

اللَّهُمَّ صَلِّ وَسَلِّمْ وَارْحَمْ مُحَمَّدًا



دانشکده علوم پایه

بر تعالی

تأییدیه اعضای هیأت داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

اعضای هیأت داوران نسخه نهایی پایان نامه خانم/آقای یعقوب رضائی کمار علیا رشته : فیزیک جامدات تحت عنوان: بررسی خواص حسگری نانو ترکیب CNT/SnO_2 برای گاز مایع (LPG) را از نظر فرم و محتوا بررسی نموده و آن را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد و برگزاری جلسه دفاعیه در تاریخ ۹۱/۴/۳ مورد تأیید قرار دادند.

اعضای هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر اسماعیل ساعی ور	دانشیار	
۲- استاد ناظر داخلی	دکتر احمد یزدانی	دانشیار	
۳- استاد ناظر داخلی	دکتر احمد مشاعی	دانشیار	
۴- استاد ناظر خارجی	دکتر رضا پور صالحی	استادیار	
۵- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر احمد مشاعی	دانشیار	

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، دانش آموختگان 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 دانش آموختگی 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 لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می‌شود.

نام و نام خانوادگی

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 فیزیک است که در سال ۹۱ در دانشکده علوم پایه دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر اسماعیل ساعی و ایرانی زاد، 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 را به 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 **یعقوب رضایی کمارعلیا** دانشجوی رشته **فیزیک** مقطع **کارشناسی ارشد** تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی:

تاریخ و امضا:



دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده علوم پایه

پایان نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد فیزیک (حالت جامد)

بررسی خواص حسگری نانوترکیب SnO_2/CNT برای گاز مایع (LPG)

نگارنده:

یعقوب رضایی کمارعلیا

استاد راهنما:

دکتر اسماعیل ساعی ویرانی زاد

تابستان ۱۳۹۱

تقدیم بہ :

روح پاک پدرم

کہ عالمانہ بہ من آموخت تا چگونہ در عرصہ زندگی، ایستادگی را تجربہ نمایم

و بہ مادرم

دریای بی کران فداکاری و عشق کہ وجودم برایش ہمہ رنج بود و وجودش برایم ہمہ مہر

مشکر و قدردانی

خدا را بسیار سپاس که بار دیگر لطف و رحمت خود را شامل این بنده حقیر نمود و قرار گرفتن در این جایگاه را در نامه سرنوشت من نگاشت.

از استاد ارجمند جناب آقای دکتر اسماعیل ساعی و ر ایرانی زاد، که همواره مشوق و راهنمای اینجانب بودند و بنده را در به پایان رساندن این مهم یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از خانواده عزیز و مهربانم نیز که با صبر و بردباری و دعای خیرشان، همواره تکیه گاه محکمی برایم بودند تشکر می‌کنم. از تمامی اساتید گرامی که در دوره کارشناسی ارشد افتخار حضور در محضرشان نصیب بنده گردید، بسیار سپاس گذارم.

در پایان لازم است از تمامی دوستان و همراهانی که اوقات بسیار زیبایی را با آن ها گذراندم و تمامی عزیزانی که در تدوین و نگارش این پایان نامه مرا یاری نمودند، تشکر و قدردانی نمایم.

چکیده

در تحقیق حاضر، تأثیر غلظت و قطر نانولوله های کربنی چند دیواره در بهبود کارایی حسگر گازی SnO_2 بررسی شده است. لذا لایه های نازک $\text{SnO}_2/\text{MWCNTs}$ با روش نوین سل-ژل و لایه نشانی چرخشی جهت کاربرد در حسگری گاز مایع (LPG) مورد مطالعه قرار گرفته است. لایه های نازک $\text{SnO}_2/\text{MWCNTs}$ با درصدهای وزنی مختلف ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ و همچنین قطرهای مختلف ۲۰-۱۰ nm و ۳۰-۲۰ nm نانولوله های کربنی چند دیواره ساخته شده است. لایه های نازک بعد از آماده سازی، در دمای 500°C پخت شده و سپس اتصالات الکتریکی توسط دستگاه کندوپاش DC جهت اندازه گیری مقاومت سطحی لایه ها ایجاد شده است.

