

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

علیرضا میخ چین و سید ایمان حسینی\*

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

\*پست الکترونیکی: [imanhosseini@shahroodut.ac.ir](mailto:imanhosseini@shahroodut.ac.ir)

## 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 فرکانس رادیویی همزمان سنتز شده‌اند و رابطه آنها با عناصر فعال شیمیایی تولید شده در پلاسما مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی بر روند تغییرات ساختاری، الکتریکی و نوری لایه‌ها مطالعه شد. طیف‌سنجی رامان نشان می‌دهد در ساختار پیوندی مکان قله  $G$  از  $1584$  تا  $1590$   $(cm^{-1})$  و نسبت  $I_D/I_G$  از  $0.85$  تا  $2.22$  افزایش می‌یابد که بیان‌کننده کاهش ساختار شیمیایی  $SP^3$  نسبت به  $SP^2$  می‌باشد. به منظور بررسی گونه‌های فعال شیمیایی غالب در محیط پلاسما طیف‌سنجی نشری نوری (OES) انجام شد. با افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی شدت قله‌های گونه‌های فعال  $Cu$  در محیط پلاسمایی تا حدودی افزایش یافته و گونه‌های فعال کربنی بطور نسبی ثابت بوده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی از  $10$  تا  $25W$  و ثابت نگه داشتن توان منبع تغذیه جریان مستقیم در توان  $100W$  ضریب جذب نوری لایه‌ها روند کاهشی داشته است. شکاف نوار انرژی لایه‌ها با استفاده از روش برون‌یابی معادله تائوک بدست آمده است با روندی کاهشی از  $1.53 eV$  به  $0.79 eV$  رسیده است. ضریب شکست لایه‌های با استفاده از روش بیضی‌سنجی مورد آنالیز قرار گرفته است. مقاومت نمونه‌ها با افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی روند ثابت و یکسانی را طی نکرده و در ابتدا روندی کاهشی و سپس بدلیل تغییر در غلظت ذرات مس در نمونه‌ها افزایش یافته است.

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

## ۱. مقدمه

وجهی از پیوند اتم‌های کربن، به ساختار الماس گونه مشهور است. ساختار  $SP^2$  با ساختاری سه وجهی از پیوند اتم‌های کربن، به ساختار گرافیت گونه شهرت دارد [۲]. پیوندهای محکم  $SP^3$  تعیین‌کننده خواص فیزیکی و مکانیکی مانند سختی این دست

پوشش‌های کربنی شبه‌الماسی DLC<sup>۱</sup> شکل‌آمورفی از ساختار کربن هستند که ویژگی‌های آن به پیوندهای اتمی کربن-کربن و با نسبت ساختار  $SP^3/SP^2$  وابسته می‌باشد [۱].  $SP^3$  با ساختار چهار

۱. Diamond-like carbon

از لایه‌های کربنی بوده، در حالی که ویژگی الکترونیکی و نوری این مواد بیشتر مربوط به پیوندهای  $SP^2$  می‌باشد. در واقع نسبت  $SP^3/SP^2$  تعیین کننده خواص لایه‌های کربن شبه الماسی می‌باشد [۳]. لایه‌های کربن شبه الماسی به دلیل خواص الکتریکی، مکانیکی، شیمیایی و سطحی منحصر به فرد دارای ویژگی‌های کاربردی و مناسبی همچون سختی بالا، واکنش پذیری شیمیایی پایین، ضریب اصطکاک کم ( $>0/1$ )، مقاومت سایشی بالا، شفافیت نوری مناسب، چسبندگی مناسب با سطوح، عدم پاسخ مغناطیسی و آبگریزی می‌باشد. از این نوع لایه‌ها عمدتاً به عنوان پوشش‌های محافظ مانند پنجره‌های نوری، دستگاه‌های ذخیره‌سازی مغناطیسی و نوری، پوشش‌های نجسب و محافظ سلول‌های خورشیدی، 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 چابوت انجام شد. با درک فرآیند رشد و خواص این نوع از لایه‌ها، گسترش یافت. علیرغم این واقعیت که لایه‌های کربن شبه الماسی 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 شبه الماسی تلقیح شده یا آلیاژی یک دسته مهمی از ساختار کربن شبه الماسی 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 شبه الماسی باعث افزایش چسبندگی به زیرلایه، افزایش مقاومت به سایش و روانکاری می‌شود. همچنین ویژگی‌های نوری و الکترونیکی این لایه‌ها برای کاربردهای

