

# بررسی رفتار ساختارهای نانو کربنی در حوزه مخابرات نوری و ساخت فیلتر در بازه ۱۳۰۰ الی ۱۶۰۰ نانومتر

علی پوراسلامی<sup>۱</sup> و علیرضا صالحی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>آزمایشگاه ادوات نیمه هادی، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، 9122106@kntu.ac.ir

<sup>۲</sup>آزمایشگاه ادوات نیمه هادی، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، salehi@kntu.ac.ir

چکیده - در این مقاله بررسی رفتار نوری لایه‌های نانو کربنی در حوزه طیفی مخابرات نوری مورد نظر است. با ساخت چیدمان آزمون و بر اساس آزمایش‌های انجام شده، می‌توان از این لایه‌ها ادواتی نظیر فیلترهای گذر، فیلترهای حذف، تضعیف کننده در طیف مخابرات نوری تهیه کرد. با توجه به نتایج آزمون‌های انجام شده بر روی لایه‌های نانو کربن کاربرد وسیع آنها در فیلتر یا گذر، یک یا چند محدوده طیفی در بازه ۱۳۰۰ الی ۱۶۰۰ نانومتر، که مناسب مخابرات نوری است، مشاهده شد. در این آزمایش‌ها فیلترهای حذف و گذر با دامنه تضعیف ۱۰ الی ۱۵ دسی‌بل در محدوده طیفی مورد نظر محقق شد. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که این ساختارها می‌توانند چندین پنجره گذر و یا حذف داشته باشند. برای کالیبره کردن و مقایسه نتایج علاوه بر یودر نانو لوله تک‌دیواره کربنی از شیشه بدون پوشش و با پوشش ITO نیز در اندازه‌گیری‌ها استفاده شده است.

کلید واژه - نانو کربن، نانو لوله تک دیواره، رفتار نوری، مخابرات نوری، فیلتر نوری

آزمایشگاهی بوده و استفاده از ویژگی این ساختارها در مخابرات نوری کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۱-۲]. اگر بتوان ادوات موجود نظیر فیلتر و تضعیف کننده با این ساختارها معرفی کرد، کاربرد جدیدی برای ساختارهای نانو کربنی خواهیم داشت. چنین نتایجی قطعاً افق‌های جدیدی در کاربرد نانو کربن‌ها خواهد گشود.

## ۲- نانو لوله‌های کربنی

ساختارهای نانو کربنی از زمان کشف در اوائل دهه ۹۰ یکی از مهمترین مواد نانو ساختاری هستند. مواد نانو کربنی شامل فلورین‌ها (Fluorine) با ساختار مولکولی کروی (Spherical Molecule) و نانولوله‌های کربنی (Carbon Nano Tube) با ساختارهای نانوسیلندری (Cylindrical Nanostructure) هستند. ساختارهای لوله‌ای خود به دو دسته کلی نانولوله‌های تک دیواره (SWNT) و نانولوله‌های چند دیواره (MWNT) تقسیم بندی می‌شوند [۳].

نانولوله‌های کربنی در سال ۱۹۹۱ توسط ایچیمیا کشف شد [۴]. این کشف و دیگر کارهای او منجر به دریافت اولین جایزه کاولی (Kavli) در سال ۲۰۰۸ در شاخه علوم نانو بطور مشترک با بروس شد. این جایزه به دلیل اثر شگرف این دو در توسعه علم نانو در فیزیک - ایجاد حوزه نانو ساختارهای صفر و تک بعدی - به آنها اهدا شد [۵-۶].

## ۱- مقدمه

توسعه شبکه‌های ارتباطی و نیاز به سرعت‌های بالاتر، بکارگیری ادوات و شبکه‌های ارتباطی نوری را گریز ناپذیر کرده است. از سوی دیگر علم نانو در ده سال اخیر به شدت گسترش یافته است. از آنجائیکه لایه‌های نانو رفتار نوری مختلفی از خود نشان داده‌اند، پیش بینی می‌شود بکارگیری این لایه‌ها در سیستم‌های ارتباط نوری افق‌های جدیدی برای ادوات و کاربردهای مختلف ایجاد کند. ساختارهای نانو کربن نزدیک ربع قرن است که کشف شده‌اند، این ساختارها به هیچ وجه در طبیعت وجود ندارند و ساخته دست و خلاقیت بشر است. شاخه‌های مختلف علوم از فیزیک گرفته تا شیمی کاربردهای منحصر بفردی برای این نوظهور یافته‌اند. این یافته‌ها در صنعت به تولید محصول جدید و یا بهبود عملکرد کمک کرده است. به عنوان مثال می‌توان به هواپیماهای پنهان‌کار (Stealth) یا رادار گریز اشاره کرد. این ویژگی بسیار ارزشمند در صنایع هوایی با بهره‌گیری از علم نانو کربن در اختیار چند کشور محدود است. در شاخه الکترونیک نیز کاربردهایی در ساخت ترانزیستور، سنسور، خطوط سیمی نانو، صفحات خورشیدی و ... بدست آمده است. در بخش تحقیقات نوری، منبع نوری عمده آزمایش‌ها، منابع لیزر Nd:YAG با طول موج‌های ثابت ۵۳۲ و ۱۰۶۴ نانومتر و محیط آزمایشی آنها نیز فضای آزاد بر روی میز اپتیکی بوده است. لذا منابع نور و اندازه‌گیری‌های آنها هم محدود به تجهیزات

