

نانولوله‌های کربنی آلاییده به عناصر سه ظرفیتی با استفاده از طیف‌سنجی پس‌پراکندگی رامان

سید احمد بابانژاد^۱، رسول ملک‌فر^۱ و محمد رضا سیدحسینی^۱

۱. گروه فیزیک اتمی مولکولی، بخش فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، صندوق پستی ۱۷۵-۱۴۱۱۵

۲. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، واحد ساری

(دریافت مقاله: ۸۶/۸/۲۲ دریافت نسخه نهایی: ۸۷/۱۰/۲)

چکیده

در این مقاله با استفاده از روش تخلیه قوس الکتریکی (DC) و با استفاده از گاز استیلن به عنوان منبع کربن و گاز حامل نیتروژن، نانو لوله‌های کربنی آلاییده به عنصر سه ظرفیتی بور تولید شده است. نمونه‌های نانو لوله‌های کربنی نشست یافته بر روی الکتروود کاتد را که دارای خاصیت آلاییدگی ساختاری به عنصر بور بودند، جمع‌آوری و پس از خالص‌سازی با استفاده از طیف‌سنجی پس‌پراکندگی رامان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیق موید این حقیقت است که مولفه فرکانس بالای مد G در نانو لوله‌های کربنی آلاییده به عنصر پذیرنده الکترون، بور، به سمت اعداد موجی بالاتر انتقال می‌یابد و مد فرکانس پایین G، که در اعداد موجی تقریبی 1540 cm^{-1} تا 1570 cm^{-1} ظاهر می‌شود و به نام مد BWF شناخته شده است، نشانگر فلزی بودن نانو لوله می‌باشد. مد D در نانو لوله‌های کربنی مذکور به واسطه حضور آلایش، دارای قله طیف رامان تیز و شدت نسبی بالایی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: نانو لوله‌های کربنی، تخلیه قوس الکتریکی، طیف‌سنجی رامان

۱. مقدمه

میدانی، مولفه‌های ذخیره انرژی، نیمه هادی‌هایی با مقاومت اکسیداسیون بالا و با کاربرد در ساخت سرامیکها، مواد حساس به نور، مواد هادی با وزن سبک و همچنین ترانزیستورهای دمای بالا فراهم می‌شود. آلایش نانو لوله‌ها به دو صورت شکل می‌گیرد:

۱- آلایش به طریق قرارگیری در شبکه و جاننشینی که در آن اتمهای آلایش یافته جایگزین اتمهای کربن می‌شوند.

۲- آلایش به صورت قرارگیری و اضافه شدن اتمهای آلایش یافته در مکانهای بین شبکه‌ای و بین اتمهای کربن. در شکل ۱ تصویر موارد ذکر شده نمایش داده شده است [۱ و ۲].

در نیمه هادی‌های حجیم آلایش به صورت جاننشینی انجام می‌شود و اتم آلایش یافته جایگزین اتمهای کربن شده و ساختار هیبریدی sp^3 مشابه الماس تشکیل می‌شود. در نانو لوله‌ها،

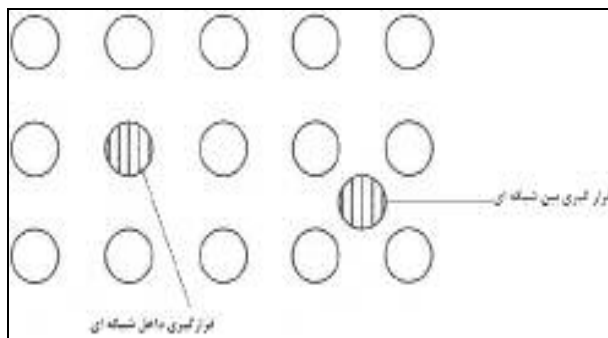
از زمان کشف نانولوله‌های کربنی در سال ۱۹۹۱ تا کنون لوله‌های مذکور بهترین ساختار، کالبد و قالب برای ساخت سامانه‌های مختلف در فناوری نانو خصوصا در ابزار مختلف الکترونیک مولکولی شناخته شده‌اند. نانو لوله‌های کربنی با توجه به ساختارشان به دو دسته نیمه هادی و فلزی تقسیم می‌شوند. نانولوله‌های کربنی با خاصیت نیمه هادی برای دیودهای فلز-نیمه هادی یا دیود شاتکی، دیودهای پیوند PN و ترانزیستورهای میدان مؤثر (FET) استفاده می‌شوند و نانو لوله‌های فلزی در ساخت ترانزیستورهای تک الکترونی تونلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با آلایش نانو لوله‌ها به عناصر سه و پنج ظرفیتی با ساختار CN_x و CB_x امکان ساخت ترانزیستورها در ابعاد نانو، پلیمرهای هادی و تجهیزات گسیل

و یک ممان دو قطبی الکتریکی در امتداد محور لوله جهت یابی می شود که بزرگتر از حالت نانو لوله بی آرایش است. ممان دو قطبی ایجاد شده، از فقدان تقارن آینه ای در ساختار نانولوله ناشی می شود و بردار قطبی غیر صفر باعث انتقال الکترونها به محل تقارن می شود و این امر باعث می شود که تعدادی تراز حد وسط (میانی) در ساختار نواری نانولوله ایجاد شود.