نتایج مشخصه یابی FE-SEM نشان می دهد که با افزایش درصد وزنی نانولوله های کربنی چند دیواره، تخلخل سطح لایه های نازک افزایش یافته است. حساسیت کلیه حسگرها نسبت به گاز مایع (LPG) مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج نشان می دهند که با افزایش قطر و درصدهای وزنی نانولوله های کربنی چند دیواره، حساسیت حسگرها نسبت به گاز مایع افزایش یافته است. بهترین حساسیت حسگری اندازه گیری شده در دمای 250°C ، مربوط به نمونه $\text{SnO}_2/(15\%, d=20-30\text{nm})$ MWCNTs در برابر 3000 ppm گاز مایع در اتمسفر ازت بوده که تقریباً ۱۲ برابر حساسیت SnO_2 خالص در شرایط مشابه می باشد. این پدیده به دلیل خواص انتقال الکترونی بالا و همچنین نسبت سطح به حجم نانولوله های کربنی چند دیواره می باشد.

از دیگر موفقیت های بدست آمده در این تحقیق، کاهش دمای کار از 350°C به 250°C است که باعث کاهش توان مصرفی می شود. این امر قابلیت کاربرد صنعتی این حسگر را نشان می دهد.

کلید واژه: حسگر گازی، نیمرسانا، دی اکسید قلع، نانولوله های کربنی چند دیواره، لایه نازک، گاز مایع

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ث	فهرست جدول‌ها
ج	فهرست شکل‌ها
۱	فصل ۱- نیمرساناها و نانولوله‌های کربنی
۲	۱-۱ نیمرساناها
۳	۱-۱-۱ نیمرساناهای ذاتی
۳	۱-۱-۱-۱ آلایش (نیمرساناهای ناخالص)
۴	۱-۱-۱-۳ ناخالصی‌های بخشنده
۵	۱-۱-۱-۴ ناخالصی‌های پذیرنده
۵	۲-۱ نانولوله‌های کربنی
۵	۱-۲-۱ ویژگی‌های نانولوله‌های کربنی
۶	۲-۲-۱ مزیت‌های نانولوله‌های کربنی
۷	۳-۲-۱ ساختار هندسی نانولوله‌های کربن
۱۰	۴-۲-۱ روش‌های تولید نانو لوله‌های کربنی
۱۱	۳-۱ دی اکسید قلع (SnO_2)
۱۳	فصل ۲- روش‌های تولید نانو ذرات و لایه‌های نازک
۱۴	۱-۲ نانوذرات
۱۴	۱-۱-۲ خواص نانوذرات
۱۵	۲-۲ روش‌های تولید نانو ذرات
۱۵	۱-۲-۲ روش فیزیکی
۱۵	۱-۱-۲-۲ تبخیر گاز بی اثر
۱۵	۲-۱-۲-۲ آسیاب کاری
۱۶	۲-۲-۲ روش شیمیایی
۱۶	۱-۲-۲-۲ فرایند سل-ژل
۱۷	۳-۲ لایه‌های نازک
۱۷	۱-۳-۲ مقدمه
۱۸	۲-۳-۲ روش‌های تهیه لایه نازک
۱۸	۱-۲-۳-۲ روش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی
۱۸	۲-۲-۳-۲ روش‌های فیزیکی
۲۴	فصل ۳- حسگرهای گازی نیمرسانا
۲۵	۱-۳ مقدمه