## ۳- روشهای ساخت نانولوله‌های کربنی

نانولوله‌های کربنی به روشهای مختلفی تولید می‌شوند. اما سه روش اصلی برای تولید آنها به ترتیب ذیل است [۷].

### ۳-۱- تخلیه قوس الکتریکی (Arc Discharge)

روش تخلیه قوس الکتریکی یکی از روشهایی است که اولین نمونه‌های CNT توسط آن تولید شده است. تاریخچه CNT خیلی به تولید حجم بالای فلورین‌ها توسط کربن/تشمیر در سال ۱۹۹۰ وابسته است [۸]. آنها توانستند در محیط گاز بی اثر و با تبخیر میله گرافیتی توسط اعمال ولتاژ ac فلورین انبوه تولید کنند. در این طرح درون یک محفظه خلا ایجاد کرده و با گاز هلیوم تحت فشار ۲۰ الی ۱۰۰ تور، پر می‌کردند. لوله گرافیتی درون محفظه که میانه آن در رنج ۱ الی ۶ میلی‌متر نازک شده تحت ولتاژ ac با جریان حدود ۱۰۰ آمپر تبخیر می‌شود. بخار کربن در نزدیکی کنتاکت‌ها، پلاسمای کربنی تولید می‌کند و پودر گرافیتی ایجاد می‌شود. این پودر روی سطح مورد نظر و دیواره چمبر می‌نشیند. با خالص سازی این ذرات ملکولهای C<sub>60</sub> و C<sub>70</sub> بدست می‌آید. قابل توجه اینکه در دهه ۱۹۷۰ نیز چنین آزمایش‌هایی، بدون فضای بسته و گاز بی اثر انجام شده است، و نتیجه آن تولید گاز خطرناک دی اکسید کربن، مقداری گازهای مونوکسید کربن و اکسید نیتروژن، همچنین شاید مقدار بسیار ناچیزی فلورین بوده است [۹]. در سال ۱۹۸۲/آندو و اوکوچی سیستمی ساختند که با استفاده از قوس الکتریکی پودر SiC تولید کرد [۱۰]. در سال ۱۹۹۳/آندو و یجیما با بهینه سازی آن سیستم توانستند بوسیله قوس ولتاژ dc بین دو میله گرافیتی مجزا نانولوله‌های کربنی تولید کنند [۱۱]. برای تولید پودر SiC به این روش، یک منبع ۵۰ الی ۱۵۰ آمپری بین میله بالایی کربنی به عنوان آند و قطعه سیلیکونی در زیر که بر روی یک استوانه کربنی قرار گرفته است، برقرار می‌شود. وقتی قوس الکتریکی برقرار شود، دودی از سطح بلند می‌شود و ذراتی بصورت دوده بر دیواره چمبر می‌نشیند. تصاویر میکروسکوپی، ذرات SiC با ضخامت حدود ۲۰ نانومتر را نشان می‌دهد. این طرح بهینه شده، قابلیت کنترل قوس الکتریکی را دارد. ذرات تبخیر شده از آند بصورت دوده داخل چمبر حاوی فلورین هستند. بخشی از تبخیرهای آند بر روی کاتد ته‌نشین می‌شوند. در لایه ته‌نشین شده کاتد توسط/یجیما، گنج CNT یافته شد. لایه ته‌نشین حاصل تبخیر آند بر روی کاتد در سطح و عمق، شامل CNT های مختلفی است. مقداری از آنها تک دیواره و بخشی از آنها مانند کابل هم محور دارای چندین لایه هستند که

به آنها نانو لوله‌های کربنی چند دیواره گفته می‌شود.

