

## تأثیر توان بسامد رادیویی در لایه‌نشانی کندوپاش دو کاتدی بر خواص نوری، ساختاری و الکتریکی لایه‌های نازک Cu-DLC

علیرضا میخ‌چین و سید ایمان حسینی\*

گروه فیزیک پلاسما و ذرات بنیادی، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

\*پست الکترونیکی: imanhosseini@shahroodut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۰۵/۲۱)

### چکیده

در این مطالعه، تأثیر غلظت ذرات مس بر ساختار، خواص الکتریکی و نوری لایه‌های کربن شبه‌الماسی مورد ارزیابی قرار گرفت. لایه‌ها با استفاده از روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و بسامد رادیویی همزمان سنتز شده‌اند و رابطه آنها با عناصر فعال شیمیایی تولید شده در پلاسما مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر توان منبع تغذیه بسامد رادیویی بر روند تغییرات ساختاری، الکتریکی و نوری لایه‌ها مطالعه شد. طیف‌سنجی رامان نشان می‌دهد در ساختار پیوندی، مکان قله  $G$  از ۱۵۸۴ تا ۱۵۹۰  $(cm^{-1})$  و نسبت  $I_D/I_G$  از ۰/۸۵ تا ۲/۲۲ افزایش می‌یابد که بیان‌کننده کاهش ساختار شیمیایی  $SP^3$  نسبت به  $SP^2$  است. به منظور بررسی گونه‌های فعال شیمیایی غالب در محیط پلاسما، طیف‌سنجی نشری نوری (OES) انجام شد. با افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی شدت قله‌های گونه‌های فعال  $Cu$  در محیط پلاسمایی تا حدودی افزایش یافته و گونه‌های فعال کربنی به طور نسبی ثابت بوده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی از ۱۰ تا ۲۵W و ثابت نگه داشتن توان منبع تغذیه جریان مستقیم در توان ۱۰۰W، ضریب جذب نوری لایه‌ها روند کاهشی داشته است. شکاف نوار انرژی لایه‌ها که با استفاده از روش برون‌یابی معادله تائوک به دست آمده است با روندی کاهشی از ۱/۵۳ eV به ۰/۷۹ eV رسیده است. ضریب شکست لایه‌ها با استفاده از روش بیضی‌سنجی مورد تحلیل قرار گرفته است. مقاومت نمونه‌ها با افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی، روند ثابت و یکسانی را طی نکرده و در ابتدا روندی کاهشی و سپس به دلیل تغییر در غلظت ذرات مس در نمونه‌ها افزایش یافته است.

**واژه‌های کلیدی:** کربن شبه‌الماسی، ذرات مس، کندوپاش مغناطیسی بسامد رادیویی و جریان مستقیم همزمان، طیف‌سنجی رامان، طیف‌سنجی بیضی‌سنجی و ضریب شکست

### ۱. مقدمه

کربن هستند که ویژگی‌های آن به پیوندهای اتمی کربن-کربن و یا نسبت ساختار  $SP^3/SP^2$  وابسته است [۱].  $SP^3$  با ساختار چهار وجهی از پیوند اتم‌های کربن، به ساختار الماس گونه مشهور است.

پوشش‌های کربنی شبه‌الماسی  $DLC^1$  شکل آمورفی از ساختار

۱. Diamond-like carbon

افزایش مقاومت به ساییش و روانکاری می‌شود. همچنین ویژگی‌های نوری و الکترونی این لایه‌ها برای کاربردهای فتوولتائیک (PV<sup>۱</sup>)، سلول‌های خورشیدی [۷] و اصلاح شکاف نوار انرژی در محدوده وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸]. تلقیح‌های فلزی به دو دسته کلی کاربردی و غیر کاربردی تقسیم‌بندی می‌شود. به تلقیح‌های فلزی که با کربن ساختار مستحکم کاربرد تشکیل می‌دهند مانند W، Ti، V و... تلقیح کاربردی گفته می‌شود. به تلقیح‌هایی که سبب ایجاد کاربرد در ساختار کربنی نمی‌شوند مانند Au، Ag، Cu و... تلقیح غیر کاربردی گفته می‌شود [۷ و ۹-۱۱]. خصوصیات نوری لایه‌های کربن شبه‌الماسی به شدت به تغییر ساختار آنها مرتبط است و به وسیله روش‌های رسوبی (لایه‌نشانی) و فرایندهای آماده‌سازی لایه تعیین می‌شود. اخیراً این خصوصیات نوری و مکانیکی لایه‌های کربن شبه‌الماسی را می‌توان با افزودن ذرات مختلفی همچون مس تنظیم کرد [۱۲-۱۳]. لایه‌های Cu-DLC که توسط روش‌های پلاسمایی سنتز می‌شوند نه تنها کاربردهایی به عنوان مواد پلاسمونی دارند بلکه همچنین به عنوان پوشش‌های مکانیکی و ضد باکتریایی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴]. امروزه از روش‌های گوناگونی برای لایه‌نشانی لایه‌های کربن شبه‌الماسی برای مقاصد مختلف استفاده می‌شود. این روش‌ها عبارتند از رسوب لیزر تپی (PLD<sup>۲</sup>)، بخار شیمیایی (CVD<sup>۳</sup>)، بخار شیمیایی به کمک پلاسمای (PECVD<sup>۴</sup>)، کندوپاش مغناطیسی [۱۵]. در این بین روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و بسامد رادیویی، به دلیل رسوب آسان لایه‌های کربن شبه‌الماسی با ناخالصی‌های مختلف فلزی و امکان رسوب لایه‌هایی با ابعاد بزرگ، سادگی عملکرد و هزینه تولید کمتر نسبت به روش‌های دیگر، مقرون به صرفه و مناسب برای کاربردهای صنعتی است [۲ و ۱۶]. در این پژوهش، لایه‌های