۲۵	۲-۳ تاریخچه‌ای بر حسگرهای گازی
۲۷	۳-۳ خواص تشخیص گاز
۲۸	۴-۳ برخوردهای گاز با سطح نیمرسانا
۲۸	۱-۴-۳ سازوکار عملکرد حسگرهای گازی
۳۰	۵-۳ حساسیت حسگرهای گازی
۳۲	۶-۳ ارتباط هدایت با غلظت گاز
۳۴	۷-۳ ارتباط هدایت با دمای کار
۳۶	۸-۳ ارتباط هدایت با اندازه دانه‌ها
۳۸	۹-۳ ارتباط هدایت با لایه‌های متخلخل و فشرده
۳۸	۱۰-۳ پارامترهای مهم حسگرهای گازی
۳۹	۱۱-۳ بهبود پارامترهای مؤثر بر رفتار حسگری
۴۰	۱-۱۱-۳ استفاده از کاتالیزور
۴۲	۲-۱۱-۳ استفاده از آلیش
۴۳	فصل ۴- روش‌های تحقیق و کارهای آزمایشگاهی
۴۴	۱-۴ مقدمه
۴۵	۲-۴ جنبه نوآوری تحقیق
۴۵	۳-۴ آماده سازی مواد اولیه
۴۵	۱-۳-۴ تصفیه نانولوله‌های کربنی چند دیواره
۴۶	۲-۳-۴ سنتز SnO ₂ با استفاده از روش سل-ژل
۴۷	۳-۳-۴ تهیه نانو کامپوزیت MWCNTs (۱۵٪، ۱۰٪، ۵٪) SnO ₂
۴۸	۴-۴ ساخت لایه‌های نازک
۴۸	۱-۴-۴ تهیه زیر لایه
۴۸	۲-۴-۴ تمیز کردن زیر لایه‌ها
۴۸	۳-۴-۴ لایه نشانی چرخشی
۵۲	۴-۴-۴ ایجاد اتصالات الکتریکی
۵۳	۵-۴ دستگاه حسگری
۵۵	۶-۴ آنالیز تصاویر SEM
۵۵	۱-۶-۴ معرفی میکروسکوپ الکترونی روبشی
۵۷	۲-۶-۴ تصاویر FE-SEM
۶۵	۷-۴ طیف سنج پراش اشعه ایکس (XRD)
۶۷	۱-۷-۴ آنالیز XRD
۷۰	۸-۴ اندازه گیری حساسیت حسگری لایه های نازک
۷۰	۱-۸-۴ آماده سازی نمونه‌ها برای بررسی رفتار مقاومتی آنها در برابر گاز
۷۲	۲-۸-۴ نتایج حاصل از رفتار حسگری لایه نازک دی اکسید قلع خالص نسبت به گاز مایع

۴-۸-۳ بررسی اثر نانولوله های کربنی چند دیواره روی خاصیت حسگری لایه نازک دی اکسید قلع.....۷۳

فصل ۵- نتایج و پیشنهادات.....۸۷

۵-۱ نتیجه گیری کلی ۸۸

۵-۲ پیشنهادات.....۸۹

فهرست مراجع.....۹۰

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۱۵	جدول ۱-۲: بیان برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نانوذرات
۲۵	جدول ۱-۳: روش‌های اندازه‌گیری آلوده‌کننده‌های بر اساس استاندارد ATMO
۲۸	جدول ۲-۳: خلاصه‌ای از انواع حسگرهای گازی اکسید فلزی و نوع گاز تشخیصی
۸۸	جدول ۱-۵: میزان حساسیت حسگری لایه‌های نازک به گاز مایع در غلظت‌های مختلف