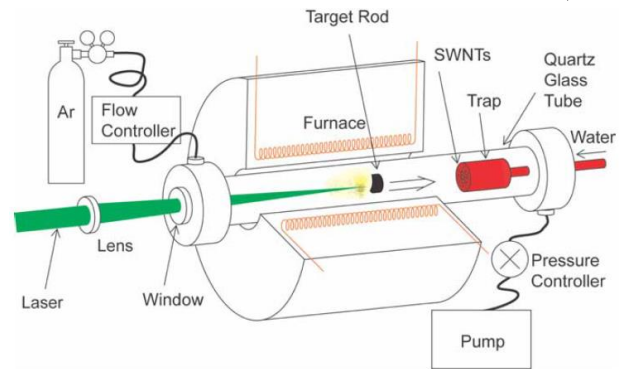
نانولوله‌های تک دیواره (SWNT) حدود دو سال بعد از نانولوله‌های چند دیواره (MWNT) کشف شدند [۱۳]. آنها در ابتدا توسط قوس تخلیه الکتریکی بوسیله لوله گرافیتی که کنتاکت آند آن حاوی فلز کاتالیست (آهن، کبالت و غیره) بود، بدست آمدند. اگر قسمت آند لوله گرافیتی، دارای فلزات کاتالیست باشد و قسمت کاتد از گرافیت خالص باشد، نانو لوله‌های تک دیواره بصورت دوده تولید خواهند شد که در ابتدا توسط/یجیما و/یچی‌هاشی کشف و عنوان تک پوسته‌ای یک نانومتری به آنها اطلاق شد [۱۲].

البته SWNT از دوده‌های حاصل از فاز گاز و نه از لایه نشسته بر روی کنتاکت کاتد، بدست آمد. در ضمن نانو ذرات فلزی تبخیر شده هم همراه SWNT وجود دارد که لازم است فرآیند خلوص سازی روی آنها انجام شود. تولید انبوه SWNT بوسیله قوس الکتریکی نیز انجام شده است [۱۳]. برای این منظور از کاتالیست دو فلزی Ni-Y در محفظه گاز هلیوم استفاده شده است. این روش با استفاده از دو الکتروود گرافیتی مورب با زاویه ۳۰ درجه بجای روش معمول ۱۸۰ درجه‌ای بصورت موثری بهینه شد. با این روش نرخ تولید به ۱g/min رسید [۱۴]. نکته قابل توجه اینکه SWNT بر روی الکتروود کاتد مشابه MWNT رشد نمی‌کند، بلکه بصورت دوده در چمبر یافت می‌شود. لذا بکارگیری قوس تخلیه الکتریکی با جریان ac که هر دو الکتروود در تولید بخار نقش دارند، باعث تولید بیشتر SWNT خواهد شد [۱۵].

### ۳-۲- بوته لیزری (Laser Furnace)

روش تبخیر لیزری معمولاً برای تولید خوشه‌ها و ذرات نازک CNT استفاده می‌شود. این روش در ابتدا برای تولید فلورین و CNT در گروه‌های کوچک توسعه یافت [۱۶]. از آنجا که چگالی انرژی لیزر خیلی بیشتر از دیگر روش‌های تبخیری است، از اینرو برای موادی با نقطه ذوب بالا نظیر کربن مناسب است. وقتی لیزر به کربن تابانده شود، فلورین تولید می‌شود. چنین آزمایشی ابتدا در سال ۱۹۸۵ انجام شده است [۱۷]. برای تولید بیشتر فلورین و نانو ذرات، ترکیب بوته لیزری به همراه سیستم گرم کننده در سال ۱۹۹۲ توسعه یافت [۱۸]. طرحی از این روش در شکل ۱ نشان داده شده است. این طرح شامل کوره، تیوب کوارتز با پنجره ورودی شفاف برای اعمال باریکه لیزری، کامپوزیت کربن که با فلزات کاتالیست آرایش شده به عنوان هدف، سیستم خنک کننده آب و سیستم جریان هوا برای نگهداری گازهای بافر و

تنظیم فشار و تعیین جریان هوای مورد نیاز تشکیل شده است.



شکل ۱: طرح دستگاه تبخیر سطحی لیزری [۲۰]

رشد ارائه می‌دهد. در حقیقت روش CVD برای تولید فیلامان و فیبرهای کربنی از سالهای ۱۹۵۹ بکار گرفته شده است [۲۱-۲۳]. بکارگیری چنین تکنیکی کمی بعد از کشف CNT توسط یجیما انجام شد [۲۴]. گزارشی نیز از رشد CNT از تجزیه در اثر حرارت بنزن در دمای ۱۱۰۰ درجه ارائه شده است [۲۵]. همچنین ساختار مارپیچی منظمی از MWNT در دمای ۷۰۰ درجه از استیلن ساخته شده است. در این دو روش از نانوذرات آهن به عنوان کاتالیست استفاده شده است. پس از آنها MWNT از اتیلن، متان و سایر هیدروکربن‌ها رشد داده شد [۲۶]. تولید SWNT به این روش برای اولین بار از تجزیه CO در دمای ۱۲۰۰ درجه و با کاتالیست Mo انجام شده است [۲۷]. پس از آن SWNT از بنزن، استیلن، اتیلن و متان با کاتالیستهای مختلف نیز تولید شد. نحوه رشد ساختارهای SWNT و MWNT از اندازه ذره کاتالیست تبعیت می‌کند. بطور کلی، هرگاه اندازه ذرات در حدود چند نانومتر باشد، SWNT شکل می‌گیرد، هرگاه ذرات در حد چند ده نانومتر باشند، MWNT شکل خواهد گرفت.