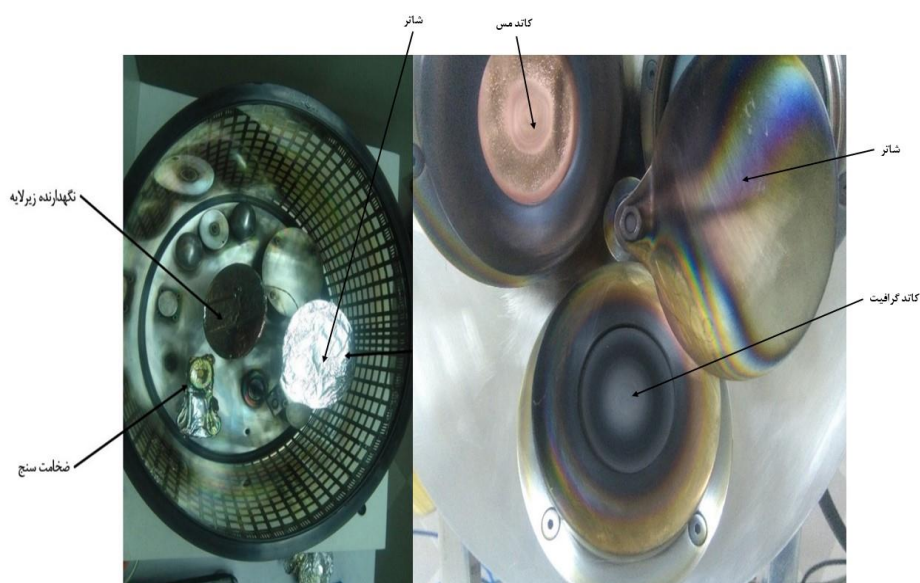
ساختار SP<sup>۲</sup> با ساختاری سه وجهی از پیوند اتم‌های کربن، به ساختار گرافیت‌گونه شهرت دارد [۲]. پیوندهای محکم SP<sup>۳</sup> تعیین کننده خواص فیزیکی و مکانیکی مانند سختی این دست از لایه‌های کربنی بوده، در حالی که ویژگی الکترونیکی و نوری این مواد بیشتر مربوط به پیوندهای SP<sup>۲</sup> است. در واقع نسبت SP<sup>۳</sup>/SP<sup>۲</sup> تعیین کننده خواص لایه‌های کربن شبه‌الماسی است [۳]. لایه‌های کربن شبه‌الماسی به دلیل خواص الکتریکی، مکانیکی، شیمیایی و سطحی منحصر به فرد ویژگی‌های کاربردی و مناسبی همچون سختی بالا، واکنش پذیری شیمیایی پایین، ضریب اصطکاک کم (۰/۱۵)، مقاومت سایشی بالا، شفافیت نوری مناسب، چسبندگی مناسب با سطوح، و عدم پاسخ مغناطیسی و آبگریزی دارد. از این نوع لایه‌ها عمدتاً به عنوان پوشش‌های محافظ مانند پنجره‌های نوری، دستگاه‌های ذخیره‌سازی مغناطیسی و نوری، پوشش‌های نجسب و محافظ سلول‌های خورشیدی، و الکتروود برای حسگرهای زیستی استفاده می‌شود. همچنین برای بهبود دستگاه‌های ذخیره‌سازی مغناطیسی و نوری استفاده می‌شود [۴-۵]. مطالعه بر روی لایه‌های DLC اولین بار توسط آیزنبرگ و چاپوت انجام شد. با درک فرایند رشد و خواص این نوع از لایه‌ها، مطالعه گسترش یافت. با وجود این واقعیت که لایه‌های کربن شبه‌الماسی ویژگی‌های بسیار برتری را نسبت به پوشش‌های همتراز خود نشان می‌دهد، اما تقاضاها و پیشرفت روزافزون صنعت، قابلیت‌های عملکردی آنها را به چالش کشیده است [۱]. امروزه پوشش‌های کربن شبه‌الماسی تلقیح شده یا آلیاژی دسته مهمی از ساختار کربن شبه‌الماسی هستند که با ترکیب عناصر مختلف در ساختار آن به منظور بهبود عملکرد و خواص لایه‌ها ایجاد می‌شوند [۶]. افزودن تنها چند درصد تلقیح فلزی در ساختار لایه‌های کربن شبه‌الماسی باعث افزایش چسبندگی به زیرلایه،

۱. Photovoltaic

۲. Plasma laser deposition

۳. Chemical vapor deposition

۴. Plasma chemical vapor deposition



شکل ۱. نمایی از محفظه لایه‌نشانی که شامل نگهدارنده، شاطر و همچنین ضخامت‌سنج است.

برای مشخص کردن گونه‌های فعال شیمیایی غالب در محیط پلاسما استفاده شد. ساختار پیوندهای شیمیایی لایه‌های سنتز شده با استفاده از تحلیل طیف‌سنجی رامان نیز مورد مطالعه قرار گرفت. خواص نوری، ساختاری و ریخت‌شناسی لایه‌ها که با تغییر توان منبع تغذیه بسامد رادیویی و ثابت نگه داشتن توان منبع تغذیه جریان مستقیم ایجاد شده بودند مورد بررسی قرار گرفت. ضریب شکست لایه‌ها به وسیله طیف‌سنجی بیضی‌سنجی اندازه‌گیری شد. در این تحقیق، نتایج نشان می‌دهد تغییر توان منبع تغذیه بسامد رادیویی تأثیر قابل توجهی بر روی ساختار و خواص نوری و الکتریکی لایه‌های Cu-DLC دارد.

## ۲. جزئیات آزمایشگاهی

در این مطالعه، لایه‌های DLC با ذرات مس افزوده شده به آن، با استفاده از روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم با هدف گرافیت و کندوپاش بسامد رادیویی با هدف مس به‌طور همزمان لایه‌نشانی شد که تصویر داخلی دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است.

Cu-DLC به وسیله روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم با کاتد گرافیتی و بسامد رادیویی با هدف مس به‌طور همزمان لایه‌نشانی شدند. در سال‌های اخیر برای لایه‌نشانی لایه‌های DLC از گازهای هیدروکربنی مختلف مانند متان یا استیلن به‌عنوان چشمه‌های کربن در روش کندوپاش استفاده شده است. در این تحقیق، بر خلاف روش‌های مرسوم از دو هدف جامد: یکی گرافیت و متصل به ولتاژ مستقیم و دیگری مس متصل به ولتاژ RF استفاده شده است. استفاده از هدف جامد گرافیت به‌عنوان چشمه کربن منجر به مصرف کمتر گاز، سنتز با خلوص بالاتر، قابلیت کنترل دقیق‌تر بر آهنگ رشد لایه و تولید لایه با چگالی بالا و هزینه بسیار پایین‌تر می‌شود. همچنین استفاده از ولتاژ RF برای کندوپاش مس باعث تولید پلاسمای پایدار حتی در فشارهای پایین‌تر می‌شود که می‌تواند برای دستیابی به فیلم‌های با کیفیت بالا با نقص کمتر و یکنواختی بهتر مفید باشد و همچنین پلاسمای پایدار را حتی در فشارهای پایین می‌تواند تولید کند که برای دستیابی به فیلم‌های با کیفیت بالا با نقص کمتر و یکنواختی بهتر مفید است. در این پژوهش، از طیف‌سنجی نشری نوری (OES<sup>۱</sup>)

۱. Optical emission spectroscopy

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در ایجاد لایه‌های Cu-DLC.

نام لایه	توان RF (W)	توان DC (W)	ولتاژ بایاس (V)	شار گاز (sccm)	زمان (min)
R10	۱۰	۱۰۰	-۱۰۰	۳۰	۶۰
R15	۱۵	۱۰۰	-۱۰۰	۳۰	۶۰
R20	۲۰	۱۰۰	-۱۰۰	۳۰	۶۰
R25	۲۵	۱۰۰	-۱۰۰	۳۰	۶۰

طور ثابت قرار داده شد ولی توان هدف مس برای ساخت لایه‌ها در ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵W قرار گرفتند. همچنین برای ساخت همه لایه‌های Cu-DLC از ولتاژ بایاس به مقدار ۱۰۰V- مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای لایه‌نشانی برای تولید لایه‌های با ضخامت یکسان در جدول ۱ آمده است. لایه‌ها با استفاده از دستگاه کندوپاش سه کاتد مدل DST2-T شرکت پوشش‌های نانو ساختار ایجاد شدند. در این مطالعه، برای بررسی ساختار پیوند مولکولی لایه‌ها از تحلیل رامان و دستگاه آوانتس<sup>۱</sup> مدل uRaman-532-Ci استفاده شد. خواص نوری لایه‌ها و ضرایب جذب و عبور آنها به وسیله دستگاه طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش<sup>۲</sup> مدل shimadzu-uv1800 اندازه‌گیری شد. همچنین ضریب شکست لایه‌ها با استفاده از تحلیل طیف‌سنجی بیضی‌سنجی<sup>۳</sup> اندازه‌گیری شد. برای بررسی عناصر فعال شیمیایی تولید شده در پلاسما در حین فرایند لایه‌نشانی، از تحلیل طیف‌سنجی نشری نوری با دستگاه آوانتس مدل AvaSpec-ULS3648 RS استفاده شد.