۲. آزمایش سامانه تهیه نانولوله های کربنی

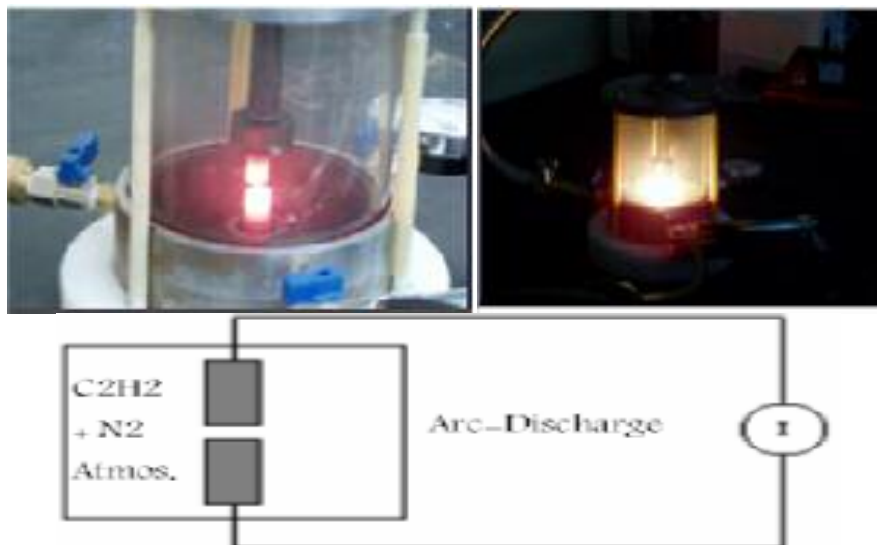
در این مطالعه برای آرایش نانو لوله های کربنی به عنصر بور، به عنوان نماینده عنصر گروه III، از روش فرآیند تخلیه قوس الکتریکی استفاده شد. برای این موضوع از یک منبع تغذیه برق مستقیم (DC) که با ولتاژ ۲۰ تا ۲۵ ولت و جریان ۱۰ تا ۲۰۰ آمپر کار می کند استفاده شده است. منبع تغذیه به یک واکنشگر (راکتور) که به شکل استوانه با مقطع دایروی که دور تا دور مجموعه از یک محفظه شیشه ای برای رویت فرآیند واکنش تشکیل شده است، متصل می باشد. محفظه شیشه ای روی یک صفحه فلزی که ثابت است، قرار دارد و دارای سه دریچه مجزا است. یکی از دریچه های مذکور برای ورود گاز جهت انجام واکنش، دومی مجرای خروجی که با اتصال به پمپ خلاء برای خروج گازهای زائد واکنش و مجرای سوم که به فشارسنج متصل است برای اندازه گیری فشار جو داخل سامانه استفاده می شود. داخل اتاقک واکنش، روی صفحه فلزی امکان نصب الکتروود آند وجود دارد که از طریق صفحه فلزی به قطب مثبت منبع تغذیه وصل می شود. صفحه فلزی نصب شده در قسمت بالای محفظه شیشه ای به گونه ای طراحی شده است که دارای محور متحرک بوده و توانایی حرکت در جهت قائم را دارد و الکتروود کاتد بر روی آن نصب می شود. الکتروود کاتد از طریق صفحه فلزی بالایی به قطب منفی منبع تغذیه وصل می شود.

در شکل ۲ شمایی از واکنشگر تخلیه قوس الکتریکی مورد استفاده در این تحقیق به همراه تصاویری از سامانه مذکور در طی کار نشان داده شده است. الکتروود آند از میله گرافیتی با



شکل ۱. نمایش سازو کار و قرارگیری آرایش اتمهای بور در داخل و بین شبکه ساختار نانولوله کربنی.