#### ۴- تحلیل رفتار نوری لایه‌های نانوکربنی

بر اساس مطالعات انجام شده این مواد قابلیت جذب خیلی بالایی در طیف مرئی دارند، بطوری که صفحات Buckypaper با استفاده از نانوکربنهای تک دیواره قابلیت جذب کامل طیف مرئی را دارند. تحقیقات و مشخصه‌های لایه‌های نانوکربنی نشان دهنده این موضوع است که لایه‌های چند دیواره (MWNT) برای کاربردهای مایکروویو و لایه‌های تک دیواره (SWNT) برای کاربردهای در طیف نوری قابل استفاده است.

در حوزه طیفهای نوری غیر مرئی در محدوده فرو سرخ (Infra Red) کوتاه و بلند میتوان بر اساس ساختارهای هندسی نانو کربنهای تک دیواره پیکهای جذب مختلفی را بدست آورد. در حوزه مخابرات نوری مبتنی بر فیبر نوری از طیفهای مختلف فرو سرخ استفاده می‌شود. نسل اول سیستمهای نوری برد کوتاه از طول موج ۸۵۰ نانومتر و فیبرهای چندمدی استفاده می‌کردند. نسل دوم برای افزایش طول انتقال از محدوده ۱۳۱۰ نانومتر و فیبرهای تک مد با تضعیف کمتر بهره می‌گیرند. در نسل سوم برای مسافتهای بلند از طول موج ۱۵۵۰ نانومتر که دارای کمترین تضعیف در فیبر تک مد در حدود ۰/۲ دسی‌بل به ازای هر کیلومتر است، بهره می‌برند [۲۸].

در آزمایشهای عملی انجام شده، پاسخ و عملکرد این نوع

در این طرح یک باریکه لیزر (بطور معمول لیزر YAG یا  $CO_2$ ) پس از کانونی شدن توسط لنز، از پنجره کوارتز وارد می‌شود و بر روی هدف در مرکز کوره، متمرکز می‌شود. قطعه هدف در دمای بالا به بخار تبدیل می‌شود. بخار کربن در محیط با گاز آرگن به SWNT تبدیل می‌شود. نرخ جریان گاز آرگن حدود  $1 \text{ cm/s}$  و تحت فشار  $500$  تور است. نانولوله‌های SWNT تولید شده توسط جریان گاز بافر، حمل شده و روی تله در انتهای کوره قرار می‌گیرند. منطقه تبخیر با تغییر مکان نقطه کانونی لیزر و یا جابجایی هدف در حد امکان تازه می‌ماند. قطر SWNTهای تولیدی توسط تغییر دمای کوره، فلزات کاتالیست و جریان هوا قابل کنترل است. از اینرو دمای بالاتر کوره باعث تولید SWNT با قطر بیشتر می‌شود [۱۹]. استفاده از آلیاژ کاتالیست Ni-Y باعث می‌شود، قطر SWNT افزایش یابد، در حالیکه کاتالیست Rh-Pd باعث کاهش قطر می‌شود [۲۰].

#### ۳-۳- لایه نشانی بخار شیمیایی (CVD)

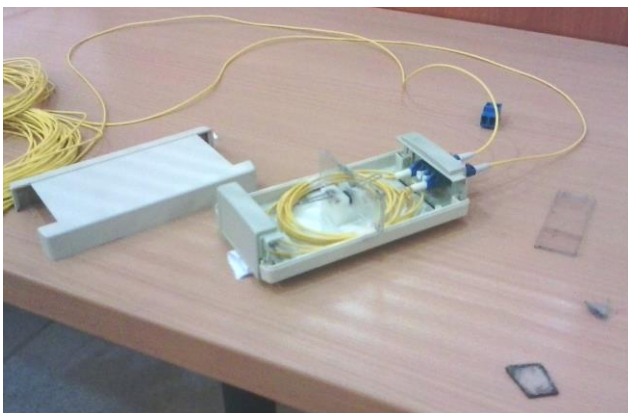
لایه نشانی بخار شیمیایی (Chemical Vapor Deposition) روش متداول دیگری برای تولید CNT توسط بخار هیدروکربن است که بصورت گرمایی تجزیه شده و در حضور فلز کاتالیست قرار می‌گیرد.