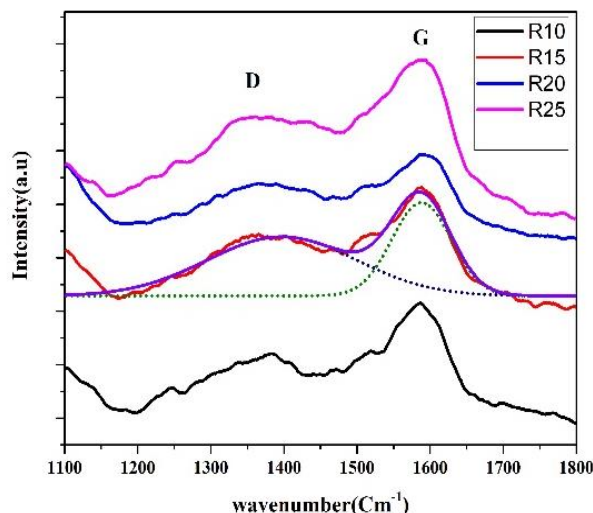
برای اندازه‌گیری خصوصیات الکتریکی نمونه‌ها از تحلیل جریان - ولتاژ با استفاده از دستگاه تحلیل الکتروشیمیایی مدل BHP-2066 شرکت مهندسی الکترونیک و کامپیوتر به‌پژوه بهره گرفته شد. با اعمال پتانسیل در محدوده مشخص، جریان عبوری از نمونه‌ها را اندازه‌گیری کرده و مقاومت نمونه‌ها مشخص می‌شود.

هدف گرافیت با قطر ۵/۸ mm و ضخامت ۶ mm با خلوص ۹۹/۹۹ درصد و همچنین هدف مس با قطر ۵/۸ mm و ضخامت ۱ mm و خلوص ۹۹.۹۹٪ مورد استفاده قرار گرفتند. از گاز آرگون با خلوص ۹۹.۹۹٪ به عنوان گاز کندوپاش در همه لایه‌ها استفاده شده است. قبل از شروع فرایند لایه‌نشانی، زیرلایه‌های شیشه‌ای ابتدا با آب و صابون و سپس در محلول اتانول و استون در حمام فراسوت در دمای ۵۰ °C به مدت ۳۰ دقیقه شستشو داده شده‌اند و سپس با باد سرد خشک شدند. فاصله هدف تا زیرلایه برای همه لایه‌های تولید شده ۶۰ mm قرار داده شد و به منظور تشکیل لایه‌های یکنواخت زیرلایه در طول لایه‌نشانی با سرعت ۸ rpm در حال چرخش قرار گرفت. در ابتدا فشار محفظه به وسیله پمپ‌های روتاری و توربو مولکولار به  $8 \times 10^{-5}$  torr رسید تا سبب پاک‌سازی محفظه از هوا و دیگر مواد ناخالص شود. سپس فشار کاری دستگاه برای روشن شدن پلاسما و شروع فرایند لایه‌نشانی در  $4 \times 10^{-2}$  torr قرار گرفت. منبع تغذیه جریان مستقیم به هدف گرافیت و منبع تغذیه بسامد رادیویی به هدف مس متصل شد تا از هردو هدف برای فرایند لایه‌نشانی به روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و بسامد رادیویی همزمان استفاده شود. در اینجا برای ساخت لایه‌های Cu-DLC از توان هدف مس به عنوان پارامتر متغیر استفاده شد. توان منبع تغذیه جریان مستقیم همواره در تمام لایه‌های ساخته شده ۱۰۰W به

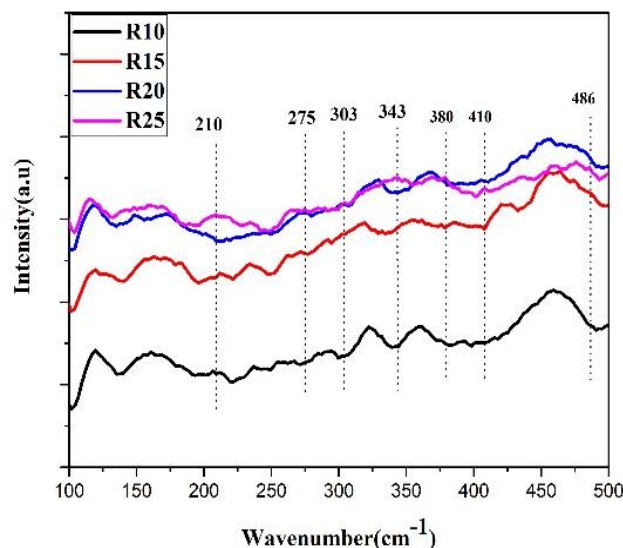
۱. Avantes

۲. Ultraviolet-visible spectroscopy

۳. Elipsometry



شکل ۳. طیف‌سنجی رامان از لایه‌های ایجاد شده با تغییر توان منبع تغذیه بسامد رادیویی.



شکل ۲. تحلیل رامان لایه‌های ایجاد شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه بسامد رادیویی در بازه عدد موجی  $500-100 \text{ cm}^{-1}$ .

پس از انجام فرایند لایه نشانی و در حین انجام تحلیل ایجاد شده باشد. برای نمونه‌های دیگر، محتوای ذرات مس به اندازه‌ای بوده است که ساختار کربن شبه‌الماسی مانع ایجاد ساختار اکسیدی بر روی سطح شود [۱۴].

تحلیل رامان نمونه‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده علاوه بر پراکندگی در بازه عدد موج  $500-100 \text{ cm}^{-1}$  شامل قله‌های اصلی و شانهای پهن در دامنه عدد موجی بین  $1800-1200 \text{ cm}^{-1}$  است. قله اصلی در  $1600-1500 \text{ cm}^{-1}$  به عنوان قله G شناخته می‌شود که مربوط به مد ارتعاش کششی از پیوندهای شیمیایی  $\text{SP}^2$  کربن است و شانهای پهن در  $1400-1200 \text{ cm}^{-1}$  به عنوان قله D مربوط به مد ارتعاشی تنفسی از پیوند شیمیایی  $\text{SP}^2$  حلقه کربن تعریف می‌شود [۱۶] که در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق شکل ۳، با برازش طیف رامان، نمونه‌های لایه‌نشانی شده با چند تابع گوسی طیف به دست آمده از هر لایه به دو قله G و D تجزیه می‌شود. با استفاده از نسبت قله D به G ( $I_D/I_G$ ) و همچنین موقعیت قله G، خواص ساختاری لایه‌های Cu-DLC را می‌توان مشخص کرد. در طیف‌سنجی رامان موقعیت قله G و نسبت

### ۳. نتایج و بحث

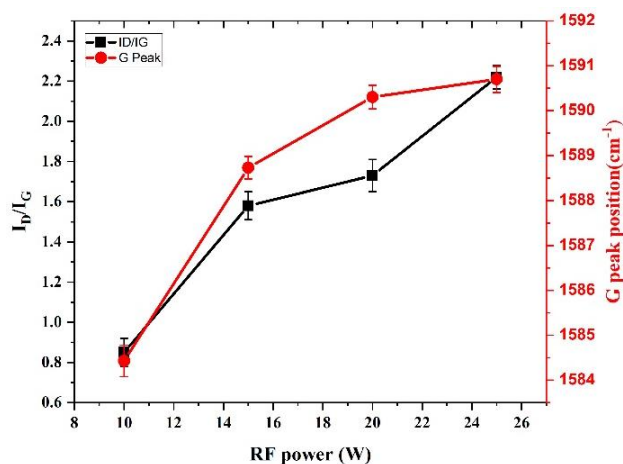
#### ۳.۱. بررسی تحلیل طیف‌سنجی رامان

برای بررسی ساختار شیمیایی لایه‌های رشد یافته تحت تغییر توان منبع تغذیه بسامد رادیویی از ۱۰ W تا ۲۵ W از تحلیل رامان استفاده شد. در شکل ۲، طیف‌های تحلیل رامان لایه‌ها در بازه عدد موجی  $500-100 \text{ cm}^{-1}$  نشان داده شده است. در بررسی تحلیل رامان در این بازه، تنها برای نمونه‌های R25 قله‌های بسیار کوتاه و پهن در عدد موج‌های  $410$ ،  $343$ ،  $303$ ،  $275$ ،  $210$  و  $486 \text{ cm}^{-1}$  مشاهده شده است. این قله‌های پهن و کوتاه در نزدیکی محدوده طول موجی اکسید مس حضور دارند. در واقع، این می‌تواند نشان دهنده حضور اکسیدهای مس بر روی سطح لایه‌ها باشد [۱۷-۱۸]. با توجه به این که فلز مس جزء آن دسته از فلزات است که به سرعت اکسید می‌شود، افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی سبب افزایش ذرات مس در سطح و ساختار نمونه R25 شد. حضور قله‌های اکسید مس می‌تواند به دلیل اکسیداسیون ناخواسته ذرات مس موجود در لایه‌های سطحی نمونه R25 باشد که احتمالاً

خود به نمایش بگذارند و شکاف نواری و مقاومت لایه‌ها روند کاهشی خواهند داشت.