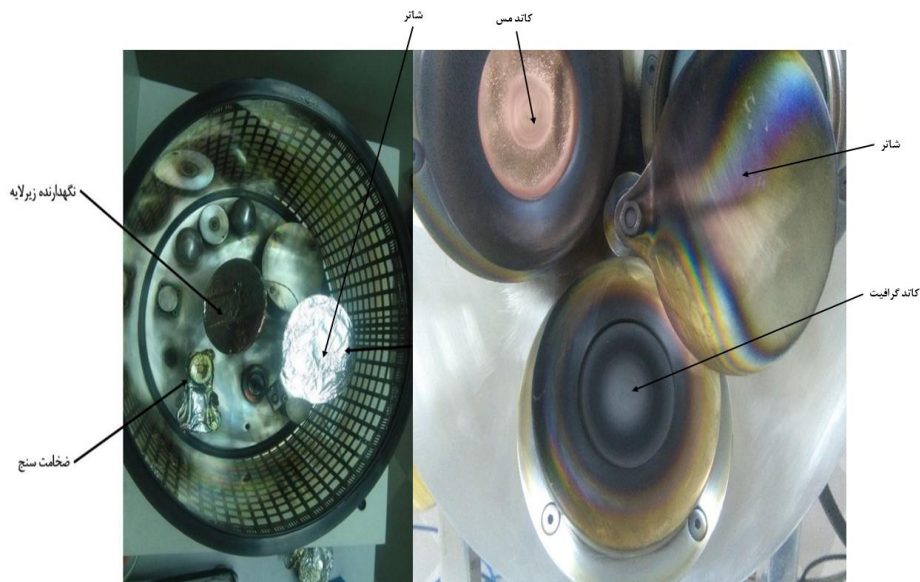
فتوولتایک ( $PV^1$ )، سلول‌های خورشیدی [۷] و اصلاح شکاف نوار انرژی در محدوده وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸]. تلقیح‌های فلزی به دو سته کلی کاربردی و غیر کاربردی تقسیم بندی می‌شود. به تلقیح‌های فلزی که با کربن ساختار مستحکم کاربید تشکیل می‌دهند مانند W، Ti، V و ... تلقیح کاربردی گفته می‌شود. به تلقیح‌هایی که سبب ایجاد کاربید در ساختار کربنی نمی‌شوند مانند Au، Ag، Cu و ... تلقیح غیر کاربردی گفته می‌شوند [۷] و [۹-۱۱]. خصوصیات نوری لایه‌های کربن شبه الماسی به شدت به تغییر ساختار آنها مرتبط است. به وسیله روش‌های رسوبی (لایه‌نشانی) و فرآیندهای آماده سازی لایه تعیین می‌شود. اخیراً این خصوصیات نوری و مکانیکی لایه‌های کربن شبه الماسی 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 آنتی باکتریایی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴]. امروزه از روش‌های گوناگونی برای لایه‌نشانی لایه‌های کربن شبه الماسی برای مقاصد مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش‌ها عبارتند از رسوب لیزر پالسی ( $PLD^2$ )، بخار شیمیایی ( $CVD^3$ )، بخار شیمیایی به کمک پلاسما ( $PECVD^4$ )، کندوپاش مغناطیسی [۱۵]. در این بین روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و فرکانس رادیویی، به دلیل رسوب آسان لایه‌های کربن شبه الماسی با ناخالصی‌های مختلف فلزی و امکان رسوب لایه‌هایی با ابعاد بزرگ، سادگی عملکرد و هزینه‌ی تولید کمتر نسبت به روش‌های دیگر، مقرون به صرفه و مناسب برای کاربردهای صنعتی می‌باشد [۲-۱۶]. در این پژوهش لایه‌های

۱. Photovoltaic

۲. Plasma laser deposition

۳. Chemical vapor deposition

۴. Plasma chemical vapor deposition



شکل ۱. نمایی از محفظه لایه‌نشانی که شامل نگهدارنده، شاکتر و همچنین ضخامت سنج می‌باشد.

مشخص کردن گونه‌های فعال شیمیایی غالب در محیط پلاسما استفاده گردید. همچنین ساختار پیوندهای شیمیایی لایه‌های سنتز شده با استفاده از آنالیز طیف‌سنجی رامان مورد مطالعه قرار گرفت. خواص نوری، ساختاری و مورفولوژی لایه‌ها که با تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و ثلثت نگه داشتن توان منبع تغذیه جریان مستقیم ایجاد شده بودند مورد بررسی قرار گرفت. ضریب شکست لایه‌ها بوسیله طیف‌سنجی بیضی‌سنجی اندازه‌گیری شد. در این تحقیق نتایج نشان می‌دهد تغییر توان منبع تغذیه فرکانس 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 فرکانس رادیویی با هدف مس به‌طور همزمان لایه‌نشانی گردید که تصویر داخلی دستگاه در شکل ۱ نشان داده شد.

Cu-DLC به وسیله روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم با کاتد گرافیتی و فرکانس رادیویی با هدف مس بطور همزمان لایه‌نشانی شدند. در سال‌های اخیر برای لایه‌نشانی لایه‌های DLC از گازهای هیدروکربنی مختلف مانند متان یا استیلن به عنوان چشمه‌های کربن در روش کندوپاش استفاده شده است. در حالی که در این تحقیق بر خلاف روش‌های مرسوم از دو هدف جامد که یکی گرافیت و متصل به ولتاژ مستقیم و دیگری مس متصل به ولتاژ RF استفاده شده است. استفاده از هدف جامد گرافیت بعنوان 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 می‌گردد. همچنین استفاده از ولتاژ RF برای کند و پاش مس باعث تولید پلاسما 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 پلاسما 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>1</sup>) برای

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

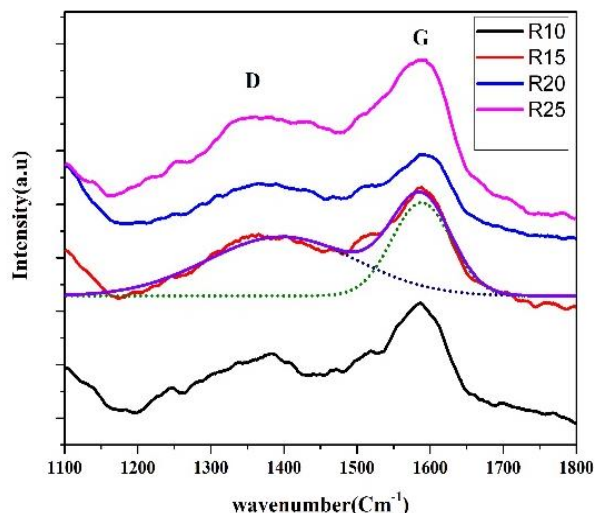
ساخت لایه‌ها در ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵W قرار گرفتند. همچنین برای ساخت همه لایه‌های Cu-DLC از ولتاژ بایاس به مقدار ۱۰۰V- مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای لایه‌نشانی برای تولید لایه‌های با ضخامت یکسان در جدول (۱) آمده است. لایه‌ها با استفاده از دستگاه کندوپاش سه کاتد مدل DST2-T شرکت پوشش‌های نانو ساختار ایجاد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