در مقایسه با روشهای قوس الکتریکی و لیزر، روش CVD برای تولید CNT در دمای پایین و فشار محدود، تکنیکی ساده و اقتصادی است. این روش توانایی مهار کردن انواع هیدروکربن‌ها در هر حالتی از ماده (جامد، مایع و یا گاز) را دارد و استفاده از انواع بسترها را فراهم می‌کند. همچنین این روش امکان رشد CNT را در حالت‌های مختلف مانند: پودر، فیلم نازک یا ضخیم، همراستا یا درهم تنیده، صاف یا مارپیچی و یا حتی معماری مورد نظر از نانولوله‌ها در جاهای از قبل مشخص شده روی الگویی بر بستر را فراهم می‌کند. در ضمن کنترل بهتری برای پارامترهای

باید دارای قابلیت تنظیم طول موج (Tunable Laser Diode) را داشته باشد. طول موج نوری کل بازه ۱۳۰۰ الی ۱۶۰۰ نانومتر و توان نوری مورد استفاده 1mW و یا 0dBm است. سپس باید شرایطی را فراهم کنیم که پوششهای مختلف نانو لوله‌های کربنی تک دیواره را در مسیر فیبر نوری بین خروجی دیود لیزر و تجهیز اندازه‌گیری طیف و توان، قرار دهیم. برای این منظور لازم است نور از فیبر خارج شود و پس از گذر از قطعه مورد آزمون، دوباره برای اندازه‌گیری طیف و توان به فیبر نوری تک مد بازگردد.

برای این هدف، باید از ساختار کولیماتور استفاده شود. این ساختار نور خروجی از فیبر نوری را که در هسته به قطر حدود ۱۰ میکرومتر محصور شده است، توسط منشور و عدسی به باریکه همراستا با قطر چند میلی‌متر تبدیل می‌کند. این باریکه نور را می‌توان از قطعه مورد تست عبور داد و توسط کولیماتور مقابل مجدداً وارد هسته ۱۰ میکرومتری فیبر نوری کرد. نور گذری ورودی به فیبر به آنالایزر طیف نوری منتقل و اثر کاهش توان را بدست آورده می‌شود. به این روش می‌توان عملکرد طیفی لایه‌های مختلف را در ساختارهای فیبر نوری مورد بررسی قرار داد.

برای تهیه چیدمان آزمون، کولیماتورهای فیبری ابتدا به دو کابل فیبر نوری با کانکتور LC جوش داده شد. سپس در یک بستر U شکل به موازات یکدیگر قرار داده می‌شوند. برای حفاظت از مجموعه، کل آن در یک جعبه به همراه آداپتور نوری LC برای دسترسی از بیرون قرار داده شد. نمونه‌ها را می‌توان بین کولیماتورها در بستر U شکل قرار داد. تصویری از این چیدمان به همراه لایه‌های نانوکربن و ITO در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: قطعه کولیماتور به همراه لایه‌های مختلف تحت آزمون

لایه‌ها در طیف مخابرات نوری مورد بررسی گرفته است. هدف، پیدا کردن کاربرد مخابرات نوری برای لایه‌های نانوکربنی است. این کاربردها شامل قابلیت فیلتر و گذر بخشی از باند است و در ضمن محدوده طیفی مورد نظر در محدوده ۱۳۰۰ تا ۱۶۰۰ نانومتر است. پیش‌بینی می‌شود بتوان ادوات جدیدی مانند فیلتر و تضعیف کننده را معرفی کرد.

#### ۴-۱- پوشش‌های نانو کربن

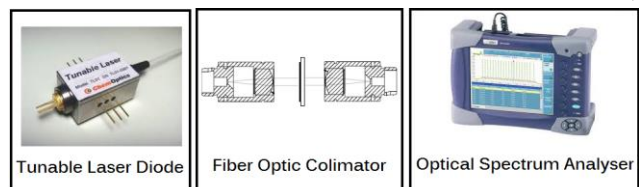
با توجه به اینکه هدف این مقاله بررسی عملکرد نوری لایه‌های نانو کربنی است، لذا لازم است که لایه‌های نانوکربنی را تهیه کرد و مورد آزمون قرار دهیم. همچنین بدلیل اینکه می‌خواهیم لایه‌های نانوکربنی را در مسیر باریکه نوری در فضای آزاد قرار دهیم، باید پوششها بر روی سطوح شفاف قرار گیرند. پودر نانوکربنی از نوع SWNT در بین دو لام شیشه‌ای آزمایشگاهی قرار داده شده است. برای کالیبره کردن نتایج آزمایش لام شیشه‌ای بدون پوشش و با پوشش ITO نیز به عنوان نمونه شاهد تهیه شده است.