در واقع افزایش میزان محتوای  $SP^2$  در ساختار لایه‌ها ناشی از ثابت بودن منبع تغذیه جریان مستقیم بوده است که با افزایش غلظت نانوذرات مس مانع ایجاد ساختار  $SP^3-C$  در لایه‌ها  $Cu-$  DLC شده است. به علت افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی محتوای ذرات مس در لایه‌ها افزایش یافته و سبب شده است که پیوندهای کربنی به سمت گرافیتی شدن میل کنند. با افزایش موقعیت قله‌های  $G$ ، نسبت  $I_D/I_G$  نیز افزایش یافته که نشان می‌دهد محتوای  $SP^2$  در لایه‌ها افزایش یافته است [۱۹-۲۰].

باتوجه به روند افزایشی موقعیت  $G$  و افزایش نسبت  $I_D/I_G$  برای لایه‌های ایجاد شده در این تحقیق و همچنین باتوجه به کاهش اندازه نانوذرات گرافیتی و حفظ حلقه‌های معطر نتیجه می‌گیریم که در این لایه‌ها با افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی از  $10$  تا  $25$  W تعداد پیوندها  $SP^2$  کربن-کربن روند افزایشی داشته است. خسته و همکاران [۲۱] و همچنین مسکینی و همکاران [۲۲] گزارش داده‌اند که با افزایش غلظت ذرات مس در لایه‌ها روند  $I_D/I_G$  افزایش یافته است و محتوای  $SP^2$  نیز افزایشی بوده است که با نتایج ما مطابقت دارد. افزایش غلظت ذرات مس سبب کاهش ساختارهای کربن شبه‌الماسی در لایه‌ها شده است پس انتظار می‌رود با افزایش غلظت ذرات مس محتوای  $SP^2-C$  در لایه‌های تشکیل شده نیز افزایش یابد. در این تحقیق، با افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی، غلظت ذرات مس افزایش یافته و سبب شده تا نسبت  $I_D/I_G$  و موقعیت قله  $G$  نیز در لایه‌ها افزایش یابد و در نتیجه افزایش  $SP^2-C$  داشته باشیم. با توجه به این که خواص نوری و الکترونیکی لایه‌های کربن شبه‌الماسی به میزان پیوندهای  $SP^2$  وابسته است پس انتظار داریم با افزایش میزان این نوع پیوندها در لایه‌های  $Cu-DLC$  لایه‌نشانی شده، ضریب جذب و شکاف نواری این نوع از لایه‌ها روند کاهشی



شکل ۴. نسبت  $I_D/I_G$  و موقعیت قله  $G$  برای لایه‌های  $Cu-DLC$  لایه‌نشانی شده با تغییر توان بسامد رادیویی.

شدت قله  $D$  به  $G$  ( $I_D/I_G$ ) که در شکل ۴ نشان داده شده است به عنوان تحلیلی برای بررسی ویژگی پیوندهای موجود در لایه‌های DLC استفاده می‌شود. با توجه به شکل ۳، تحلیل طیف‌سنجی رامان از نمونه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی همه نمونه‌های لایه‌نشانی شده به ترتیب قله  $G$  و همچنین  $D$  واضح و مشخص دارند.

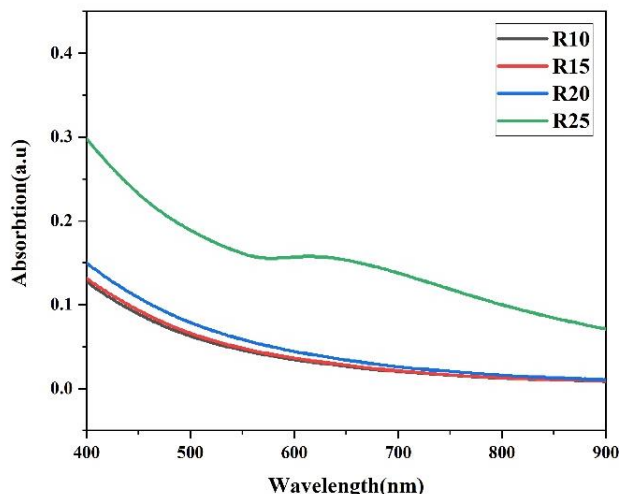
واضح بودن قله‌های  $G$  و  $D$  در نمونه‌های لایه‌نشانی شده نشان می‌دهد که ساختار مشخصی از لایه‌های آمورف کربنی ایجاد شده است. در بررسی نسبت  $I_D/I_G$  لایه‌ها، که نشان دهنده نسبت سطح زیر نمودار قله  $D$  به قله  $G$  است، روند افزایشی از خود نشان می‌دهد. روند افزایشی  $I_D/I_G$  بیان‌کننده افزایش تعداد پیوندهای  $SP^2$  نسبت به پیوندهای  $SP^3$  در لایه‌های سنتز شده است [۱۵]. افزایش موقعیت قله  $G$  و همچنین روند افزایشی نسبت  $I_D/I_G$  نشان می‌دهد که لایه‌ها در حال گذار از حالت آمورف کربنی (a-c) به سمت گرافیت بوده است. در این گذار حلقه‌های معطر<sup>۱</sup> در لایه‌ها افزایش خواهند یافت که سبب افزایش محتوای  $SP^2$  نسبت به ساختار  $SP^3$  در لایه‌ها خواهد شد. با افزایش محتوای  $SP^2$  در لایه‌های DLC انتظار می‌رود که لایه‌ها بیشتر خواص الکتریکی از

برای لایه‌های R10 و R15 طیف جذب چندان تغییری نداشته است و تقریباً طیف‌ها بر روی هم منطبقند. این نشان می‌دهد با افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی که به هدف مس متصل است، مقدار ذرات مس لایه‌نشانی شده بر روی لایه R15 نسبت به لایه R10 چندان تغییرات واضح نداشته است تا سبب تغییر روشنی در طیف جذب لایه R15 شود. با افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی از ۱۵ تا ۲۵، طیف جذب لایه‌ها به طور واضح تغییراتی نشان می‌دهد که حاکی از افزایش ذرات مس در لایه‌های Cu-DLC ساخته شده است. با ثابت بودن منبع تغذیه جریان مستقیم، مقدار کربن کندوپاش شده در لایه‌ها همواره ثابت بوده که با تحلیل رامان به دست آمده از لایه‌ها مطابقت دارد. حال به بررسی خواص نوری لایه‌های ایجاد شده پرداخته می‌شود که در اینجا شکاف نواری غیر مستقیم لایه‌ها و شکاف نواری E<sub>04</sub> از طریق داده‌های به دست آمده به وسیله تحلیل طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش محاسبه می‌شوند [۳]. ضریب جذب لایه‌های ایجاد شده با استفاده از معادله زیر به دست خواهد آمد [۲۵].

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{I_0}{I_t}\right), \quad (1)$$

در این معادله،  $\alpha$  ضریب جذب و  $d$  ضخامت لایه‌ها است. همگی لایه‌ها به ضخامت ۱۰۰ nm لایه‌نشانی شده‌اند. همچنین طیف عبور را نشان می‌دهد. ضریب جذب لایه‌ها و مقدار شکاف نواری E<sub>04</sub> آنها در شکل ۶ نشان داده شده است. E<sub>04</sub> شکاف نواری است که ضریب جذب مقدار ۱۰<sup>۴</sup> Cm<sup>-۱</sup> را داشته باشد [۳].

همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم شکاف نواری E<sub>04</sub> روند کاهشی داشته است و از مقدار ۲/۳۰ eV تا میزان ۱/۲۱ eV کاهش یافته است. کاهش شکاف نواری E<sub>04</sub> نشان می‌دهد میزان SP<sup>2</sup> نیز در لایه‌ها روند افزایشی داشته است [۲۳] که این موضوع با نتایج حاصل از تحلیل رامان مطابقت دارد؛ زیرا با افزایش ذرات مس I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> لایه‌ها افزایش

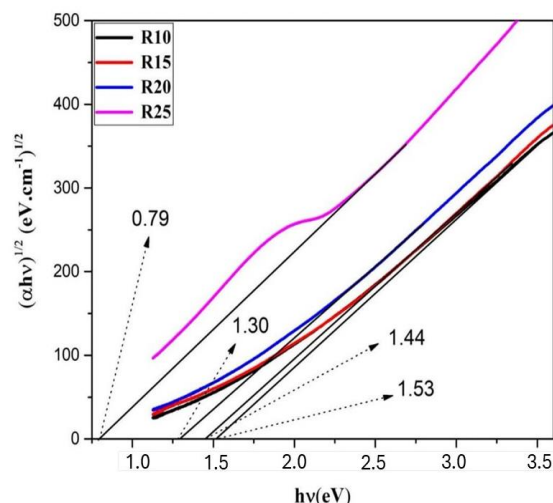


شکل ۵. طیف جذب برای لایه‌های ایجاد شده به روش کندوپاش مغناطیسی همزمان با تغییر توان بسامد رادیویی.

داشته باشند که در بخش بعد مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۲-۲۳].

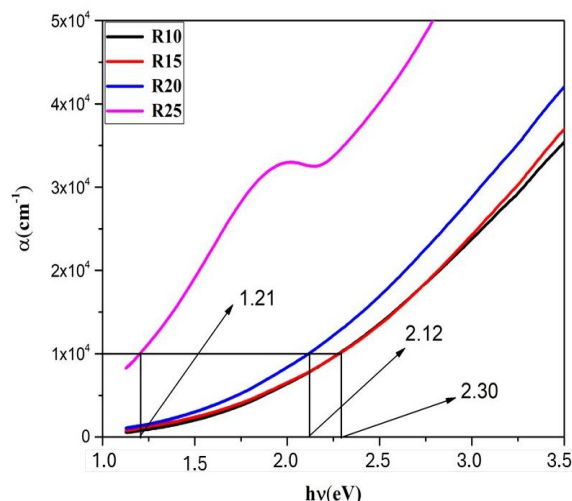
### ۲.۳. بررسی خواص اپتیکی

برای بررسی خواص نوری لایه‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده به روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و بسامد رادیویی طیف‌های عبوری و جذب نوری لایه‌ها به وسیله دستگاه UV-vis اندازه‌گیری شده‌اند، نتایج این اندازه‌گیری در شکل ۵ نشان داده شده است. در بررسی طیف جذب لایه‌های Cu-DLC که با افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی ایجاد شده است قله‌های واضح و تیزی که نشان از حضور تشدید ذرات مس باشد مشاهده نشده است تنها در لایه R25 قله بسیار پهنی مشاهده شده است که می‌تواند بر اثر حضور ذرات مس و مربوط به قله‌های تشدید پلاسمونی سطح باشد [۲۴]. بیشترین پهنای قله پلاسمونیک در طیف جذب، برای لایه‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده به وسیله کندوپاش مغناطیسی واکنشی و قوس کاتدی در دامنه طول موجی ۵۴۰-۷۵۰ nm دیده شده است [۲۵] (شکل ۵ را ببینید).



شکل ۷. نمودار الگوی تائوک برای لایه‌های ایجاد شده با تغییر توان منبع تغذیه بسامد رادیویی و توان ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم.

در حقیقت با توجه به ثابت بودن توان منبع تغذیه جریان مستقیم، مقدار ذرات مس لایه‌نشانی شده به ازای کربن لایه‌نشانی شده افزایش می‌یابد. با افزایش میزان ذرات مس در لایه‌ها و به واسطه آن، مقدار ذرات کربن در حجم لایه کاهش یافته و شکاف نوار انرژی لایه‌ها به علت حضور ذرات فلزی مس روند کاهشی می‌یابد. همچنین اثر افزایش مقدار ذرات مس در نمودار رامان نمونه‌ها مشخص است که با افزایش مقدار مس محتوای  $SP^2$  افزایش یافته و سبب افزایش  $I_D/I_G$  در نمونه‌ها شده که با روند کاهشی شکاف نواری همخوانی دارد. بالاترین شکاف نوار انرژی مربوط به نمونه R10 است که  $1/53\text{eV}$  است. با افزایش توان بسامد رادیویی و بالتبع افزایش ذرات مس، شکاف نواری نمونه‌ها به تدریج کاهش یافته است. برای نمونه‌های R20-R15 و R25 مقدار شکاف نوار انرژی لایه‌های سنتز شده به ترتیب  $1/44$ ،  $1/30$  و  $0/79\text{eV}$  به دست می‌آید. تغییرات شکاف نواری لایه‌های Cu-DLC که بر اساس غلظت ذرات مس در لایه‌ها توسط ام‌ای.خان و همکاران نیز گزارش شده است با نتایج به دست آمده



شکل ۸. ضریب جذب و شکاف نواری  $E_{04}$  لایه‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده به روش کندوپاش مغناطیسی همزمان و با تغییر توان بسامد رادیویی.

یافته است که نشان از افزایش محتوای  $SP^2$  در لایه‌ها است. با افزایش  $SP^2$  در لایه‌ها انتظار می‌رود شکاف نواری  $E_{04}$  روند کاهشی داشته باشد. برای لایه‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده، با افزایش توان منبع تغذیه بسامدی رادیویی این مهم ایجاد شده است.

شکاف نوار انرژی لایه‌های Cu-DLC با استفاده از معادله تائوک<sup>۱</sup> محاسبه شد [۱۲].

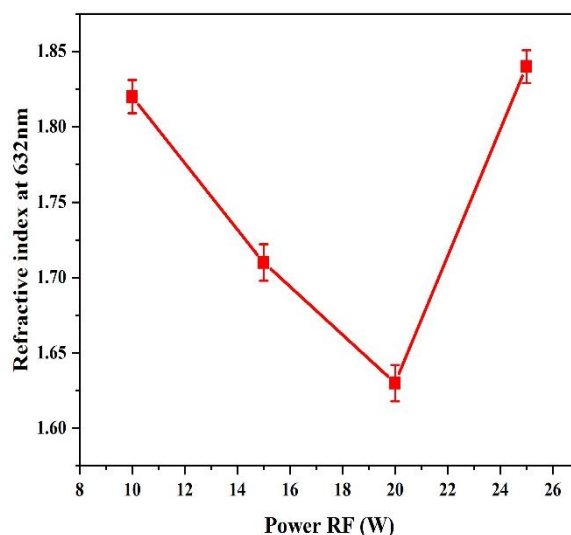
$$(\alpha hv)^{\frac{1}{2}} = A(hv - E_g) \quad (2)$$

در این معادله،  $\alpha$  ضریب جذب،  $A$  یک مقدار ثابت و  $hv$  انرژی فوتون است. شکل ۷ الگویی از معادله تائوک را برای شکاف نواری غیر مستقیم لایه‌های Cu-DLC نشان می‌دهد. شکاف نوار انرژی لایه‌ها با استفاده از روش برون‌یابی از قسمت خطی  $(\alpha hv)^{1/2}$  و همچنین تابعی از انرژی فوتون محاسبه و اندازه‌گیری شده است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود شکاف نوار انرژی لایه‌های ایجاد شده با افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی به علت افزایش ذرات فلزی مس در لایه‌ها کاهش می‌یابد [۱۲].