جایگزینی اتم آرایش یافته با ایجاد ساختار پیوندی sp^2 مشابه گرافیت انجام می پذیرد. در فرآیند آرایش، اتمهای گروه سوم جدول تناوبی به عنوان پذیرنده الکترون و اتمهای گروه پنجم جدول تناوبی به عنوان دهنده الکترون عمل می کنند. سازوکار آرایش به روش دوم از اهمیت بیشتری برخوردار است اما احتمال سازوکار آرایش به روش اول بیشتر می باشد. این موضوع به علت در معرض بودن سطح نانو لوله با اتمهای آرایش یافته می باشد و موید این حقیقت است که اتمهای آرایش یافته هم می توانند نشر دهنده و هم جاذب الکترونها باشند. رابطه ترازهای مولکولی HOMO-LUMO از اتمهای آلاینده و تراز فرمی از نانولوله، خاصیت الکترون دهنده یا پذیرندگی الکترون اتمهای آلاینده را مشخص می کند و وضعیت عناصر در جدول تناوبی مهم نمی باشد. موادی که تراز LUMO عمیق دارند به عنوان پذیرنده و موادی که تراز HOMO سطحی دارند به عنوان دهنده الکترون عمل می کنند. ترکیباتی نظیر O_2 ، NO_2 ، Br_2 ، I_2 به عنوان پذیرنده و فلزات قلیایی نظیر K یا Cs و مواد مرکبی نظیر NH_3 به عنوان دهنده الکترون محسوب می شوند [۱]. در صورت آرایش نانو لوله ها به عناصر دهنده الکترون، تراز فرمی به سمت انرژیهای بالاتر، و در حالت آرایش به اتمهای پذیرنده الکترون تراز فرمی به سمت انرژیهای پایینتر انتقال می یابد. در نانو الکترونیک آرایش نانولوله ها، باعث تغییر ولتاژ آستانه شده و امکان تشکیل ترانزیستور تک الکترونی NTFET فراهم می شود. از نتایج آرایش، انتقال بار الکتریکی و در نتیجه نمایان شدن رفتار قطبی در حلقه های پیوندی می باشد



شکل ۲. شمایی از واکنشگر تخلیه قوس الکتریکی و تصاویری از سامانه ساخته شده در طی کار.

الکلهای مختلف و در نهایت با آب دو بار تقطیر شده امکان‌پذیر است. پس از قرار دادن الکترودها در اتاقک واکنشگر و برقراری اتصالات الکتریکی و نصب تجهیزات سامانه، اتاقک واکنشگر توسط پمپ خلاء تا حدود ۰/۵ تور تخلیه شد و سپس با برقرار نمودن جریان گاز C_2H_2 با شار ۲۰ sccm (سانتیمتر مکعب در هر دقیقه) به ورودی اتاقک واکنشگر، سامانه برای انجام آزمایش آماده شد. با روشن نمودن منبع تغذیه ابتدا جریان را روی ۱۰۰ آمپر تنظیم کرده و با نزدیک نمودن الکتروود آند به الکتروود کاتد در فاصله‌ای حدود ۱ mm نسبت به برقراری قوس تخلیه الکتریکی اقدام گردید. با تغییر جریان از ۱۰۰ تا ۲۰۰ آمپر، نمونه‌های نشست یافته در الکتروود کاتد مشاهده شدند. با تغییر جریان و تغییر فلوی گاز C_2H_2 مقادیر نشست یافته تغییر کردند. قابل ذکر است که در طی آزمایش پمپ خلاء به اتاقک وصل بود و گازهای واکنش را از محفظه خارج می‌کرد. نمونه‌های نشست یافته روی الکتروود کاتد برای انجام عملیات خالص‌سازی جمع‌آوری و به مدت ۱۸ ساعت در اسید بوریک حل شدند و فرآیند خالص‌سازی برای زدودن لایه‌های بی‌شکل کربن و یا ناخالصیهای نشست یافته روی نمونه انجام شد. این فرآیند موجب افزایش کیفیت نمونه گردید که پس از عبور محلول از صافی، نمونه با آب دوبار تقطیر شده شستشو شد و با

طول ۳ cm و قطر ۲/۴ mm و الکتروود کاتد از میله گرافیتی با طول ۳ cm و قطر ۲/۵ mm تشکیل شده است.

۳. تهیه نانولوله‌های کربنی آلائیده به عنصر بور

برای تولید و ساخت نانولوله‌های کربنی آلائیده به عنصر بور و بدون استفاده از کاتالیست به روش تخلیه قوس الکتریکی، ابتدا با استفاده از مت‌ه حفرة‌ای به قطر ۲/۱ mm و به عمق دوسوم طول الکتروود، در میله گرافیتی آند ایجاد گردید. سپس حفرة ایجاد شده توسط خمیر پودرهای کربن و عنصر بور پر شد. نسبت وزنی پودر کربن و پودر بور به صورت $C/B = 2/1$ است. این نسبت وزنی براساس تجربه و آزمایش برای جریانهای کاربردی بین ۸۰ تا ۲۰۰ آمپر به کار گرفته شده است. برای جریانهای کمتر از ۸۰ آمپر این نسبت تجربی به صورت برابر تعریف می‌شود. ابتدا با توجه به نسبت وزنی ذکر شده پودر کربن و پودر بور توزین شدند. سپس با استفاده از الکلاتانول کاملاً مواد مذکور باهم ترکیب شد و به صورت خمیر درآمد. سرانجام خمیر تهیه شده را در حفرة ایجاد شده در آند قرار داده تا کاملاً حفرة پر شود. حتی الامکان می‌بایست از ترکیب ناخالصیهای دیگر در خمیر تهیه شده جلوگیری شود که این امر به صورت شستن ظروف و وسایل مورد استفاده، با