#### ۴-۲- کولیماتور فیبر نوری

چون در این مقاله نیاز داریم که پوششهای مورد نظر را در مسیر فیبر نوری قرار دهیم، لذا لازم است نور مورد نظر از فیبر نوری خارج شود و پس از گذر از پوشش مورد آزمایش مجدداً وارد فیبر نوری شود. از اینرو به متمرکز کننده فیبر نوری احتیاج داریم. با قرار دادن نقطه کانونی لنز روبروی فیبر نوری، نور خروجی از فیبر با گذر از لنز، بصورت موازی ادامه مسیر می‌دهد و پس از گذر از نمونه مجدداً به فیبر نوری بازگردانده می‌شود.

#### ۴-۳- چیدمان آزمون

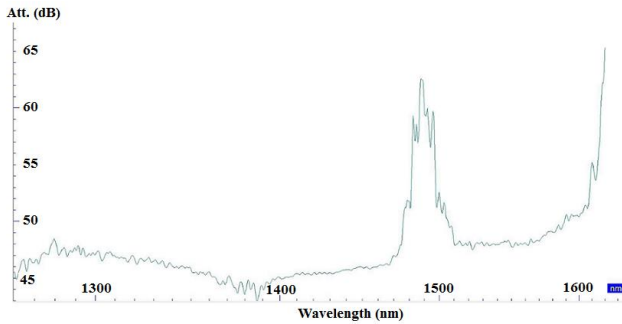
برای انجام آزمون بررسی خواص نوری لایه‌های نانوکربنی در حوزه مخابرات نوری، نیاز به چیدمان خاصی است. طرحی از این چیدمان در شکل ۲ آمده است.



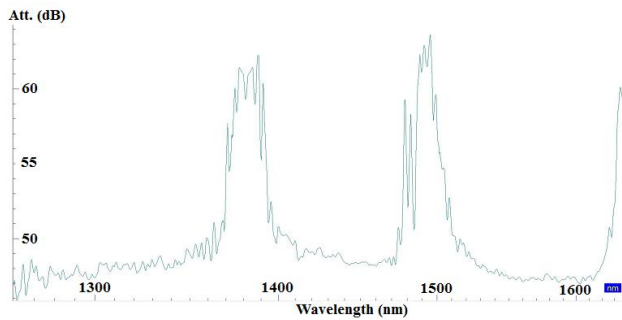
شکل ۲: چیدمان آزمون بررسی مشخصات نوری لایه‌های نانوکربنی

با توجه به اینکه هدف کاربرد فیبر نوری است، لذا برای منبع نوری، دیود لیزر کوپل شده به فیبر نوری انتخاب شد. همچنین برای بررسی عملکرد در کل بازه مورد نظر، دیود لیزری

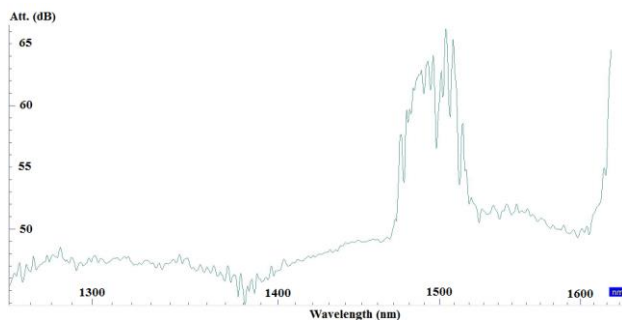
## ۵- نتایج آزمون



شکل ۵: آزمون لایه CNT



شکل ۶: آزمون لایه CNT

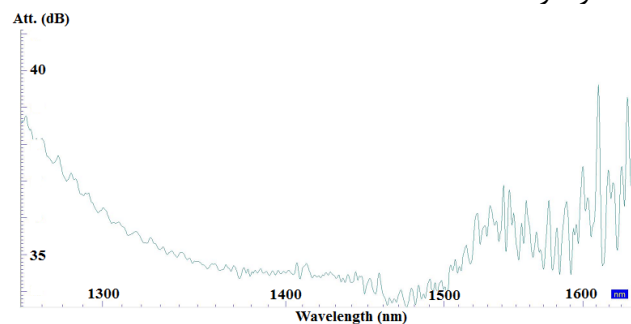


شکل ۷: آزمون لایه CNT

برای اندازه‌گیری پاسخ طیفی، دستگاه MTS-8000 از شرکت JDSU استفاده شده است. بازه مورد آزمایش کل محدوده قبل از ۱۳۰۰ نانومتر تا بعد از ۱۶۰۰ نانومتر را پوشش داده است. برای کالیبره کردن نتایج در ابتدا از یک کابل نوری مستقیم استفاده شده است. عملکرد منبع و دستگاه اندازه‌گیری در کل باند با تغییرات 0.5dB خطی است. لذا نیازی به کالیبره کردن نتایج بعدی نداریم.