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: ترازهای انرژی الکترونی برای یک نیم‌رسانا.....	۳
شکل ۱-۲: بردارهای تولید کننده انواع نانولوله های کربنی.....	۸
شکل ۱-۳: انواع نانولوله های کربنی	۱۰
شکل ۱-۴: ساختار بلوری دی اکسید قلع (SnO_2)	۱۱
شکل ۱-۲: شماتیکی از فرایند سل-ژل برای تولید نانو مواد	۱۷
شکل ۲-۲: پیشرفت بعدی ساختار های لایه نازک	۱۷
شکل ۲-۳: تصویری از یک محفظه واکنشی لایه نشانی به روش اسپاترینگ	۲۰
شکل ۲-۴: موازنه و جبران ضخامت اولیه غیریکنواخت و تهیه لایه‌های یکنواخت به وسیله اثر نیروهای گریز از مرکز در حین فرآیند پوشش دهی چرخشی.....	۲۱
شکل ۲-۵: تصویر برجستگی باقیمانده پس از مسطح سازی توپوگرافی زیر لایه از انقباض لایه های مقاوم در حین فرآیند خشک کردن و کمینه سازی این برجستگی با استفاده از یک فرآیند دمیدن موضعی در دمای بالا	۲۲
شکل ۲-۶: جهت‌گیری و هم راستایی مولکول‌های میله‌ای یا زنجیره‌ای شکل در درون لایه‌های مقاوم به وسیله نیروهای برش در حین عمل لایه نشانی چرخشی.....	۲۳
شکل ۳-۱: وضعیت نوار مسطح نیم‌رسانای نوع n در بالک و سطح در حالت جذب اکسیژن.....	۳۰
شکل ۳-۲: شماتیک حسگرهای گازی لایه نازک دو لایه.....	۳۱
شکل ۳-۳: مدار اندازه‌گیری الکتریکی برای حسگرها.....	۳۱
شکل ۳-۴: منحنی حساسیت برحسب غلظت گاز CO.....	۳۳
شکل ۳-۵: منحنی تغییرات حساسیت برحسب دما در حسگرهای اکسید قلع آرایش شده با پلاتین و غیر آرایش شده.....	۳۵
شکل ۳-۶: مقاومت الکتریکی در هوای خشک (R_a) و در غلظت ppm ۸۰۰ هیدروژن (R_g) در دمای 300°C به صورت تابعی از اندازه بلور SnO_2	۳۶
شکل ۳-۷: اندازه دانه‌ها و اندرکنش گاز دانه‌ها با شعاع d بزرگتر از طول دبای و دانه‌ها با شعاع کوچکتر از طول دبای	۳۷
شکل ۳-۸: تاثیر لایه های متخلخل و فشرده در مقاومت سطح.....	۳۸
شکل ۳-۹: منحنی تغییرات حساسیت برحسب دما و منحنی تغییرات مقاومت برحسب زمان در دمای 350°C در حسگرهای اکسید قلع.....	۳۹
شکل ۳-۱۰: تجزیه مولکول‌های هیدروژن و اکسیژن روی سطح کاتالیزور.....	۴۱
شکل ۳-۱۱: کنترل انرژی فرمی کاتالیزور روی سطح نیم‌رسانا.....	۴۱

- شکل ۴-۱: نمایی از نحوه چیدمان رفلاکس جهت تصفیه نانولوله‌های کربنی..... ۴۶
- شکل ۴-۲: نمایی از نحوه چیدمان رفلاکس جهت سنتز کامپوزیت SnO₂/MWCNTs..... ۴۷
- شکل ۴-۳: دستگاه پوشش‌دهی چرخشی (Spin Coating)..... ۴۹
- شکل ۴-۴: رگه‌ای شدن سطح لایه در اثر قرار نگرفتن مایع پوششی در مرکز زیر لایه..... ۵۰
- شکل ۴-۵: گردابی شدن سطح لایه در اثر سرعت بالای چرخنده..... ۵۰
- شکل ۴-۶: یکنواخت نشدن سطح لایه در اثر وجود یا ذرات اضافی در داخل مایع..... ۵۰
- شکل ۴-۷: یکنواخت نشدن سطح لایه در اثر کمبود مایع پوششی..... ۵۱
- شکل ۴-۸: حباب دار شدن سطح لایه در اثر معیوب بودن نوک سرنگ..... ۵۱
- شکل ۴-۹: یکنواخت نشدن سطح لایه در اثر معیوب بودن کاسه چرخنده..... ۵۱
- شکل ۴-۱۰: دستگاه کندوپاش RF و DC..... ۵۲
- شکل ۴-۱۱: راکتور حسگری گاز- مدل GSR-1..... ۵۳
- شکل ۴-۱۲: میکروسکوپ الکترونی روبشی..... ۵۶
- شکل ۴-۱۳: برخورد پرتو با نمونه و پرتوهای پراکنده شده..... ۵۶
- شکل ۴-۱۴: تصاویر SEM لایه نازک دی اکسید قلع..... ۵۷
- شکل ۴-۱۵: تصاویر SEM لایه نازک نانوکامپوزیت SnO₂/ 5% wt MWCNTs برای نانولوله‌های کربنی چند دیواره با قطر ۲۰-۳۰ nm..... ۵۸
- شکل ۴-۱۶: تصاویر SEM لایه نازک نانوکامپوزیت SnO₂/ 10% wt MWCNTs برای نانولوله‌های کربنی چند دیواره با قطر ۲۰-۳۰ nm..... ۵۹
- شکل ۴-۱۷: تصاویر SEM لایه نازک نانوکامپوزیت SnO₂/ 15% wt MWCNTs برای نانولوله‌های کربنی چند دیواره با قطر ۲۰-۳۰ nm..... ۶۰
- شکل ۴-۱۸: تصاویر SEM لایه نازک نانوکامپوزیت SnO₂/ 5% wt MWCNTs برای نانولوله‌های کربنی چند دیواره با قطر ۱۰-۲۰ nm..... ۶۱
- شکل ۴-۱۹: تصاویر SEM لایه نازک نانوکامپوزیت SnO₂/ 10 % wt MWCNTs برای نانولوله‌های کربنی چند دیواره با قطر ۱۰-۲۰ nm..... ۶۲
- شکل ۴-۲۰: تصاویر SEM لایه نازک نانوکامپوزیت SnO₂/ 15% wt MWCNTs برای نانولوله‌های کربنی چند دیواره با قطر ۱۰-۲۰ nm..... ۶۳
- شکل ۴-۲۱: پراش پرتو X توسط یک بلور..... ۶۶
- شکل ۴-۲۲: الگوی پراش پرتو ایکس نانولوله‌های کربنی قبل از خالص سازی..... ۶۷
- شکل ۴-۲۳: الگوی پراش پرتو ایکس نانولوله‌های کربنی بعد از خالص سازی..... ۶۸
- شکل ۴-۲۴: الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) پودر نانوکامپوزیت SnO₂ / MWCNTs..... ۶۹
- شکل ۴-۲۵: الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) لایه نازک نانوکامپوزیت SnO₂ / MWCNTs..... ۶۹
- شکل ۴-۲۶: چیدمان تست حسگری لایه‌های نازک..... ۷۱