با جایگذاری می‌توان نتیجه‌گیری نمود که $\delta=30^\circ$ و از آنجا $\text{FWHM} = 70/5 \text{ cm}^{-1}$ است. این مقدار در مقایسه با پهنای نوار در نیمه بیشینه در حالت نانولوله کربنی غیر آلییده که در بازه مقداری $30 - 20 \text{ cm}^{-1}$ تغییر می‌کند [۳]، نشان دهنده این موضوع است که در نانولوله‌های کربنی آلییده به بور پهنای نوار گسترده تر شده است. نوار G در گرافیت در برگیرنده یک مد فونون اپتیکی بین دو اتم کربن در سلول واحد می‌باشد. این موضوع در تضاد با نوار G طیف رامان گرافیت است که یک قله لورنتزی در حوالی 1582 cm^{-1} مربوط به نوار ارتعاشی مماسی از اتمهای کربن را دارا می‌باشد. نوار G در نانولوله‌های کربنی آلیشی از دو مولفه تشکیل شده است که مربوط به تقید بردار موجی فونون در امتداد جهت بردار محیطی است.

معمولاً عدد موجی نوار G برای توصیف قطر نانولوله و همچنین برای تشخیص خاصیت فلزی و نیمه هادی بودن نانولوله استفاده می‌شود. نوار G شامل دو مولفه است یک قله در عدد موجی 1590 cm^{-1} به نام نوار G^+ ، و قله دیگر در حوالی 1570 cm^{-1} به نام نوار G^- که به ترتیب به مدهای فرکانس بالا و پایین معروفند. شکل ظاهری نوار G^+ مربوط به ارتعاشات اتمهای کربن در امتداد محور لوله و فرکانس آن ω_{G^+} به انتقال بار از آلیش اضافه شده به نانولوله حساس می‌باشد. در حالت آلیش به اتمهای پذیرنده الکترون، ω_{G^+} به سمت فرکانسهای بالاتر و در حالت آلیش به اتمهای دهنده الکترون، ω_{G^+} به سمت فرکانسهای پایینتر منتقل می‌شود. این حالت به این خاطر اتفاق می‌افتد که اتمهای دهنده الکترون با دادن الکترون باعث سست شدن پیوند C-C می‌شوند و انتقال طیف آنها به فرکانسهای پایینتر طبیعی به نظر می‌رسد. اتمهای گیرنده الکترون باعث قویتر شدن پیوند C-C می‌شوند و انتقال طیف آنها به فرکانسهای بالاتر طبیعی می‌باشد. شکل ظاهری نوار G^- به صورت مشابه، مربوط به ارتعاشات اتم کربن در امتداد جهت بردار محیطی از CNT است و شکل خطی آن به مقدار زیادی به اینکه آیا نانولوله فلزی (BWF, Breit-Wigner-) و یا نیمه هادی است حساس است. در شکل ۳

عبور مجدد از صافی، نمونه تخلیص یافته کوره در معرض هوا و در دمای 400 تا 450° درجه سانتیگراد به مدت 4 ساعت قرار داده شدند. نمونه‌های به دست آمده در شرایط مختلف تولید و جهت انجام فرآیند طیفسنجی پس پراکندگی رامان مورد استفاده قرار گرفتند. سامانه طیفسنج رامان (گروه اتمی مولکولی، بخش فیزیک دانشگاه تربیت مدرس) ساخت کارخانه Thermo Nicolet می‌باشد و از نوع پس پراکنده هستند. در سامانه مذکور هماهنگ دوم لیزر حالت جامد Nd:YLF در طول موج 532 nm به عنوان فرکانس سامانه لیزری استفاده می‌شود و طیفهای رامان با قدرت تفکیک 4 cm^{-1} ثبت گردیده‌اند.