سپس پاسخ طیفی دولایه شیشه آزمایشگاهی بدون پوشش به عنوان شاهد را اندازه‌گیری کردیم. مطابق نتایج، با تغییرات کمی در کل باند، خطی عمل می‌کند. همچنین حدود 30dB افت ثابت مربوط به خطای کولیماتور وجود دارد که باید در نتایج بعدی در نظر گرفت.

برای انجام مقایسه نیز از شیشه با پوشش ITO استفاده شده است و نتایج آن در شکل ۴ آمده است. بر اساس نتایج، این نمونه حدود 3dB تغییرات پاسخ طیفی دارد و در میانه باند کمترین افت را دارد.



شکل ۴: آزمون لایه ITO

## ۶- نتیجه‌گیری

با ساخت چنین چیدمان آزمونی تحلیل عملکرد لایه‌های مختلف در فضای آزاد برای کاربردهای فیبر نوری محقق شد. آزمایش‌های انجام شده روی نانولوله‌های کربنی نشان دهنده این نکته است که با پوشش‌های مختلف نانو لوله‌های تک دیواره، بروی ساختارهای شفاف مثل شیشه و ITO، می‌توان فیلترهای طیفی در بازه‌های مختلف ایجاد کرد. در این آزمایش‌ها فیلترهای حذف و گذر با دامنه تضعیف 10-15dB در محدوده طیفی مناسب مخابرات نوری شامل ۱۳۰۰ الی ۱۶۰۰ نانومتر محقق شد. علاوه بر این شیشه و پوشش ITO در این حوزه طیفی عملکرد تقریباً شفاف با تضعیف کمتر از 3dB دارند. این نتایج نشان دهنده پتانسیل بالای لایه‌های نانوکربنی در ساخت فیلتر، تضعیف کننده و دیگر ادوات نوری را نشان می‌دهد.

در شکل ۵ الی ۷ پاسخ طیفی لایه CNT در حالت‌های مختلف بررسی شده است. در این آزمون‌ها پودر CNT در بین دو لایه شیشه آزمایشگاهی قرار داده شده است. به این روش لایه نازکی از نانوکربن تشکیل می‌شود. با تغییر مکانی نمونه در مقابل پرتو لیزری بین دو کالیماتور پاسخ بخش‌های مختلف آن را مورد بررسی قرار دادیم. مطابق نتایج، پاسخ طیفی متفاوتی دریافت شده است. در نتایج شکل‌های ۵ الی ۷ فیلتر حذفی و گذری با حدود 10dB دامنه در یک، دو و سه ناحیه مجزا مشاهده شده است.

در این بخش لازم می‌دانم از همکاری و مساعدت مجموعه آزمایشگاه تائید نمونه سیستم‌های انتقال نوری مرکز تحقیقات مخابرات ایران کمال تشکر را داشته باشم.