- شکل ۴-۲۷: رفتار حسگری لایه نازک دی اکسید قلع خالص
 در حضور ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ ppm گاز مایع..... ۷۲
- شکل ۴-۲۸: رفتار حسگری لایه نازک SnO_2 / (5% wt, d=10-20 nm) MWCNTs
 در حضور ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ ppm گاز مایع..... ۷۴
- شکل ۴-۲۹: رفتار حسگری لایه نازک SnO_2 / (10% wt, d=10-20 nm) MWCNTs
 در حضور ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ ppm گاز مایع..... ۷۴
- شکل ۴-۳۰: رفتار حسگری لایه نازک SnO_2 / (15% wt, d=10-20 nm) MWCNTs
 در حضور ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ ppm گاز مایع..... ۷۴
- شکل ۴-۳۱: رفتار حسگری لایه نازک SnO_2 / (5% wt, d=20-30 nm) MWCNTs
 در حضور ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ ppm گاز مایع..... ۷۵
- شکل ۴-۳۲: رفتار حسگری لایه نازک SnO_2 / (10% wt, d=20-30 nm) MWCNTs
 در حضور ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ ppm گاز مایع..... ۷۵
- شکل ۴-۳۳: رفتار حسگری لایه نازک SnO_2 / (15% wt, d=20-30 nm) MWCNTs
 در حضور ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ ppm گاز مایع..... ۷۶
- شکل ۴-۳۴: حضور اکسید فلز (SnO_2) در مجاورت هوا..... ۷۸
- شکل ۴-۳۵: وضعیت نوار سطح نیمرسانا قبل و بعد از قرار گرفتن در مجاورت هوا..... ۷۹
- شکل ۴-۳۶: انتقال الکترون - حفره در پیوند p-n..... ۷۹
- شکل ۴-۳۷: برهم کنش مولکول های گاز مایع با اکسیژن جذب سطحی شده..... ۸۰
- شکل ۴-۳۸: وضعیت نوار سطح نیمرسانا قبل و بعد از قرار گرفتن در مجاورت گاز مایع..... ۸۱
- شکل ۴-۳۹: شماتیکی از عملکرد حسگرهای گازی در حضور اکسیژن و گاز مایع..... ۸۱
- شکل ۴-۴۰: حساسیت حسگری لایه های نازک SnO_2 / (5,10,15% wt, d=10-20nm) MWCNTs
 در مقایسه با SnO_2 خالص نسبت به غلظت های مختلف گاز مایع (LPG)..... ۸۲
- شکل ۴-۴۱: حساسیت حسگری لایه های نازک SnO_2 / (5,10,15% wt, d=20-30nm) MWCNTs
 در مقایسه با SnO_2 خالص نسبت به غلظت های مختلف گاز مایع (LPG)..... ۸۲
- شکل ۴-۴۲: حساسیت حسگری لایه های نازک SnO_2 / (5,10,15% wt, d=10-20nm) MWCNTs
 نسبت به میزان افزایش درصد وزنی نانولوله های کربنی چند دیواره..... ۸۳
- شکل ۴-۴۳: حساسیت حسگری لایه های نازک SnO_2 / (5,10,15% wt, d=20-30nm) MWCNTs
 نسبت به میزان افزایش درصد وزنی نانولوله های کربنی چند دیواره..... ۸۳
- شکل ۴-۴۴: تأثیر قطر نانولوله های کربنی چند دیواره روی خاصیت حسگری لایه های نازک
 SnO_2 / (15% wt, d=20-30nm) MWCNTs و SnO_2 / (15% wt, d=10-20nm) MWCNTs..... ۸۴
- شکل ۴-۴۵: منحنی پاسخ دهی لایه نازک SnO_2 ۸۵
- شکل ۴-۴۶: منحنی پاسخ دهی لایه های نازک SnO_2 / (15% wt, d=20-30nm) MWCNTs..... ۸۵