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

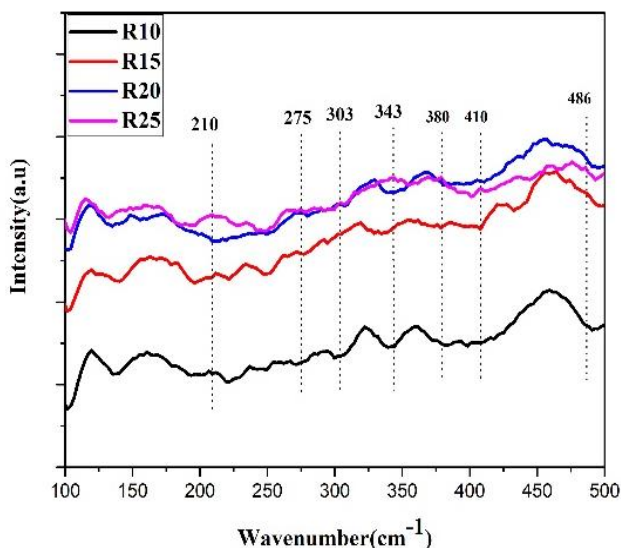
هدف گرافیت با قطر ۵۰/۸ mm و ضخامت ۶ mm با خلوص ۹۹/۹۹ درصد و همچنین هدف مس با قطر ۵۰/۸ mm و ضخامت ۱ mm و خلوص ۹۹.۹۹٪ مورد استفاده قرار گرفتند. از گاز آرگون با خلوص ۹۹.۹۹٪ به عنوان گاز کندوپاش در همه لایه‌ها استفاده شده است. قبل از شروع فرآیند لایه‌نشانی زیرلایه‌های شیشه‌ای ابتدا با آب و صابون و سپس در محلول اتانول و استون در حمام التراسونیک در دمای ۵۰ °C به مدت ۳۰ دقیقه شستشو داده شده‌اند و سپس با باد سرد خشک گردیدند. 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 بوسیله پمپ‌های روتاری و توربو مولکولار به  $10^{-5}$  torr رسیده. تا سبب پاک‌سازی محفظه از هوا و دیگر مواد ناخالص گردد. سپس فشار کاری دستگاه برای روشن شدن پلاسما و شروع فرآیند لایه‌نشانی در  $10^{-2}$  torr قرار گرفت. منبع تغذیه جریان مستقیم به هدف گرافیت و منبع تغذیه فرکانس رادیویی به هدف مس متصل شد تا با استفاده از هردو هدف برای فرآیند لایه‌نشانی به روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان استفاده شود. در اینجا برای ساخت لایه‌های Cu-DLC از توان هدف مس به عنوان پارامتر متغیر مورد استفاده قرار گرفت. توان منبع تغذیه جریان مستقیم همواره در تمام لایه‌های ساخته شده ۱۰۰W بطور ثابت قرار داده شد ولی توان هدف مس برای

۱. Ultraviolet-visible spectroscopy

۲. Ellipsometry



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



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

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

آنالیز رامان نمونه‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده علاوه بر پراکندگی در بازه عدد موج  $100-500\text{ cm}^{-1}$  شامل قله‌های اصلی و شانهای پهن در دامنه عدد موجی بین  $1200-1800\text{ cm}^{-1}$  می‌باشد. قله اصلی در  $1500-1600\text{ cm}^{-1}$  به عنوان قله G شناخته می‌شود که مربوط به مد ارتعاش کششی از پیوندهای شیمیایی  $\text{SP}^2$  کربن است و شانهای پهن در  $1200-1400\text{ cm}^{-1}$  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 کردن طیف رامان نمونه‌های لایه‌نشانی شده با چند تابع گوسی طیف بدست 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 نمود. در طیف‌سنجی رامان موقعیت قله G و نسبت