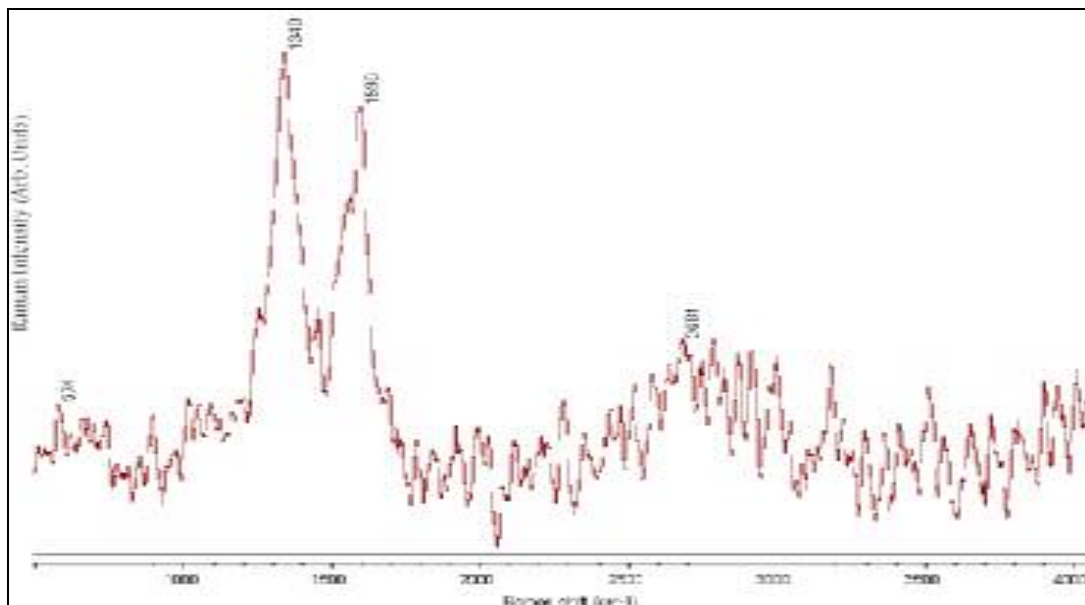
۴. طیف رامان نانولوله‌های کربنی آلییده به بور

در شکل ۳ یک طیف نوعی از طیفهای ضبط شده نمونه به دست آمده از نانولوله‌های کربنی آلییده به بور نمایش داده شده است. در طیف نشان داده شده که مربوط به نمونه‌ای می‌باشد که فرآیند خالص سازی دوبار بر آن انجام شده است، یک نوار قوی در عدد موجی 1596 cm^{-1} ، که به عنوان نوار G نامیده می‌شود، مشاهده می‌شود که در مقایسه با نوار G در نانولوله‌های غیر آلیشی که در این آزمایشگاه تهیه گردیده‌اند و در حدود عدد موجی 1582 cm^{-1} ظاهر می‌شوند، به اعداد موجی بالاتر انتقال یافته است. همچنین پهنای نوار G در نیمه بیشینه (FWHM) نسبت به پهنای نوار G در نانولوله‌های کربنی غیر آلییده کمی گسترده‌تر شده است. برای محاسبه پهنای نوار در نیمه بیشینه از فرمول پاشندگی گوسین به صورت زیر استفاده شده است.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2},$$

$$\text{FWHM} = 2/35 \delta,$$

در فرمول پاشندگی گوسین X_1 و X_2 مختصات دو نقطه در نیمه بیشینه می‌باشند که در برگیرنده پهنای نوار در محل مذکور است. \bar{X} نیز عدد موجی مرکز نوار است که سامانه طیفسنج مشخص می‌نماید. با توجه به طیف مورد بررسی داریم: $\bar{X} = 1520 \text{ cm}^{-1}$ و $X_1 = 1490 \text{ cm}^{-1}$ و $X_2 = 1550 \text{ cm}^{-1}$.

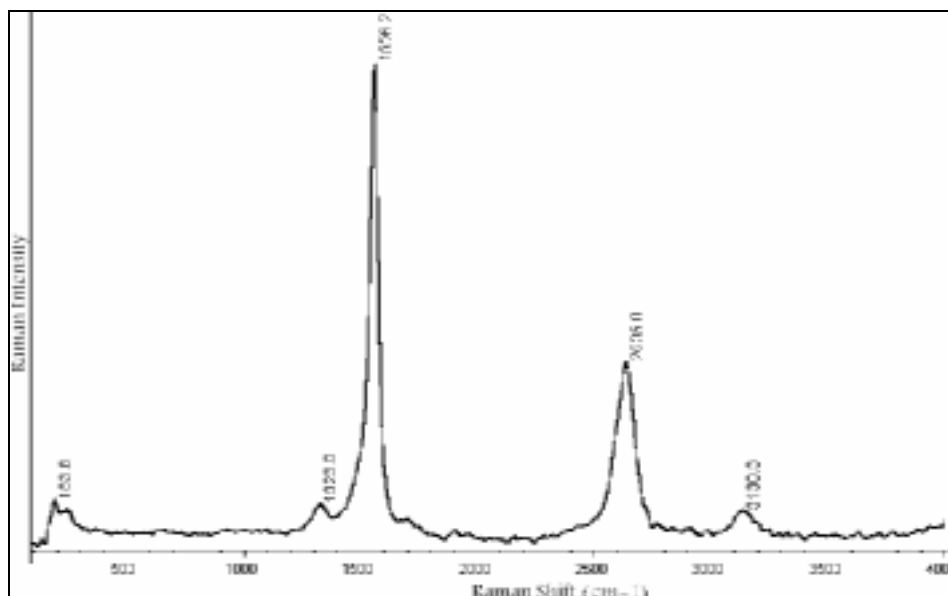


شکل ۳. طیف رامان نانولوله کربنی آلاییده به عنصر بور در جریان 200°C آمپر ثبت شده بعد از انجام مراحل خلص سازی.