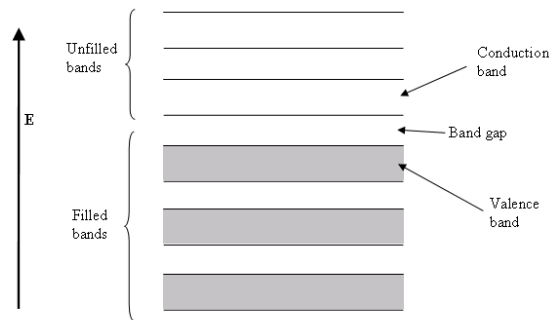
فصل اول

نیمرسانها و نانولوله‌های کربنی

۱-۱ نیمرساناها

نیمرساناها گروهی از مواد هستند که رسانایی الکتریکی آنها بین فلزات و عایقها قرار دارد. ویژگی مهم این مواد این است که رسانایی آنها با تغییر دما، برانگیختگی نوری و میزان ناخالصی به نحو قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. این قابلیت تغییر خواص الکتریکی، مواد نیمرسانا را انتخاب مناسبی برای تحقیق در زمینه قطعات الکترونیکی ساخته است. از مهم‌ترین مواد نیمرسانای شناخته شده Si و Ge را می‌توان نام برد. گاف انرژی نیمرساناهای Si و Ge غیر مستقیم است که باعث می‌شود گسیل نور در آنها ضعیف باشد. اما نیمرساناهای مرکب که از عناصر ستون‌های مختلف جدول تناوبی بدست می‌آیند (شامل ترکیبات III-V، II-VI و IV-IV) دارای خواص مطلوبی هستند، که موضوع اصلی مباحث الکترونیک نوری، باز ترکیب نوری الکترون-حفره، انواع مختلف این باز ترکیبها و تأثیر عوامل مختلف بر آنها می‌باشد. یکی از مهم‌ترین مشخصات نیمرساناها که آنها را از فلزات و عایقها متمایز می‌کند گاف انرژی (E_g) است. این ویژگی تعیین کننده طول موج‌هایی از نور است که توسط نیمرسانا جذب یا گسیل می‌شود. به دلیل گستردگی گاف انرژی نیمرسانا، دیودهای منتشر کننده نور و لیزرها را می‌توان با طول موج‌هایی در بازه مادون قرمز (IR) تا ماورای بنفش (UV) بوجود آورد. در نیمرساناها دو تراز وجود دارد. تراز ظرفیت که آخرین لایه الکترونی به لحاظ انرژی در ماده است و لایه دیگری که تراز رسانش نام دارد. در حالت پایه انرژی نیمرسانا، تراز رسانش خالی از الکترون بوده و با تحریک نیمرسانا الکترون‌ها از تراز ظرفیت به تراز رسانش می‌روند و نیمرسانا در حالت برانگیخته قرار می‌گیرد. زمانی که انرژی به صورت فوتون به نیمرسانا برخورد می‌کند، آشفستگی و نوعی افزایش انرژی در ساختار ماده به وجود می‌آید. این انرژی مخصوصاً بر روی الکترون‌های لایه ظرفیت اثر می‌گذارد. زیرا این الکترون‌ها به لحاظ دور بودنشان از هسته، آسیب‌پذیرترین الکترون‌های ساختار هستند از این رو فوتون سبب می‌شود که یک الکترون از لایه ظرفیت کنده شده و به لایه رسانش برود و به جای این الکترون مهاجرت کرده یک حفره باقی می‌ماند. جفت‌های الکترون و حفره اساس عملکرد نیمرساناها را تشکیل می‌دهند. اما هر فوتونی قادر به تحریک الکترون نیست. فاصله انرژی بین تراز ظرفیت و تراز رسانش را گاف انرژی می‌گویند. نیمرسانا