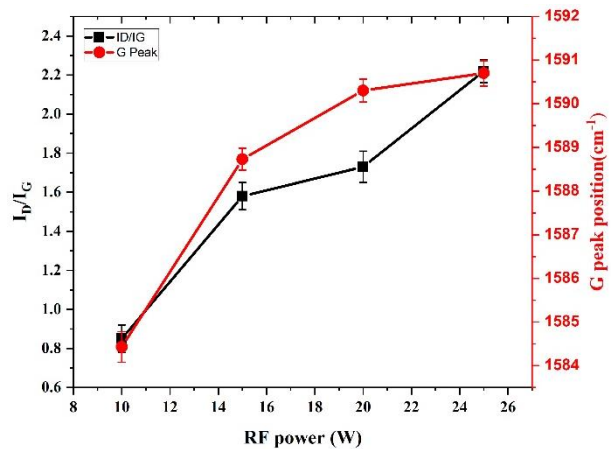
### ۳. نتایج و بحث

#### ۳.۱. بررسی آنالیز طیف‌سنجی رامان

برای بررسی ساختار شیمیایی لایه‌های رشد یافته تحت تغییر توان منبع تغذیه رادیو فرکانسی از W ۱۰ تا ۲۵ از آنالیز رامان استفاده گردید. در شکل ۲ طیف‌های آنالیز رامان لایه‌ها در بازه عدد موجی  $100-500\text{ cm}^{-1}$  نشان داده شده است. در بررسی آنالیز رامان در این بازه تنها برای نمونه‌های R25 قله‌های بسیار کوتاه و پهن در عدد موج‌های  $210, 275, 303, 343, 380, 410, 486\text{ cm}^{-1}$  مشاهده شده است. این قله‌های پهن و کوتاه در نزدیکی محدوده طول موجی اکسید مس حضور دارند. در واقع می‌تواند نشان دهنده حضور اکسیدهای مس بر روی سطح لایه‌ها باشند [۱۷-۱۸]. با توجه به اینکه فلز مس جزء آن دسته از فلزات می‌باشد که به سرعت اکسید می‌شود. افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی سبب افزایش ذرات مس در سطح و ساختار نمونه R25 گردید. حضور قله‌های اکسید مس می‌تواند بدلیل 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 ثلثت بودن منبع تغذیه جریان مستقیم بوده است که با افزایش غلظت نانو ذرات مس مانع ایجاد ساختار  $SP^3-C$  در لایه‌ها  $Cu-DLC$  شده است. به علت افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی محتوای ذرات مس در لایه‌ها افزایش یافته است و سبب شده است که پیوندهای کربنی به سمت گرافیتی شدن میل نمایند. با افزایش موقعیت قله‌های  $G$ ، نسبت  $I_D/I_G$  نیز افزایش یافته که نشان می‌دهد که محتوای  $SP^2$  در لایه‌ها افزایش یافته است [۱۹-۲۰]. با توجه به روند افزایشی موقعیت  $G$  و افزایش نسبت  $I_D/I_G$  برای لایه‌های ایجاد شده در این تحقیق و همچنین با توجه به کاهش اندازه نانو ذرات گرافیتی و حفظ حلقه‌های معطر نتیجه می‌گیریم که در این لایه‌ها با افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی از  $10$  تا  $25$  W تعداد پیوندهای  $SP^2$  کربن-کربن روند افزایشی داشته است. خمسه 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 افزایش یافته است با نتایج ما مطابقت دارد. افزایش غلظت ذرات مس سبب کاهش ساختارهای کربن شبه الماسی در لایه‌ها شده است پس انتظار می‌رود با افزایش غلظت ذرات مس محتوای  $SP^2-C$  در لایه‌ها تشکیل شده نیز افزایش یابد. در این تحقیق با افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی غلظت ذرات مس افزایش یافته و سبب شده است تا نسبت  $I_D/I_G$  و موقعیت قله  $G$  نیز در لایه‌ها افزایش یابد و سبب افزایش  $SP^2-C$  شود. با توجه به اینکه خواص نوری و الکترونیکی لایه‌های کربن شبه الماسی 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 داشته باشند



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

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

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  $G$  می‌باشد 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 می‌باشد [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. 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

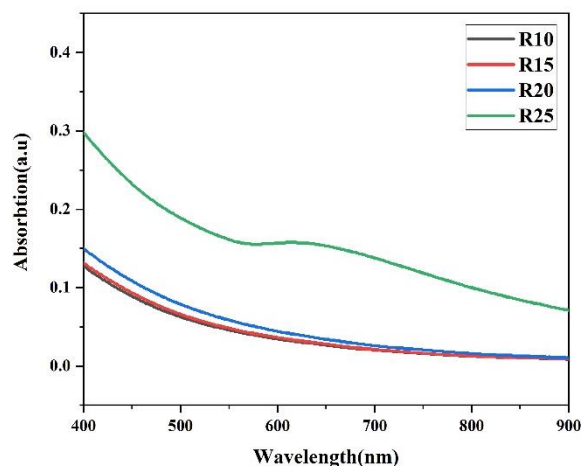
۵ مشاهده می‌شود

برای لایه‌های R10 و R15 طیف جذب چندان تغییری نداشته است و تقریباً طیف‌ها بر روی هم منطبق می‌باشند. نشان می‌دهد با افزایش توان منبع تغذیه فرکانس 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 گردد. با افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی از ۱۵ تا به ۲۵ طیف جذب لایه‌ها بطور واضح تغییراتی نشان می‌دهد که نشان از افزایش ذرات مس در لایه‌های Cu-DLC ساخته شده می‌باشد. زیرا با ثابت بودن منبع تغذیه جریان مستقیم مقدار کربن کندوپاش شده در لایه‌ها همواره ثابت بوده است که با آنالیز رامان بدست آمده از لایه‌ها مطابقت دارد. حال به بررسی خواص نوری لایه‌های ایجاد شده پرداخته می‌شود که در اینجا شکاف نواری غیر مستقیم لایه‌ها  $E_g$  و شکاف نواری  $E_{04}$  از طریق داده‌های بدست آمده بوسیله آنالیز طیف سنجی مرئی-فرابنفش محاسبه می‌گردند [۳]. ضریب جذب لایه‌های ایجاد شده با استفاده از معادله زیر بدست خواهد آمد [۲۵].

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

در این معادله  $\alpha$  ضریب جذب و  $d$  ضخامت لایه‌ها هستند که همگی لایه‌ها به ضخامت  $100\text{ nm}$  لایه‌نشانی شده اند. همچنین  $T$  طیف عبور را نشان می‌دهد. ضریب جذب لایه‌ها و مقدار شکاف نواری  $E_{04}$  آنها در شکل ۶ نشان داده شده است.  $E_{04}$  شکاف نواری است که ضریب جذب مقدار  $10^4\text{ Cm}^{-1}$  را داشته باشد [۳].

همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم شکاف نواری  $E_{04}$  روند کاهشی داشته است که از مقدار  $2/30\text{ eV}$  تا میزان  $1/21\text{ eV}$  کاهش یافته است. با کاهش شکاف نواری  $E_{04}$  نشان می‌دهد میزان  $SP^2$  نیز در لایه‌ها روند



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

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 فرکانس رادیویی طیف‌های عبوری و جذب نوری لایه‌ها بوسیله دستگاه Uv-vis اندازه‌گیری شده‌اند، نتایج این اندازه‌گیری در شکل ۵ نشان داده شد. در بررسی طیف جذب لایه‌های Cu-DLC که با افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی ایجاد شده است قله‌های واضح و تیزی که نشان از حضور تشدید<sup>۱</sup> ذرات مس باشد مشاهده نشده است. و 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<sup>۲</sup> [۲۴]. بیشترین پهنای قله پلاسمونیک<sup>۳</sup> در طیف جذب، برای لایه‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده بوسیله کندوپاش مغناطیسی واکنشی و قوس کلتدیک<sup>۴</sup> در دامنه طول موجی  $540-750\text{ nm}$  دیده شده است [۲۵]. همانطور که در شکل

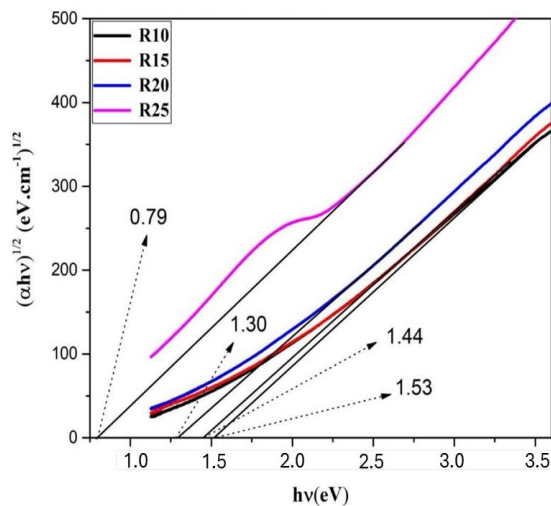
۱. Resonance

۲. Surface plasmon resonance

۳. Plasmonic

۴. Cathodic arc

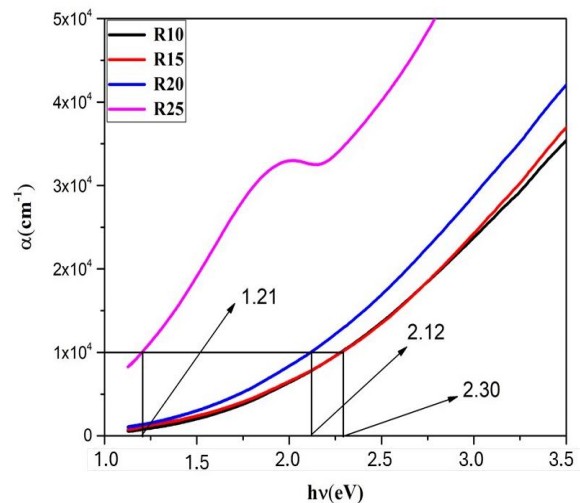
شده است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود شکاف نوار



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

انرژی لایه‌های ایجاد شده با افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی به علت افزایش ذرات فلزی مس در لایه‌ها کاهش می‌یابد [۱۲].

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 کاهش می‌یابند. همچنین اثر افزایش مقدار ذرات مس در نمودار رامان نمونه‌ها مشخص می‌باشد که با افزایش مقدار مس محتوای  $SP^2$  افزایش یافته و سبب افزایش  $I_D/I_G$  در نمونه‌ها شده که با روند کاهش شکاف نوار همخوانی دارد. بالاترین شکاف نوار انرژی مربوط به نمونه R10 با مقدار  $1/53 eV$  بوده است با افزایش توان فرکانس رادیویی و بالتبع افزایش ذرات مس شکاف نوار نمونه‌ها به تدریج کاهش یافته است. برای نمونه‌های R20-R15 و R25، مقدار شکاف نوار انرژی لایه‌های سنتز شده به ترتیب  $1/44$ ،



شکل ۶. ضریب جذب و شکاف نوری  $E_{04}$  لایه‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده به روش کندوپاش مغناطیسی همزمان و با تغییر توان فرکانس رادیویی.

افزایشی داشته است [۲۳] که این موضوع با نتایج حاصل از آنالیز رامان مطابقت دارد. زیرا با افزایش ذرات مس  $I_D/I_G$  لایه‌ها افزایش یافته است که نشان از افزایش محتوای  $SP^2$  در لایه‌ها می‌باشد. با افزایش  $SP^2$  در لایه‌ها انتظار می‌رود شکاف نوری  $E_{04}$  روند کاهش داشته باشد. برای لایه‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده با افزایش توان منبع تغذیه فرکانسی رادیویی این مهم ایجاد شده است.

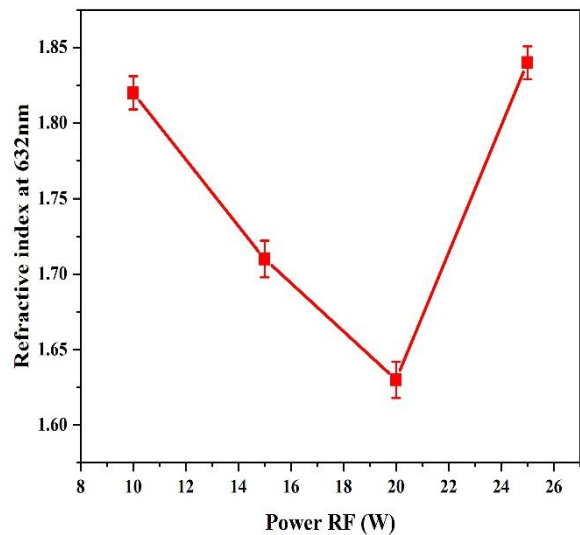
شکاف نوار انرژی لایه‌های Cu-DLC با استفاده از معادله تانوک<sup>۱</sup> محاسبه گردید [۱۲].