پارامترهای اصلی و اساسی که در ضریب شکست لایه‌ها مؤثر است، چگالی و ساختار لایه‌ها بیشترین تأثیر را از خود نشان می‌دهند [۳].

روند کاهشی در ضریب شکست لایه‌ها بیان کننده روند کاهشی در چگالی لایه‌های ایجاد شده است. خواص نوری لایه‌های ترکیبی Cu-DLC به طور مستقیم به ترکیب فاز لایه بستگی دارد. فاز لایه‌های کربنی با استفاده از نسبت  $SP^3/SP^2$  و مقدار ماده اضافه شده به مخلوط کربن شبه‌الماسی و پارامترهای رسوبی (اندازه، مقدار و ترکیب خوشه‌های  $SP^2$ ) کنترل می‌شود. همچنین باید به این نکته اشاره کرد که تغییر خواص نوری لایه‌های کربنی به خواص مکانیکی این نوع از لایه‌ها وابسته است [۲۷]. وجود پیوندهای  $SP^3$  منجر به ایجاد لایه‌های DLC متراکم و سخت‌تر می‌شود که ضریب شکست لایه‌ها را افزایش می‌دهد [۳]. در این تحقیق، همانطور که از تحلیل رامان مشخص شده است  $I_D/I_G$  روند افزایشی دارد که سبب کاهش ساختار  $SP^3$  در لایه‌ها شده و تعداد پیوندهای  $SP^2$  در حال افزایش است که منجر به کاهش ضریب شکست لایه‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده است. بینگ ژو و همکاران نشان داده‌اند که با افزایش نسبت  $I_D/I_G$  در لایه‌ها ضریب شکست آنها نیز کاهش خواهد یافت؛ زیرا همانطور که گفته شد ضریب شکست لایه‌ها با ساختار  $SP^3$  در لایه‌ها رابطه مستقیم دارد و با کاهش این ساختارها ضریب شکست کاهش خواهد یافت که این نیز با تغییرات ضریب شکست در این تحقیق همخوانی دارد [۱۲]. اما برای نمونه R25 ضریب شکست با افزایش توان به یکباره روندی معکوس با حالت های قبل داشته و افزایش یافته است. این افزایش می‌تواند به دلیل افزایش بسیار زیاد ذرات مس در لایه‌ها بوده باشد. این افزایش سبب شده است که بیشتر حجم لایه را ذرات مس تشکیل دهند. چگالی ذرات مس ( $8/96 \text{ g/cm}^3$ ) بیشتر از گرافیت ( $2/23 \text{ g/cm}^3$ ) است. پس چگالی لایه‌ها با افزایش ذرات مس در نمونه‌ها افزایش خواهد یافت. این افزایش سبب افزایش در ضریب شکست لایه خواهد شد. با تحلیل‌های

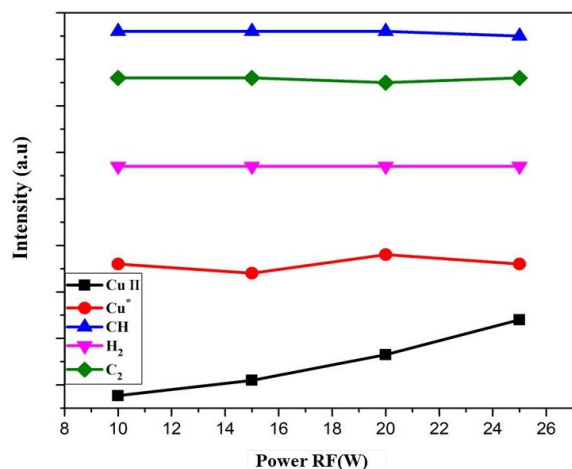


شکل ۸. ضریب شکست لایه‌های Cu-DLC ایجاد شده بر حسب تغییر توان بسامد رادیویی در طول موج ۶۳۲ nm.

در این پژوهش همخوانی دارد. خان و همکاران نشان داده‌اند که افزایش غلظت ذرات مس در لایه‌ها سبب کاهش شکاف نواری آنها خواهد شد. در این پژوهش نیز مشخص شده است که با افزایش غلظت ذرات مس در لایه‌ها، شکاف نواری و شکاف  $E_{04}$  لایه‌ها نیز کاهش یافته است [۲۶].

### ۳.۳. بررسی ضریب شکست لایه‌ها

ضریب شکست لایه‌های کربن شبه‌الماسی یکی از پارامترهای مهم برای کاربردهای نوری این نوع از لایه‌ها است [۱۲]. ضریب شکست لایه‌های ایجاد شده در این تحقیق با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی بیضی‌سنجی مورد مطالعه قرار گرفت. ضریب شکست لایه‌ها بر حسب تغییر توان منبع تغذیه بسامد رادیویی در طول موج ۶۳۲nm در شکل ۸ نشان داده شد. ضریب شکست لایه‌های ایجاد شده با توجه به افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی بر خلاف تصور روند ثابتی را نشان نمی‌دهد، بلکه در ابتدا با افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی تا توان ۲۰W روند کاهشی داشته و از ۱/۸۲ به ۱/۶۳ رسیده و از توان ۲۰W تا به توان ۲۵W روند افزایشی پیدا می‌کند و از ۱/۶۳ به ۱/۸۴ رسیده است. در بین

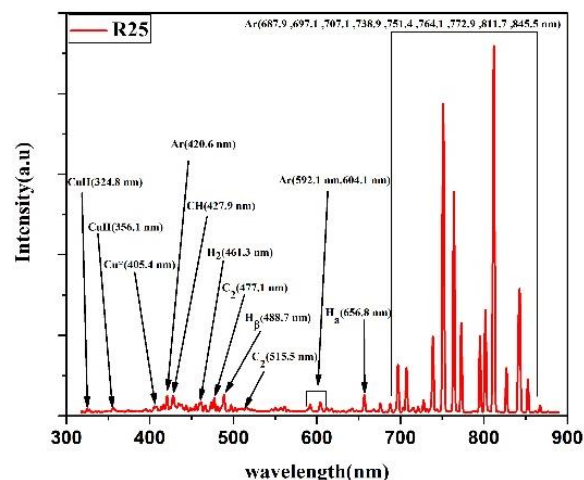


شکل ۱۰. نمودار روند تغییرات گونه‌های شیمیایی اصلی در پلاسمای ایجاد شده در توان‌های مختلف منبع تغذیه بسامد رادیویی.

مشاهده شده‌اند و گونه‌های هیدروژن در طول موج‌های ۴۶۱/۳، ۴۸۸/۷، ۶۵۶/۸ nm همچنین گونه‌های فعال کربن قله‌هایی در طول موج‌های ۴۷۷/۱، ۵۱۵/۵ nm دارند. گونه‌هایی مانند CH که شامل ترکیب کربن و هیدروژن (هیدروکربن) هستند در طول موج ۴۲۷/۹ nm مشاهده شده‌اند و همچنین قله‌های گسترده‌ای از طیف آرگون که در نمودار طیف‌سنجی شکل ۸ نشان داده شده است بیان‌کننده گونه غالب در محیط پلازما است [۲ - ۲۹].

نمودار روند تغییرات نمونه‌های اصلی در این تحقیق که شامل گونه‌های فعال شیمیایی Cu و C است در شکل ۱۰ نشان داده شده است. تحلیل طیف‌سنجی نشر نوری از شرایط کاری متفاوت نشان می‌دهد که با افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی و ثابت بودن منبع تغذیه جریان مستقیم شدت قله‌های طیف‌سنجی نشری جذبی گونه‌ها تغییر می‌یابند. این شدت برای گونه‌های شامل Cu روند افزایشی و برای گونه‌های شیمیایی کربنی روند تقریباً ثابتی دارند، که نشان از کاهش غلظت ذرات کربن نسبت به ذرات مس در لایه‌های ایجاد شده است و با داده‌های حاصل از بررسی خواص نوری و ساختاری لایه‌های ایجاد شده همخوانی دارد.