های مختلف، گاف انرژی‌های متفاوتی دارند. تنها فوتون‌هایی قادر به انتقال الکترون از تراز ظرفیت به تراز رسانش هستند که انرژی‌شان بیش از مقدار انرژی گاف باشد. بدین لحاظ طول موج نور تابیده شده به نمونه که در آن جذب آغاز می‌شود، حداقل انرژی است که از انرژی گاف بیشتر است. این طول موج به تبع آن انرژی این موج را انرژی گاف در نظر می‌گیرند (شکل ۱-۱) [۱].



شکل ۱-۱: ترازهای انرژی الکترونی برای یک نیمرسانا [۱].

۱-۱-۱ نیمرساناهای ذاتی

نیمرساناهای ذاتی، نیمرساناهایی خالص‌اند و خواص تمام بلور توسط خود اتم‌های نیمرسانا تعیین می‌شود. در دمای صفر کلوین هر گذار الکترون از یک اتم به اتم دیگر (پیوند کووالانسی) با گذار معکوس آن همراه است و اعمال میدان خارجی حرکتی جهت دار ایجاد نمی‌کند. نوار ظرفیت کاملاً پر و نوار رسانش خالی است. با افزایش دما ارتعاش‌های گرمایی شبکه بلور انرژی بیشتری به الکترون‌ها داده و آن‌ها پیوند کووالانسی را شکسته و آزاد می‌شوند. برای گذار الکترون از نوار ظرفیت به رسانش انرژی لازم، شکاف انرژی نام دارد. الکترونی که به نوار رسانش می‌رود، در نوار ظرفیت یک حفره باقی می‌گذارد.

۱-۱-۲ آلایش (نیمرساناهای ناخالص)

در نیمرسانای ذاتی که هیچ ناخالصی نداشته باشند، تعداد الکترون‌های نوار رسانش با تعداد حفره‌های نوار ظرفیت برابرند. این توازن بار چنانچه بلور آلایش یابد، یعنی اگر اتم‌های ناخالصی جای اتم‌های اصلی

تشکیل دهنده نیمرسانا را در شبکه بلوری بگیرند، می‌تواند بطور قابل ملاحظه‌ای مختل شود. این ناخالصی‌ها عموماً دارای تعداد الکترون‌های متفاوتی در مقایسه با اتمی که جای آن را می‌گیرند، هستند. همچنین، حضور اتم‌های ناخالص در نیمرسانای ذاتی تغییراتی در طیف انرژی آن بلور ایجاد می‌کند. الکترون‌های ظرفیت نیمرسانای ذاتی فقط در ناحیه نوار مجاز (نوار ظرفیت یا نوار رسانش) می‌توانند قرار گیرند و حضور آن‌ها در نوار ممنوع (بین دو نوار ظرفیت و رسانش) قابل قبول نیست. اما سطح انرژی الکترون‌های بعضی از اتم‌های ناخالصی ممکن است در نوار ممنوع قرار گیرند. بنابراین ترازهای ناخالصی مجاز اضافی در نوار ممنوع طیف انرژی بین سر نوار ظرفیت و ته نوار رسانش ظاهر می‌شود [۱].