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

در این معادله  $\alpha$  ضریب جذب،  $A$  یک مقدار ثابت و  $h\nu$  انرژی فوتون می‌باشد. شکل ۷ الگویی از معادله تانوک را برای شکاف نوار غیر مستقیم لایه‌های Cu-DLC نشان می‌دهد. شکاف نوار انرژی لایه‌ها با استفاده از روش برون‌یابی از قسمت خطی  $(\alpha h\nu)^{1/2}$  و همچنین تابعی از انرژی فوتون محاسبه و اندازه‌گیری



۱/۳۰ و ۰/۷۹eV بدست می‌آید. تغییرات شکاف نواری لایه‌های



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

Cu-DLC که بر اساس غلظت ذرات مس در لایه‌ها توسط ام.ای.خان و همکاران نیز گزارش شده است با نتایج بدست آمده در این پژوهش همخوانی دارد. خان و همکاران نشان داده اند که افزایش غلظت ذرات مس در لایه‌ها سبب کاهش شکاف نواری آنها خواهد شد که در این پژوهش نیز مشخص شده است که با افزایش غلظت ذرات مس در لایه‌ها شکاف نواری و شکاف E<sub>04</sub> لایه‌ها نیز کاهش یافته است [۲۶].

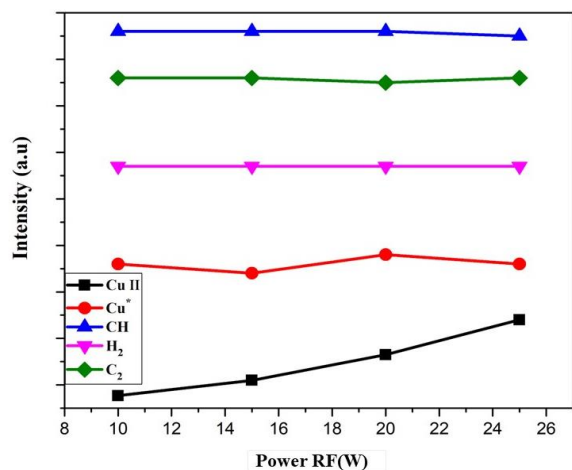
### ۳.۳. بررسی ضریب شکست لایه‌ها

ضریب شکست لایه‌های کربن شبه‌الماسی یکی از پارامترهای مهم برای کاربردهای نوری این نوع از لایه‌ها می‌باشد [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 فرکانس رادیویی در طول موج ۶۳۲nm در شکل ۸ نشان داده شد. ضریب شکست لایه‌های ایجاد شده با توجه به افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی بر خلاف تصور روند ثابتی را نشان نمی‌دهد بلکه در ابتدا با افزایش

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

روند کاهش در ضریب شکست لایه‌ها بیان کننده روند کاهش در چگالی لایه‌های ایجاد شده می‌باشد. خواص نوری لایه‌های کامپوزیتی Cu-DLC بطور مستقیم به ترکیب فاز لایه بستگی دارد. فاز لایه‌های کربنی با استفاده از نسبت SP<sup>3</sup>/SP<sup>2</sup> و مقدار ماده اضافه شده به مخلوط کربن شبه‌الماسی و پارامترهای رسوبی (اندازه، مقدار و ترکیب خوشه‌های SP<sup>2</sup>) 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<sup>3</sup> منجر به ایجاد لایه‌های DLC متراکم و سخت‌تر می‌شود که ضریب شکست لایه‌ها را افزایش می‌دهد [۳]. در این تحقیق همانطور که از آنالیز رامان مشخص شده است I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> روند افزایشی دارند که سبب کاهش ساختار SP<sup>3</sup> در لایه‌ها شده و تعداد پیوندهای SP<sup>2</sup> در حال افزایش می‌باشد که منجر به کاهش ضریب شکست لایه‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده است. بینگ ژو و همکاران نشان داده‌اند که با افزایش نسبت I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> در لایه‌ها ضریب شکست آنها نیز کاهش خواهد یافت زیرا همانطور که گفته شد ضریب شکست لایه‌ها به ساختار SP<sup>3</sup> 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 (۸/۹۶ g/cm<sup>3</sup>) بیشتر از گرافیت (۲/۲۳ g/cm<sup>3</sup>) است. پس چگالی لایه‌ها با افزایش ذرات مس در نمونه‌ها افزایش خواهد

فعال مس در طول موج‌های ۳۲۵/۸، ۳۵۶/۱، ۴۰۵/۴ مشاهده

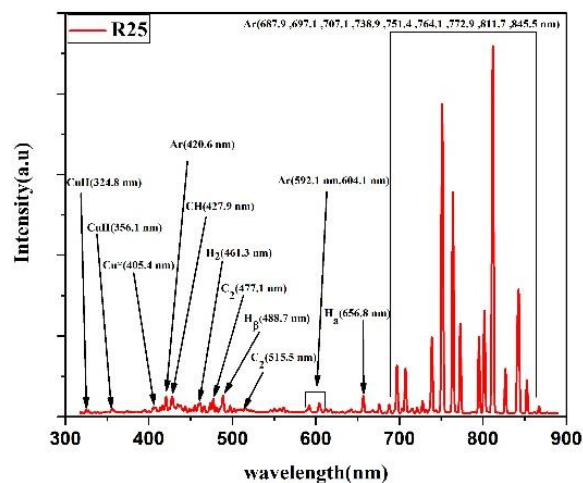


شکل ۱۰. نمودار روند تغییرات گونه‌های شیمیایی اصلی در پلاسمای ایجاد شده در توان‌های مختلف منبع تغذیه فرکانس رادیویی.