خدادای و همکاران [۲] و همچنین جو چین پو و همکاران [۳۰]



شکل ۹. طیف‌سنجی نشری جذبی از پلاسمای ایجاد شده با ۲۵ W وات منبع تغذیه بسامد رادیویی و ۱۰۰ W منبع تغذیه جریان مستقیم.

طیف‌سنجی نشر نوری، رامان و طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش همخوانی دارد که در واقع افزایش محتوای مس را در توان ۲۵ W نشان می‌دهد.

### ۳.۴. تحلیل عناصر فعال شیمیایی در پلازما

طیف‌سنجی نشر نوری روشی غیر مخرب است که بررسی اتم‌ها، یون‌ها، گونه‌های برانگیخته شیمیایی و مولکول‌های داخل پلازما را فراهم می‌کند. طیف‌سنجی انتشار پلازما به عنوان ابزاری کارآمد برای تشخیص پلازما و همچنین برای نظارت بر گونه‌های شیمیایی موجود در فرایندهای پلازما مورد استفاده در رسوب فیلم‌های نازک شناخته شده است [۲۸]. برای بررسی طیف‌های نشری پلاسمای ایجاد شده در داخل محفظه کندوپاش، فیبر نوری را بر روی پنجره دستگاه گذاشته و طیف تابشی ذخیره می‌شود. در اینجا با استفاده از این تحلیل به پیدا کردن گونه‌های فعال شیمیایی غالب در پلازما پرداخته شده است. در شکل ۹، طیف اتمی انتشار یافته از پلاسمای تشکیل شده در توان ۲۵ W منبع تغذیه بسامد رادیویی و توان ثابت ۱۰۰ W منبع تغذیه جریان مستقیم همزمان نشان داده شده است. همانطور که مشخص شده، گونه‌های شیمیایی فعال مس در طول موج‌های ۴۰۵/۴، ۳۵۶/۱، ۳۲۵/۸ nm

تغییر محسوسی نداشته و در حدود  $3/2-3/3 \text{ G}\Omega$  است. اما با تغییر توان بسامد رادیویی از  $15 \text{ W}$  تا به  $20 \text{ W}$ ، مقدار مقاومت نمونه به یکباره افت شدیدی کرده و به مقدار  $0/2 \text{ G}\Omega$  رسیده که به خاطر افزایش ذرات مس در نمونه و همچنین مطابق تحلیل رامان به دلیل افزایش ساختار  $\text{SP}^2$  در لایه است. با افزایش توان بسامد رادیویی از  $20 \text{ W}$  تا  $25 \text{ W}$ ، تغییر در روند مقاومت لایه‌ها مشاهده شده است. یعنی با افزایش توان بسامد رادیویی، مقدار مقاومت نمونه  $\text{R}25$  افزایش یافته است و به مقدار  $3/3 \text{ G}\Omega$  می‌رسد. این افزایش مقاومت در نمونه  $\text{R}25$  می‌تواند به دلیل افزایش بیش از اندازه ذرات مس در این لایه باشد. همانطور که در بررسی خواص نوری لایه‌ها بخصوص در طیف جذب و طیف‌سنجی بیضی‌سنجی مشخص شد مقدار ذرات مس در لایه‌ها برای نمونه  $\text{R}25$  به حد بسیار بیشتری افزایش یافت. حال این افزایش ناگهانی در مقاومت نمونه  $\text{R}25$  می‌تواند به دلیل اکسیداسیون ناخواسته ذرات مس موجود در لایه‌های سطحی  $\text{Cu-DLC}$  باشد که پس از انجام فرایند لایه‌نشانی و در حین بررسی مقاومت نمونه ایجاد شده است که با تحلیل رامان نمونه  $\text{R}25$  مطابقت دارد. در واقع در بررسی ساختاری نمونه  $\text{R}25$  با استفاده از تحلیل رامان قله اکسید مس در عدد موج  $210 \text{ cm}^{-1}$ ،  $275$ ،  $303$ ،  $380$ ،  $410$ ،  $486$  مشاهده شد در حالی که برای نمونه‌های دیگر همچنین قله‌های مشخصی یافت نشد. برای بررسی مقاومت نمونه‌های لایه‌نشانی شده در دمای بالا، نمونه‌ها در دمای  $120^\circ \text{C}$  ( $393 \text{ K}$ ) قرار داده شده‌اند و سپس منحنی جریان ولتاژ نمونه‌ها به دست آمده است، که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با به دست آوردن شیب این نمودار، میزان رسانندگی نمونه‌ها مشخص می‌شوند. از آنجایی که رسانندگی و مقاومت با هم رابطه معکوس دارند با محاسبه عکس شیب نمودار جریان ولتاژ، مقاومت نمونه‌ها در دمای بالا مشخص می‌شود. اعمال دما سبب افزایش حامل‌های بار در لایه‌ها شده و مقاومت نمونه‌ها را معمولاً کاهش می‌دهد. بدین ترتیب مقدار مقاومت در دمای  $393 \text{ K}$  برای نمونه‌های

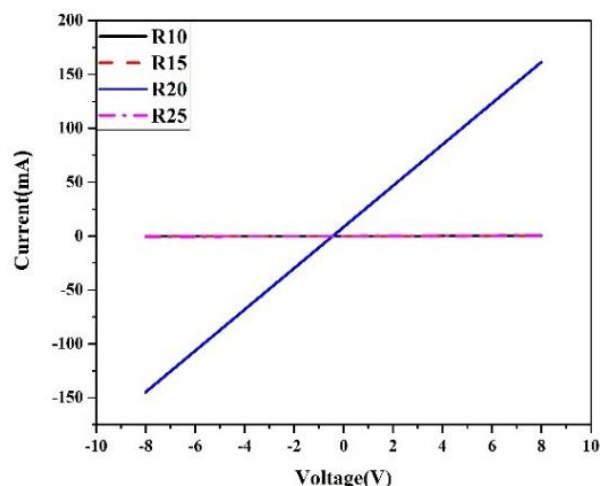
نیز گزارش داده‌اند که افزایش توان منابع تغذیه سبب افزایش یونش در داخل محفظه کندوپاشی شده و  $\text{Ar}^+$  بیشتری در محفظه ایجاد خواهد کرد. افزایش توان هر یک از منابع تغذیه، افزایش بمباران یونی هدف‌ها توسط یون‌های ( $\text{Ar}^+$ ) را به همراه خواهد داشت. این افزایش یون‌های آرگون سبب افزایش کندوپاش از سطح هدف خواهد شد و کندوپاش از سطوح آن بیشتر اتفاق خواهد افتاد و سبب خواهد شد بیشتر محفظه از گونه‌های دارای توان منبع تغذیه بالاتر باشد. به همین دلیل با افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی، گونه‌های مس در محفظه و در سطح لایه‌ها نیز افزایش یافته که با این تحقیق نیز همخوانی دارد. همچنین در بررسی تحلیل‌های رامان و مرئی-فرابنفش نیز افزایش ذرات مس در لایه‌ها نیز مشخص شد [۳ و ۳۰].

