانولوله‌ها میسر می‌گردد. اخیرا شبکه‌های نانولوله‌های کربنی ویژگی‌های جالب توجه و جذابی برای کاربردهای الکترونیکی از خود نشان داده‌اند.

قسمت عمده‌ی این پایان نامه به مطالعه‌ی ویژگی‌های انتقالی شبکه‌های ضخیم و باریک نانولوله‌های کربنی تک دیواره و پاسخ الکتریکی آن‌ها به جذب سطحی اکسیژن در یک هندسه‌ی مقاومتی ساده می‌پردازد. در این مطالعه مشخص گردید که ضخامت شبکه خصوصیات الکتریکی مجموعه‌ی شبکه را معیین می‌کند، شبکه‌های باریک خصوصیات انتقالی شبه‌رسانا از خود نشان می‌دهند، شبکه‌های ضخیم نیز بیشتر رفتاری فلزی دارند. همچنین در این مطالعه معیین گردید که پاسخ شبکه‌های نانولوله‌ای به مواجهه با اکسیژن به عمل آوری فرابنفش وابسته است. شبکه‌های واجذب – فرابنفش شده به محض مواجهه با اکسیژن افزایش در رسانایی را به نمایش می‌گذارند، در حالی که شبکه‌هایی که دارای اکسیژن جذب شده در سطح خود هستند در مواجهه با اکسیژن بیشتر کاهش در رسانایی به نمایش می‌گذارند. شبکه‌های نانولوله‌ای باریک‌تر یا به عبارتی شبه‌رساناتر، در مواجهه با اکسیژن تغییر در رسانایی بیشتری از خود نشان می‌دهند.

در قسمت نهایی این پایان‌نامه نیز رفتار الکتریکی فیلم‌های کربنی که با استفاده از تکنیک تجزیه‌ی متان با تخلیه‌ی قوس الکتریکی حاصل شده‌اند مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. مشخصه‌ی $(I - V)$ فیلم‌های کربنی در حضور و عدم حضور گاز مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. آزمایش نشان می‌دهد که جریان عبوری از فیلم‌های کربنی وقتی که غلظت گاز متان از ۲۰۰ به ppm ۱۰۰۰ افزایش می‌یابد، زیاد می‌گردد. این پدیده که نتیجه‌ی آن تغییر رسانایی است می‌تواند به عنوان مشخصه‌ی حسگری در یک سنسور گاز به کار رود.

فصل ۱

مقدمه و پیش‌زمینه

۱–۱ انگیزه‌ها و اهداف

نانولوله‌های کربنی ویژگی‌های خاص فراوانی دارند که آنها را برای استفاده به عنوان حسگر مطلوب می‌کند، از جمله ابعاد کوچک، استحکام بالا، رسانایی الکتریکی و گرمایی بالا و مساحت سطحی در نوع خود زیاد. پاسخ حسگری نانولوله‌های کربنی به طور مستقل در ادبیات خازنی، مقاومتی و هندسه‌ی ترانزیستورهای اثر میدانی شرح داده می‌شود. احتمال این که برای یک سنسور همه‌ی سه هندسه‌ی حسگری در یک وسیله ترکیب شود وجود دارد. خازن‌های نیمه‌رسانای اکسید فلزی(MOS) یک فناوری مهم سنسور هستند. برتری این ساختار در حساسیت و بهگزینی بالا، زمان پاسخ دهی سریع، هزینه‌ی پایین و سایز مجتمع کوچک می‌باشد. مهمترین برتری سنسورهای (MOS) امکان ساخت آن‌ها با فناوری اصلاح شده‌ی میکروالکترونیک می‌باشد. حساسیت به گونه‌ی گازی بوسیله‌ی واکنش شیمیایی آنالیت درسطح فلزی کاتالیزگر تعیین می‌شود.

انتشار محصول واکنش از طریق کاتالیزگر فلزی، سیگنال حسگری را فراهم می‌کند. محدوده‌ی حسگری برای هر گونه در این نوع سنسورها به کنش کاتالیزگری الکترود گیتی فلزی وابسته است. امروزه رایج‌ترین سنسورهای (MOS) با بکار بردن یک گیت پالادیومی برای کاتالیزگری، با اجازه‌ی انتشار دادن از طریق گیت فلزی مونجر به تجزیه‌ی هیدروژن می‌شوند. مهمترین عیب این نوع سنسورها دامنه‌ی محدود حساسیت آن‌ها است.

نشان دادن شایستگی شبکه‌های نانولوله‌های کربنی تک دیواره به عنوان گیت فلزی در سنسورهای (MOS) و ارزیابی این که چنین وسیله‌ای مناسب برای عمل به عنوان ترانزیستور اثر میدانی، سنسور پایه مقاومتی و خازن (MOS) به طور هم زمان می‌تواند باشد، از اهداف این پایان‌نامه است. وابستگی ویژگی‌های این وسیله با ضخامت شبکه‌ی نانولوله‌ها تعیین خواهد شد. نقش تراز فرمی نیز به اتصال بالا و پایین هندسه‌ی این وسیله وابسته است. تا جایی که می‌دانم این ناحیه تا بحال مورد بررسی قرار نگرفته است. برای این که مفاهیم تحقیق در حد ممکن گسترده باشند یک سیستم اولیه که شامل شبکه‌ای از نانولوله‌های تک دیواره است در برهمکنش با اکسیژن در نظر گرفته خواهد شد. نانولوله‌های کربنی، یک دیواره برای رویداد