همچنین گسترده‌تر شدن پهنای نوار، در طیف رامان ظاهر می‌شود. با عنایت به طیفهای رامان نوعی به دست آمده داریم: $X_1 = 1280\text{ cm}^{-1}$ و $X_2 = 1430\text{ cm}^{-1}$ و $\bar{X} = 1355\text{ cm}^{-1}$ که با قرار دادن مقادیر مذکور در فرمول پاشندگی گوسین فوق‌الذکر $\sigma = 75$ و $\text{FWHM} = 176\text{ cm}^{-1}$ به دست می‌آید. لازم به تذکر است که مقدار FWHM نانولوله‌های کربنی غیرآلاییده ثبت شده در این آزمایشگاه در گستره $10-14\text{ cm}^{-1}$ می‌باشد.

نوار قوی دیگری که در طیف رامان نانولوله‌های کربنی آلاییده ظاهر می‌شود نوار D^* یا نوار فرکانس دوبرابر (ابر تون یا اورتون) و یا نوار M نام دارد که در نانولوله‌های کربنی آلاییده با افزایش غلظت بور، شدت این نوار کاهش می‌یابد. این موضوع با مقایسه طیف نانولوله‌های کربنی بدون آلیش که در این آزمایشگاه با روش نشست تبخیر شیمیایی (CVD) تولید گردید و در شکل (۴) نمایش داده شده است، مشخص می‌شود. نوار دیگری که در اعداد موجی پائین طیف رامان نانولوله‌های کربنی آلاییده ظاهر می‌شود نوار مد تنفسی شعاعی (RBM) نام دارد که نسبت عکس با قطر نانولوله کربنی دارد، $\omega_{\text{RBM}} = 248/d$.

حضور نوار BWF در عدد موجی تقریبی 1570 cm^{-1} واضح و آشکار بوده و نشانگر این موضوع است که نمونه دارای خاصیت فلزی است. در طیف نانولوله‌های آلاییده شده نسبت I_{G-} / I_{G+} جهت لوله شدن نانولوله را تعیین می‌کند که نسبت فوق در طیف مورد بحث برابر $0/8$ است. در صورت مقایسه این مقدار در طیفهای مختلف، تغییر جهت لوله شدن در نانولوله با تغییر نسبت مذکور نشان داده می‌شود. نوار دیگری که در طیف نانولوله‌های آلاییده ظاهر می‌شود نوار بی‌نظمی القایی یا نوار D نام دارد که در طیف شکل ۳ در عدد موجی 1340 cm^{-1} ظاهر شده است. این نوار به واسطه حضور آلیش و یا ناخالصی در ساختار شبکه‌ای نانولوله‌ها ظاهر می‌شود. با توجه به اینکه نوار D در نانولوله غیر آلاییده در حدود عدد موجی 1300 cm^{-1} ظاهر می‌شود، نشانگر این نکته است که در نانولوله‌های آلاییده به اتمهای بور، نوار D به سمت فرکانسهای بالاتر منتقل می‌شود. همچنین پهنای نوار در نیمه بیشینه، نشانگر گستردگی این نوار در نانولوله آلاییده است. مقدار FWHM در نوار D تقریباً 176 cm^{-1} است که نشانگر گستردگی پهنای نوار D به واسطه بی‌نظمی القایی توسط حضور اتمهای بور است که به صورت افزایش شدت نوار D و



شکل ۴. طیف رامان نانولوله کربنی خالص سازی شده که به روش نشست بخار شیمیایی (CVD) تولید شده است.

جدول ۱. مقادیر جابه جایی هر یک از نوارهای نمونه نانولوله آلاییده نسبت به طیف بدون آلیایش.

نوار	میزان جابه جایی نوار cm^{-1}
D	۴۰
G	۱۴
D*	۱۱۱

آزمایشگاه ارائه شده است. از این اطلاعات نتیجه می گیریم که بیشترین تأثیر آلیایش روی نوار D^* و D اعمال می شود [۴-۵].