شده‌اند و گونه‌های هیدروژن در طول موج‌های ۴۶۱/۳، ۴۸۸/۷، ۶۵۶/۸ دارای قله‌های مشخصی هستند. همچنین گونه‌های فعال کربن قله‌هایی در طول موج‌های ۴۷۷/۱، ۵۱۵/۵ را دارا می‌باشند. گونه‌هایی که شامل ترکیب کربن و هیدروژن (هیدروکربن) هستند مانند CH در طول موج ۴۲۷/۹ 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 می‌باشد [۲۹ - ۲].

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

یافت. این افزایش سبب افزایش در ضریب شکست لایه خواهد



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

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

### ۳.۴ آنالیز عناصر فعال شیمیایی در پلازما

طیف‌سنجی نشر نوری روشی غیر مخرب است. بررسی اتم‌ها، یون‌ها، گونه‌های برانگیخته شیمیایی و مولکول‌های داخل پلازما را فراهم می‌کند. طیف‌سنجی انتشار پلازما به عنوان یک ابزاری کارآمد برای تشخیص پلازما و همچنین برای نظارت بر گونه‌های شیمیایی موجود در فرآیندهای پلازما مورد استفاده در رسوب فیلم‌های نازک شناخته شده است [۲۸]. برای بررسی طیف‌های نشری پلازما ایجاد شده در داخل محفظه کندوپاش، فیبر نوری را بر روی پنجره دستگاه گذاشته و طیف تابشی ذخیره می‌گردد. در اینجا با استفاده از این آنالیز 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 ۲۵W منبع تغذیه فرکانس رادیویی و توان ثابت ۱۰۰W منبع تغذیه جریان مستقیم همزمان نشان داده شده است. همانطور که مشخص شده گونه‌های شیمیایی

بررسی خواص نوری و ساختاری لایه‌های ایجاد شده همخوانی دارد.

خدادای و همکاران و همچنین جو چین بو و همکاران نیز گزارش داده‌اند که افزایش توان منابع تغذیه سبب افزایش یونیزاسیون در داخل محفظه کندوپاشی شده و  $Ar^+$  بیشتری در محفظه ایجاد خواهد نمود. افزایش توان هر یک از منابع تغذیه افزایش بمباران یونی هدف‌ها توسط یون‌های  $(Ar^+)$  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 فرکانس رادیویی گونه‌های مس در محفظه و در سطح لایه‌ها نیز افزایش یافته. که با این تحقیق نیز همخوانی دارد. همچنین در بررسی آنالیزهای رامان و مرئی-فرابنفش نیز افزایش ذرات مس در لایه‌ها نیز مشخص گردید [۳ و ۳۰].

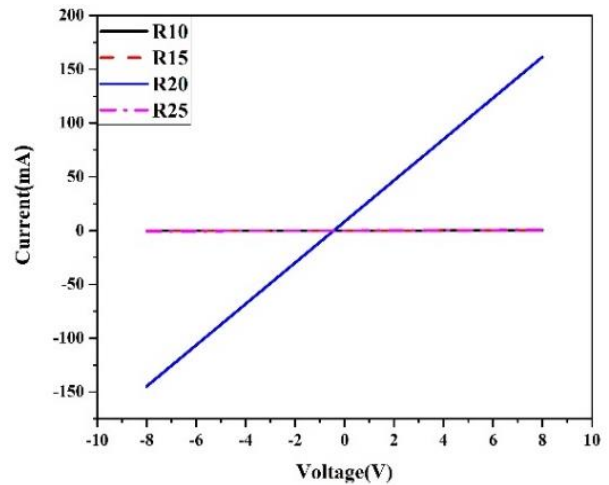
### ۳.۵. بررسی خواص الکتریکی لایه‌ها با استفاده از منحنی I-V

برای اندازه‌گیری مقاومت ابتدا ماسک‌های شانه‌ای شکل از جنس طلا با استفاده از کندوپاش مغناطیسی رومیزی بر روی لایه‌ها پوشش دهی گردید. سپس دو طرف شانه را با چسب کربن به سیم مسی بسیار نازک متصل گردید. پس از خشک شدن چسب کربن فرآیند آنالیز انجام گردید. در لایه‌های کربن شبه‌الماسی مقاومت لایه‌ها وابسته به نسبت  $SP^2/SP^3$  می‌باشد. اگر مقدار  $SP^2$  افزایش پیدا کند مقدار مقاومت در لایه‌های کربن شبه‌الماسی کاهش پیدا می‌کند. 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 ۳۹۳ K با استفاده از شیب نمودار I-V بدست آمده است، که مقاومت سطحی با مقاومت بدست 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 R10 و R15 یعنی با افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی از ۱۰W تا به ۱۵W تغییر محسوس‌تری نداشتند و در حدود  $3/3-3/2 G\Omega$  می‌باشد. اما با تغییر توان فرکانس رادیویی از ۱۵W تا به ۲۰W مقدار مقاومت نمونه به یکباره افت شدیدی نموده و به مقدار  $0/2 G\Omega$  رسیده که به خاطر افزایش ذرات مس در نمونه و همچنین مطابق آنالیز رامان بدلیل افزایش ساختار  $SP^2$  در لایه می‌باشد. با افزایش توان فرکانس رادیویی از ۲۰W تا ۲۵W تغییر در روند مقاومت لایه‌ها مشاهده شده است. یعنی با افزایش توان فرکانس رادیویی مقدار مقاومت نمونه R25 افزایش یافته است و به مقدار  $3/3 G\Omega$  می‌رسد. این افزایش مقاومت در نمونه R25 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 گردید مقدار ذرات مس در لایه‌ها برای نمونه R25 به حد بسیار بیشتری افزایش یافت. حال این افزایش ناگهانی در مقاومت نمونه R25 می‌تواند بدلیل اکسیداسیون ناخواسته ذرات مس موجود در لایه‌های سطحی Cu-DLC باشد که پس از انجام فرآیند لایه‌نشانی و در حین بررسی مقاومت نمونه ایجاد شده است که با آنالیز رامان نمونه R25 مطابقت دارد. در واقع در بررسی ساختاری نمونه R25 با استفاده از آنالیز رامان قله اکسید مس در عدد موج  $210, 275, 303, 380, 410, 486$  مشاهده شد در حالی که برای نمونه‌های دیگر همچنین قله‌های مشخصی یافت نگردید. برای بررسی مقاومت نمونه‌های لایه‌نشانی شده در دمای بالا، نمونه‌ها در دمای  $120^\circ C$  (۳۹۳ k) قرار داده شده‌اند و سپس منحنی جریان ولتاژ نمونه‌ها بدست آمده است، که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با بدست آوردن شیب این نمودار میزان رسانندگی نمونه‌ها مشخص می‌شوند. از آنجایی که رسانندگی و مقاومت رابطه‌ای معکوس با هم دارند با محاسبه عکس شیب نمودار جریان ولتاژ، مقاومت نمونه‌ها در دمای بالا مشخص