۳-۱-۱ ناخالصی‌های بخشنده

در نیمرسانای نوع n رسانش توسط الکترون‌های آزاد صورت می‌گیرد. به عنوان مثال در یک نیمرسانا نوع n اتم‌های آرسنیک پنج ظرفیتی به عنوان ناخالصی و بلور ژرمانیوم چهار ظرفیتی نیمرسانای ذاتی است. از پنج الکترون ظرفیت آرسنیک، چهار الکترون در تشکیل پیوند کووالانسی با چهار اتم همسایه ژرمانیوم شرکت می‌کند. این چهار الکترون مانند چهار پیوند ژرمانیوم هستند و انرژی پیوندی الکترونی در آن‌ها یکسان است. و لیکن، الکترون پنجم در پیوندی شرکت نکرده و به آرسنیک تعلق دارد، اما برهم کنش این الکترون و هسته آرسنیک، مانند نیروی کولن برهم کنش بین دو بار واقع در دی الکترونیک بسیار ضعیف می‌شود. گذردهی خلأ ژرمانیوم برابر با $\epsilon = 16$ است. بنابراین نیروی کنش بین بنیان اتمی آرسنیک و الکترون پنجم ۱۶ برابر ضعیف‌تر و انرژی پیوندشان ۲۵۰ برابر کمتر می‌شود و انرژی مورد نیاز برای جدا کردن آن از اتم و وارد کردن در نوار رسانش فقط 0.01 الکترون ولت است. پس یک تراز مجاز اضافی در طیف انرژی بلور ایجاد شده که با افزایش دما، الکترون‌های پنجم از اتم‌های آرسنیک با انرژی تفکیک با اندازه 0.01 الکترون ولت به نوار رسانش می‌روند.

۴-۱-۱ ناخالصی‌های پذیرنده

در نیمرسانای نوع p رسانش توسط حفره‌ها صورت می‌گیرد. به عنوان مثال اگر به جای آرسنیک از ایندیوم سه ظرفیتی استفاده می‌شود، در شبکه بلور ژرمانیوم یک پیوند دوگانه برقرار می‌شود و یک جای خالی نزدیک نوار ظرفیت ژرمانیوم ایجاد می‌شود که می‌تواند به راحتی یک نوار الکترون از نوار ظرفیت بکند و به این ترتیب یک حفره در نوار ظرفیت ایجاد می‌کند.

۲-۱ نانولوله‌های کربنی

۱-۲-۱ ویژگی‌های نانولوله‌های کربنی

نانولوله‌های کربنی که از صفحات کربن به ضخامت یک اتم و به شکل استوانه‌ای توخالی ساخته شده است در سال ۱۹۹۱ توسط سامیو ایجیما^۱ کشف شد. خواص ویژه و منحصر به فرد آن از جمله مدول یانگ^۲ بالا و استحکام کششی خوب از یک طرف و طبیعت کربنی بودن نانولوله‌ها (به خاطر این که کربن ماده‌ای است کم وزن، بسیار پایدار و ساده جهت انجام فرایندها که نسبت به فلزات برای تولید ارزان‌تر می‌باشد) باعث شده که در دهه گذشته شاهد تحقیقات مهمی در کارایی و پرباری روش‌های رشد نانولوله‌ها باشیم. کارهای نظری و عملی زیادی نیز بر روی ساختار اتمی و ساختارهای الکترونی نانولوله‌ها متمرکز شده است. کوشش‌های گسترده‌ای نیز برای رسیدگی به خواص مکانیکی شامل مدول یانگ و استحکام کششی و ساز و کار عیوب و اثر تغییر شکل نانولوله‌ها بر خواص الکتریکی صورت گرفته است. می‌توان گفت این علاقه ویژه به نانولوله‌ها از ساختار و ویژگی‌های بی‌نظیر آن‌ها سرچشمه می‌گیرد [۲].

نانولوله‌های کربنی تک جداره فقط از کربن و یک ساختار ساده لانه زنبوری تشکیل شده‌اند. تولید نانو لوله‌های تک جداره دارای هزینه بالایی است و تولید به همراه پایدار کردن خصوصیات آن‌ها در حین

^۱ Sumio Iijima

^۲. مدول یانگ عبارتست از نسبت تنش به کرنش.