حال به محاسبه نسبت شدت نوارها می پردازیم. در این حالت مقادیر شدت به دست آمده از طیفهای ثبت شده رامان به قرار زیر می باشند:

$I_{D^*} = 209$ ، $I_G = 319$ ، $I_D = 339$ که با در نظر گرفتن شدتهای مذکور، نسبتهای شدتی مورد علاقه به قرار زیر به دست می آیند:

$$I_G / I_{D^*} = 1/5 \text{ و } I_D / I_{D^*} = 1/6 \text{ و } I_D / I_G = 1/06$$

طیف شکل ۳ از نمونه خالص سازی شده که تحت جریان 200 آمپر به دست آمده است ثبت گردیده است. برای روشن شدن موضوع مورد ادعا در شکل ۵ طیف رامان را که از نمونه

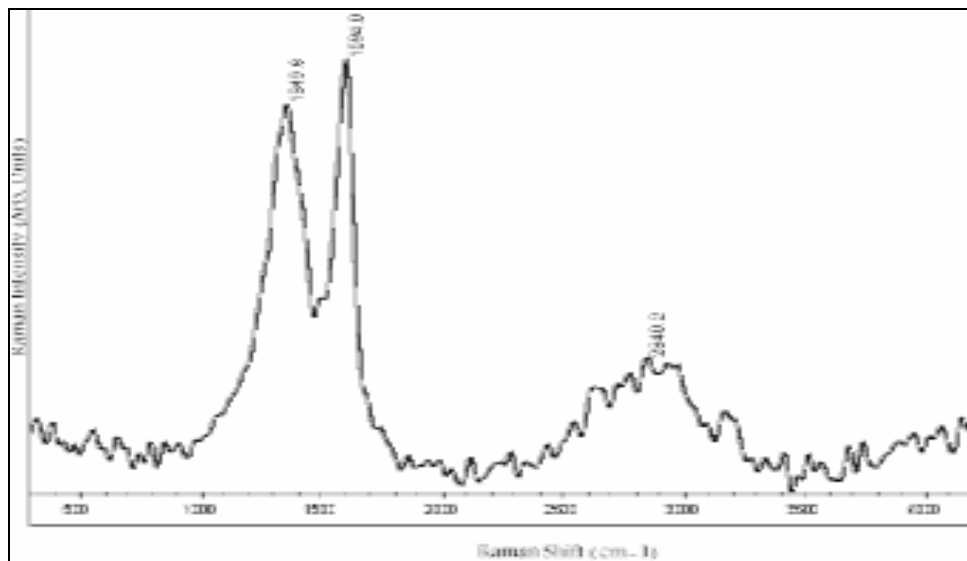
در طیف ارائه شده در شکل ۳ نوار RBM در عدد موجی 574 cm^{-1} ظاهر گردیده است، ولی در نانولوله های کربنی آلاییده به واسطه انحنای ایجاد شده از حضور آلیایش، برای محاسبه دقیق قطر نانولوله کربنی از نوارهای G^+ و G^- که بر اساس رابطه زیر تعریف می شود، استفاده می شود.

$$\omega_{G^+} - \omega_{G^-} = 79/5 / d^2$$

که واحد عدد $79/5$ بر حسب $\text{cm}^{-1} \text{ nm}^2$ می باشد. لذا با توجه به طیف مورد بحث می توانیم به طور تقریبی قطر نانولوله کربنی را محاسبه کنیم.

$$1596 - 1570 = 79/5 / d^2 \rightarrow d \approx 1/6 \text{ nm}$$

لازم به تذکر است که رابطه فوق برای نانولوله های کربنی فلزی صادق است. همان طور که ذکر شد نوار D^* یا نوار اورتون با غلظت بور نسبت عکس دارد که در طیف مورد بحث در حدود عدد موجی 2681 cm^{-1} ظاهر شد و با توجه به طیف نانولوله کربنی غیرآلیایشی تولید شده به روش تخلیه قوس الکتریکی که در آنها نوار مذکور در عدد موجی تقریبی 2570 cm^{-1} ظاهر می شود نشانگر انتقال نوار D^* به عدد موجهای بالاتر است. در جدول ۱ مقادیر جابه جایی هر یک از نوارهای مذکور در مقایسه با مقادیر موارد بدون آلیایش انجام شده در این



شکل ۵. طیف نانولوله کربنی آلاییده به بور تولید شده در جریان 18° آمپر که دو بار خالص سازی شده است.

جدول ۲. مقادیر جا به جایی هر یک از نوارهای نمونه آلاییده به نسبت به نوار بدون آرایش در طیفهای رامان مربوطه.