### ۳.۵. بررسی خواص الکتریکی لایه‌ها با استفاده از منحنی

#### I-V

برای اندازه‌گیری مقاومت ابتدا پوشینه‌های شانه‌ای شکل از جنس طلا با استفاده از کندوپاش مغناطیسی رومیزی بر روی لایه‌ها پوشش‌دهی شد. سپس دو طرف شانه با چسب کربن به سیم مسی بسیار نازک متصل شد. پس از خشک شدن چسب کربن فرایند تحلیل انجام شد. در لایه‌های کربن شبه‌الماسی، مقاومت لایه‌ها وابسته به نسبت  $\text{SP}^2/\text{SP}^3$  است. اگر مقدار  $\text{SP}^2$  افزایش پیدا کند مقدار مقاومت در لایه‌های کربن شبه‌الماسی کاهش می‌یابد. حال اگر مقداری فلز به لایه‌های کربن شبه‌الماسی افزوده شود مقاومت نمونه‌ها در حد چند واحد کاهش خواهد یافت [۱۲]. مقاومت نمونه‌ها در دو حالت دمای اتاق و دمای  $393 \text{ K}$  با استفاده از شیب نمودار I-V به دست آمده است، که مقاومت سطحی با مقاومت به دست آمده از شیب نمودار I-V به وسیله یک ضریب ثابت  $(2\pi/Ln)$  به هم مرتبط است [۲۶]. با افزایش مقدار غلظت ذرات مس در نمونه‌ها انتظار می‌رود که مقاومت لایه‌ها کاهش پیدا کند. بدین ترتیب در دمای اتاق، مقاومت برای نمونه‌های  $\text{R}10$  و  $\text{R}15$ ، با افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی از  $10 \text{ W}$  تا به  $15 \text{ W}$

به هدف مس لایه نشانی شده است. بررسی طیف سنجی رامان با افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی برای نسبت  $I_D/I_G$  و همچنین موقعیت قله  $G$  روند افزایشی نشان داد. روند افزایشی  $I_D/I_G$  سبب ایجاد روند کاهش پیوندهای شیمیایی  $SP^3/SP^2$  در ساختار لایه ها شد و نمونه ها به سمت گرافیتی شدن میل کردند. طیف سنجی نشر نوری نشان داد با افزایش توان منبع بسامد رادیویی تعداد عناصر فعال شیمیایی مس نسبت به عناصر شیمیایی فعال کربن داخل پلازما تا حدودی افزایش می یابد. همچنین ضریب شکست ( $n$ ) لایه های ایجاد شده یک روند ثابتی را طی نمی کنند.  $n$  در ابتدا کاهش و سپس روند افزایشی دارد که در ابتدا به دلیل افزایش محتوای  $SP^2$  در ساختار لایه ها کاهش یافته و سپس به دلیل افزایش ذرات مس در لایه ها و افزایش چگالی لایه ها، روند تغییرات ضریب شکست تغییر یافته و افزایش می یابد. در واقع در ابتدا با افزایش توان تا  $20W$  روند کاهش از  $1/82$  تا  $1/63$  رسیده و با افزایش توان تا  $25W$  به مقدار  $1/84$  در طیف طول موجی  $nm$   $623/8$  اندازه گیری شده است. همچنین مقدار مقاومت نمونه ها با توجه به افزایش محتوای ذرات مس بر روی لایه ها روند ثابتی نداشته و در ابتدا روند کاهش و سپس روند افزایشی داشته است. این عدم یکنواختی در روند تغییر مقاومت نمونه ها به دلیل اکسیداسیون سطحی ذرات مس در لایه ها بوده است. شکاف نوار انرژی لایه ها از  $1/53$  تا  $0/79eV$  کاهش یافته است و همچنین  $E_{04}$  از  $2/30$  تا  $1/21eV$  کاهش می یابد. این روند کاهش در شکاف انرژی لایه ها به علت افزایش محتوای ذرات مس در لایه ها است. همچنین نتایج نشان می دهد که با افزایش توان منبع تغذیه بسامد رادیویی مقدار محتوای  $SP^2$  در حجم لایه های ایجاد شده افزایش می یابد و سبب کاهش در شکاف انرژی نمونه ها می شود [۲].



شکل ۱۱. نمودار ولتاژ جریان (I-V) برای نمونه های لایه نشانی شده در دمای  $120^{\circ}C$  ( $393K$ ).

R10 و R15 به ترتیب به میزان  $150$  و  $185 M\Omega$  است. همچنین همانند حالت دمای اتاق، مقاومت نمونه  $R20$  به مقدار بسیار کم  $85/2 K\Omega$  رسیده است. نمونه  $R25$  نیز رفتاری مشابه حالت دمای اتاق داشته و مقاومت آن روندی صعودی داشته و به مقدار  $25/39 M\Omega$  رسیده است. افزودن مس به لایه های کربن شبه الماسی، این نوع از لایه ها را برای کاربردهای فتوولتائیک صنعتی مناسب می کند. از دیگر عامل ها برای کاهش مقاومت این لایه ها، افزایش میزان خوشه های فلزی مس تا حد معمول در لایه ها است [۳۱]. ام. ای. خان و همکاران نشان داده اند که با افزایش غلظت ذرات مس در لایه ها نیز مقاومت نمونه ها کاهش پیدا خواهد کرد؛ زیرا مس ماده ای رسانا بوده و با افزایش غلظت آن در لایه ها مقاومت آنها را کاهش خواهد داد که با این تحقیق نیز مطابقت دارد [۲۶].

#### ۴. نتیجه گیری

لایه های نازک کربن شبه الماسی با ناخالصی فلزی ذرات مس به وسیله روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و بسامد رادیویی همزمان با تغییر توان منبع تغذیه بسامد رادیویی متصل

## مراجع

1. L Patnaik, S R Maity, and S Kumar, *Ceram. Int* **46** (2020) 22805.
2. S K Najaf Abadi, et al., *Mater. Chem. Phys.* **229** (2019) 8.
3. N Dwivedi, et al., *J. Phys. and Chem. of Solids* **73** (2012) 308.
4. R Z Moghadam, et al., *Mater. Lett.* **220** (2018) 301.
5. D He, et al., *Appl. Surf. Sci.* **525** (2020) 146581.
6. S Gayathri, et al., *Ceram. Int.* **41** (2015) 1797.
7. A A Ahmad, *J. Mater. Sci. Mater. Electron* **28** (2017) 1695.
8. S Flege, et al., *Adv. Mater. Sci. Eng.* **1**(2017) 8.
9. M Grischke, et al., *Surf. Coat. Technol.* **74** (1995) 739.
10. R Paul, R Bhar, and A K Pal., *Mater. Res. Bull.* **45** (2010) 576.
11. L Sun, et al., *Thin Solid Films* **678** (2019) 16.
12. B Zhou, et al., *Diam. Relat. Mater.* **69** (2016) **191**.
13. M Abbasi Firouzjah, B Shukri, and H Mahmoudi., *Surf. J.* **43** (1399) 21 (persion).
14. A Jurkevičiūtė, et al., *Thin Solid Films* **630** (2017) 47.
15. J Q Liu, et al., *Surf. Coat. Technol.* **365** (2019) 33.
16. S Meškinis, et al., *Thin Solid Films* **673** (2019)1.
17. A Sahai, et al., *Appl. Surf. Sci.* **390** (2016) 974.
18. S Dolai, et al., *J. Alloys Compd.* **724** (2017) 456.
19. J Robertson., *Mater. Sci. Eng. R Rep.* **37** (2002) 129.
20. E Mohaghehpour, et al., *Appl. Surf. Sci.* **360** (2016) 52.
21. S Khamseh, et al., *Surf. Coat. Technol.* **333** (2018) 148.
22. S Meškinis, et al., *Thin Solid Films* **581** (2015) 48.
23. C Oppedisano and A Tagliaferro, *Appl. Phys. Lett.* **75** (1999) 3650.
24. I Yaremchuk, et al., *Diam. Relat. Mater.* **99** (2019) 1.
25. S Tamulevičius, et al., *Rep. Prog. Phys.* **81** (2018) 1.
26. M I Khan, et al., *Mater. Res. Express* **6** (2019) 20.
27. M Pandey, et al., *Surf. Coat. Technol.* **182** (2004) 24.
28. N A Sánchez, et al., *Thin Solid Films* **373** (2000) 247.
29. F Sohbatzadeh, et al., *Superlattices Microstruct.* **89** (2016) 231.
30. J C Pu, et al., *Thin Solid Films* **519** (2010) 521.
31. M I Khan and M Sabir, *Mater. Res. Express* **6** (2019)1.