### مراجع

- [16] A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H. Dai, P. Petit, J. Robert, C. Xu, Y. Hee Lee, S. Gon Kim, A. G. Rinzler, D. T. Colbert, G. E. Scuseria, D. Tománek, J. E. Fischer, R. E. Smalley, "Crystalline Ropes of Metallic Carbon Nanotubes", *Science*, Vol. 273, No. 5274, Pages 483-487, July 1996.
- [17] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl & R. E. Smalley, "C60: Buckminsterfullerene", *Nature*, No. 318, Pages 162 – 163, November 1985.
- [18] T. Guo, M. D. Diener, Y. Chai, M. J. Alford, R. E. Haufler, S. M. McClure, T. Ohno, J. H. Weaver, G. E. Scuseria, and R. E. Smalley, "Uranium stabilization of C28; a tetravalent fullerene", *Science*, Vol. 257, Pages 1661-1664, 1992.
- [19] Shunji Bandow, S. Asaka, Y. Saito, A. M. Rao, L. Grigorian, E. Richter, and P. C. Eklund, "Effect of the Growth Temperature on the Diameter Distribution and Chirality of Single-Wall Carbon Nanotubes", *Physics Review Letter* 80, 3779, 1998.
- [20] H. Kataura, Y. Kumazawa, Y. Maniwa, Y. Ohtsuka, R. Sen, S. Suzuki, Y. Achiba, "Diameter control of single-walled carbon nanotubes", *Carbon*, Vol. 38, Pages 1691-1697, 2000.
- [21] P. L. Walker, Jr., J. F. Rakszawski, and G. R. Imperial, "Carbon Formation from Carbon Monoxide-Hydrogen Mixtures over Iron Catalysts. I. Properties of Carbon Formed", *Journal Physics Chemistry*, Vol. 63, Pages 133-140, Feb. 1959.
- [22] P. L. Walker, Jr., J. F. Rakszawski, and G. R. Imperial, "Carbon Formation from Carbon Monoxide-Hydrogen Mixtures over Iron Catalysts. II. Rates of Carbon Formation", *Journal Physics Chemistry*, Vol. 63, Pages 140-149, Feb. 1959.
- [23] M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, K. Sugihara, I. L. Spain and H. A. Goldberg, "Graphite fibers and filaments", Springer series in materials science, Vol. 5, Springer, ISBN 3-540-18938-6, 1988.
- [24] M. Endo, K. Takeuchi, S. Igarashi, K. Kobori, M. Shiraishi, and H. W. Kroto, "The production and structure of pyrolytic carbon nanotubes (PCNTs)", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 54, Pages 1841-1848, 1993.
- [25] M. Jose Yacaman, M. Miki-Yoshida, L. Rendon and J. G. Santiesteban, "Catalytic growth of carbon microtubules with fullerene structure", *Applied Physics Letters*, Vol. 62, 1993.
- [26] M.M. Shaijumon, S. Ramaprabhu, "Synthesis of carbon nanotubes by pyrolysis of acetylene using alloy hydride materials as catalysts and their hydrogen adsorption studies", *Chemical Physics Letters*, Vol. 374, Pages 513-520, 2003.
- [27] H. Dai, A. G. Rinzler, P. Nikolaev, A. Thess, D. T. Colbert, R. E. Smalley, "Single-wall nanotubes produced by metal-catalyzed disproportionation of carbon monoxide", *Chemical Physics Letters*, Vol. 260, Issues 3-4, Pages 471-475, 1996.
- [۲۸] ع ظریفکار، ع پوراسلامی، ع امامی و م هاشمی، "طراحی و شبیه سازی یک لینک DWDM با ۳۲ کانال"، گروه فناوری مخابرات نوری، مرکز تحقیقات مخابرات ایران، ۱۳۸۳.
- [1] L. Vivien, D. Riehl, F. Hache, E. Anglaret, "Optical limiting properties of carbon nanotubes", Elsevier Science B.V., *Physica B* 323, PP. 233-234, 2002.
- [2] L. Viviana, E. Anglaret, D. Riehla and F. Hachea, "Non Linear Optical Properties of Singlewall Carbon Nanotubes for Optical Limiting", *MRS Proceedings*, Vol 597, 1999.
- [3] [http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon\\_nanotube](http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube)
- [4] Sumio Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon", *Nature* 354, pp: 56-58, 07 Nov 1991.
- [5] <http://www.kavliprize.org/events-and-features/sumio-ijima-gave-kavli-prize-laureate-lecture-tokyo>
- [6] <http://www.kavlifoundation.org/2008-nanoscience-citation>
- [7] Yoshinori Ando, Xinluo Zhao, Toshiki Sugai, and Mukul Kumar, "Growing carbon nanotubes", ISSN: 1369 7021 © Elsevier Ltd 2004, *Materialstoday* Oct 2004.
- [8] W. Kratschmer, Lowell D. Lamb, K. Fostiropoulos, Donald R. Huffman, "Solid C60: a new form of carbon", *Nature*, vol. 347, no. 6291, Pages 354-358, 27 Sep 1990.
- [9] Samuel M. Goldwasser, and Don Klipstein, "Various Note on Carbon Arcs", <http://donklipstein.com/carbarc.html>, 1996.
- [10] Yoshinori Ando, and Masato Ohkohchi, "Production of ultrafine powder of  $\beta$ -SiC by arc discharge", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 60, Issue 1, p. 147-149, 1982.
- [11] Y Ando, and S Iijima "Preparation of carbon nanotubes by arc-discharge evaporation", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.32, L107-L109, 1993.
- [12] Sumio Iijima, and Toshinari Ichihashi, "Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter", *Nature* Vol. 363, Pages 603 – 605, 17 June 1993.
- [13] C. Journet, W. K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M. Lamy de la Chapelle, S. Lefrant, P. Deniard, R. Lee & J. E. Fischer, "Large-scale production of single-walled carbon nanotubes by the electric-arc technique", *Nature*, Vol. 388, Pages 756-758, 1997.
- [14] Y. Andoa, X. Zhaob, K. Hiraharab, K. Suenagab, S. Bandowb, S. Iijimaa, "Mass production of single-wall carbon nanotubes by the arc plasma jet method", *Chemical Physics Letters* Vol. 323, Iss. 5-6, Pages 580-585, 23 June 2000.
- [15] Masato Ohkohchi, "Synthesis of Single-Walled Carbon Nanotubes by AC Arc Discharge", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 38, Part 1, Number 7A, Pages 4158, 1999.