نوار	جا به جایی نوار (cm^{-1})
D	۵۳
G	۱۴
D*	۱۱۹

طیفهای رامان به قرار زیر هستند:

$$I_{G^+} = 1596 \quad \text{و} \quad I_{G^-} = 1560 \quad I_{D^*} = 367 \quad I_G = 467 \quad I_D = 439$$

که با در نظر گرفتن شدتهای مذکور، نسبتهای شدتی مورد علاقه به قرار زیر هستند:

$$I_D / I_G = 0/9 \quad \text{و} \quad I_D / I_{D^*} = 1/19 \quad \text{و} \quad I_G / I_{D^*} = 1/2 \quad \text{و}$$

$$I_{G^-} / I_{G^+} = 0/9 \quad \text{و} \quad I_G / I_{D^*} = 1/2$$

در گرافیت نسبت I_D/I_G به طور وارون با میزان گرافیتی شدن نمونه متناسب است. از مقایسه اطلاعات به دست آمده در دو طیف شرح داده شده متوجه می‌شویم که گرافیتی شدن نمونه در طیفهای (۳-۵) افزایش و غلظت عنصر بور در نمونه کاهش یافته است.

در ضمن جهت لوله شدن نانولوله با توجه به نسبت I_{G^-} / I_{G^+} در مقایسه با نسبت مذکور در نمونه اول تغییر چندانی

خالص سازی شده تحت جریان 18° آمپر به دست آمده است را نیز ارائه می‌دهیم و به بررسی اجمالی آن می‌پردازیم. در طیف رامان شکل ۵ نوار D در عدد موجی 1350 cm^{-1} و نوار G در 1594 cm^{-1} ظاهر شده است. نوار G^+ به سمت فرکانسهای بالاتر انتقال یافته که از 1590 cm^{-1} به 1594 cm^{-1} جابه جا شده است. همچنین وجود نوار BWF یا نوار G^- در منطقه طیفی 1540 cm^{-1} تا 1570 cm^{-1} ظاهر شده است که نشانه فلزی بودن نمونه است. در طیف فوق نوار D^* در عدد موجی 2840 cm^{-1} ظاهر می‌شود. با توجه به اطلاعات استخراج شده از طیف رامان، نانولوله‌های کربنی بدون آرایش و آلاییده، این حقیقت آشکار می‌گردد که نوارهای توصیف شده در نانولوله‌های کربنی آلاییده به سمت اعداد موجی بالاتر انتقال می‌یابند که خود دلیل بر صحت انجام آزمایش مبنی بر حضور آرایش اتم بور به عنوان پذیرنده الکترون در نمونه است. در جدول ۲ مقادیر جا به جایی نوارهای توصیف شده نسبت به نوار متناظر در طیف بدون آرایش آورده شده است.

مجدداً به محاسبه نسبت شدت نوارها در طیف حاضر و با شرایط جدید پارامترهای فیزیکی اعمالی برای تولید نانولوله مربوطه می‌پردازیم. در این حالت مقادیر شدت ثبت شده از

حامل نانو لوله‌های کربنی آلاینده به عنصر سه ظرفیتی بور تهیه گردید. نمونه‌های تهیه شده پس از خالص‌سازی با استفاده از طیف سنجی پراکندگی رامان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج به دست آمده در حالت کلی مؤید جابه‌جایی مدهای اصلی و حساس به رامان نانو لوله‌های کربنی آلاینده به عنصر بور به طرف اعداد موجی بالاتر می‌باشد. ظهور مد BWF در بین مدهای D و G نشانگر فلزی بودن نانولوله‌های کربنی تهیه شده است و به علت آرایش شدت مد D افزایش می‌یابد.

نداشته است و درصد آرایش در نمونه دوم کاهش یافته است. نوار RBM در نمونه دوم در 574 cm^{-1} ظاهر شده و با استفاده از رابطه:

$$\omega_{G^+} - \omega_{G^-} = 79/5 / d^2$$

مقدار قطر تقریبی نمونه برابر 4 nm به دست می‌آید. لذا نتیجه می‌گیریم که با افزایش غلظت میزان آرایش عنصر بور در نمونه میزان گرافیتی شدن کاهش می‌یابد.

۵. نتیجه‌گیری

با استفاده از روش تخلیه قوس الکتریکی جریان مستقیم و گازهای استیلن و نیتروژن به ترتیب عنوان گازهای منبع کربن و

مراجع

1. S Cui, et al., *Carbon*, **42**, 5-6 (2004) 931-939.
2. I Takesue, et al., *High-Tc Superconductivity in Entirely End-bonded Multiwalled Carbon Nanotubes*, <http://arxiv.org/ftp/cond-mat/papers/0509/0509466.pdf>
3. ر. ملک فر و ه. اسدی، مقاله نامه دوازدهمین کنفرانس سالانه اپتیک و فوتونیک ایران، ۱۱ تا ۱۳ بهمن ۱۳۸۴، دانشگاه شیراز، مقاله 017، صفحات ۱۳۲-۱۲۹.
4. K McGuire, N Gothard, P L Gai, MS Dresselhaus, G Sumanasekera and A M Rao, *Carbon*, **43**, 2 (2005) 219-227.
5. X Blasé, J C Charlier, A De Vita and R Car, *Physical Review Letters*, **83**, 24 (1999) 5078-5081.