لایه‌های نازک کربن شبه‌المالسی با ناخالصی فلزی ذرات مس بوسیله روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان با تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی متصل به هدف مس لایه‌نشانی شده است. بررسی طیف‌سنجی رامان با افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی روند افزایشی برای نسبت  $I_D/I_G$  و همچنین موقعیت قله G نشان داد. روند افزایشی  $I_D/I_G$  سبب ایجاد روند کاهش پیوندهای شیمیایی  $SP^3/SP^2$  در ساختار لایه‌ها گردید و نمونه‌ها به سمت گرافیتی شدن میل نمودند. طیف‌سنجی نشر نوری نشان داد با افزایش توان منبع فرکانس رادیویی تعداد عناصر فعال شیمیایی مس نسبت به عناصر شیمیایی فعال کربن داخل پلاسماتا حدودی افزایش می‌یابد. همچنین ضریب شکست (n) لایه‌های ایجاد شده یک روند ثابتی را طی نمی‌کنند. در ابتدا کاهش و سپس روند افزایش دارد که در ابتدا بدلیل افزایش محتوای  $SP^2$  در ساختار لایه‌ها کاهش یافته و سپس بدلیل افزایش ذرات مس در لایه‌ها و افزایش چگالی لایه‌ها روند تغییرات ضریب شکست تغییر یافته و افزایش می‌یابد. در واقع در ابتدا با افزایش توان تا  $20\text{W}$  روند کاهش از  $1/82$  تا  $1/63$  رسیده و با افزایش توان تا  $25\text{W}$  مقدار  $1/84$  در طیف طول موجی  $623/8\text{ nm}$  اندازه‌گیری شده است. همچنین مقدار مقاومت نمونه‌ها با توجه به افزایش محتوای ذرات مس بر روی لایه‌ها روند ثابتی نداشته و در ابتدا روند کاهش و سبب روند افزایشی داشته است. این عدم یکنواختی در روند تغییر مقاومت نمونه‌ها بدلیل اکسیداسیون سطحی ذرات مس در لایه‌ها بوده است. شکاف نوار انرژی لایه‌ها از  $1/53$  تا  $0/79\text{ eV}$  کاهش یافته است و همچنین  $E_04$  از  $2/30$  تا  $1/21\text{ eV}$  کاهش می‌یابد. این روند کاهش در شکاف انرژی لایه‌ها به علت افزایش محتوای ذرات مس در لایه‌ها می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی مقدار محتوای  $SP^2$  در حجم لایه‌های ایجاد شده افزایش می‌یابد و سبب کاهش در شکاف انرژی نمونه‌ها می‌گردد [۲].

می‌گردد. اعمال دما سبب افزایش حامل‌های بار در لایه‌ها شده و مقاومت نمونه‌ها را معمولاً کاهش می‌دهد. بدین ترتیب مقدار



شکل ۱۱. نمودار ولتاژ جریان (I-V) برای نمونه‌های لایه‌نشانی شده در دمای  $120^\circ\text{C}$  ( $393\text{K}$ ).

مقاومت در دمای  $393\text{K}$  برای نمونه‌های R10 و R15 به ترتیب به میزان  $150$  و  $185\text{ M}\Omega$  می‌باشد. همچنین همانند حالت دمای اتاق مقاومت نمونه R20 به مقدار بسیار کم  $85/2\text{ K}\Omega$  رسیده است. همچنین نمونه R25 رفتاری مشابه حالت دمای اتاق داشته و مقاومت آن روندی صعودی داشته و به مقدار  $25/39\text{ M}\Omega$  رسیده است. افزودن مس به لایه‌های کربن شبه‌المالسی، این نوع از لایه‌ها را برای کاربردهای فتوولتایک صنعتی مناسب می‌کند. از دیگر فاکتورها برای کاهش مقاومت این لایه‌ها افزایش میزان خوشه‌های فلزی مس تا حد نرمال در لایه‌ها نیز می‌باشد [۳۱]. ام. ای. خان و همکاران نشان داده‌اند که با افزایش غلظت ذرات مس در لایه‌ها نیز مقاومت نمونه‌ها کاهش پیدا خواهد نمود زیرا مس ماده‌ای رسانا بوده و با افزایش غلظت آن در لایه‌ها مقاومت آنها را کاهش خواهد داد که با این تحقیق نیز مطابقت دارد [۲۶].

#### ۴. نتیجه گیری

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.

