

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای

پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک پلاسما

بررسی خواص اپتیکی و ساختاری فیلم‌های آمورف کربنی با ناخالصی‌های غیرکاربیدی به روش کندوپاش مغناطیسی

نگارنده:

علیرضا میخ‌چین

استاد راهنما:

دکتر سید ایمان حسینی

مهر ۱۳۹۹

تقدیم بہ پدر و مادر عزیزم

ماحول آموختہ ایم را تقدیم می کنم بہ آمان کہ مہر آسانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است بہ استوارترین تکیہ کاہم، دستان پر مہر پدرم بہ سبزترین مگاہ زندگیم، چشمان پر امید مادرم کہ

ہرچہ آموختم در مکتب عشق شما آموختم و ہرچہ بگو شتم قطرہ ای از دریای بی کران مہربانیتان را پاس نتوانم بگویم.

امروز، ہستی ام بہ امید شماست و فردا کلید باغ بہشتم رضای شما

بوسہ بردستان پر مہر تان.

و شکر از برادہائی کہ وجودشان مایہ آرامش و دلگرمیست.

و باز ہم پاس پروردگارم را کہ افتخار نگاردی استادی را نصیم نمود کہ در مکتبشان نہ تنها علم، کہ اخلاق را آموختم؛

دکتر سید ایمان حسینی

از زحمات بی دریغشان پاسکدارم.

واژه‌های ویدی؛

استاد، دوستان، بکلاسی‌ها، مسئولین محترم دانشکده و آزمایشگاه به خصوص مهندس شهیدی و مهندس عسکری صمیمانه تشکر می‌کنم.

لیست مقالات استخراج شده

- ۱- میخ چین، علیرضا، حسینی، سید ایمان؛ (۱۳۹۸)، «بررسی افزودن ناخالصی فلزی بر خواص اپتیکی فیلم‌های آمورف کربنی لایه‌نشانی شده به روش کندوپاش مغناطیسی»، هفتمین کنفرانس مهندسی و فیزیک پلاسما، دانشگاه صنعتی شاهرود، (۱۰۶۹-۱۰۷۲).
- ۲- میخ چین، علیرضا، حسینی، سید ایمان؛ (۱۳۹۹)، «بررسی عناصر شیمیایی فعال پلاسما و ساختار شیمیایی، خواص اپتیکی و الکتریکی فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده به روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان»، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، در دست دآوری.

تهدنام

اینجانب علیرضا میخچین دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک پلاسما دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده بررسی خواص اپتیکی و ساختاری فیلم‌های آمورف کربنی با ناخالصی‌های غیرکاربیدی به روش کندوپاش مغناطیسی تحت راهنمایی جناب دکتر سید ایمان حسینی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده‌است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

در این پایان نامه خواص ساختاری، اپتیکی و الکتریکی فیلم‌های نازک کربن شبه‌الماسی که به روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان لایه‌نشانی شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. اثر دو پارامتر تغییر توان و ولتاژ بایاس زیرلایه بر خواص لایه‌های نازک کربن شبه‌الماسی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که این دو پارامتر تاثیر به‌سزایی بر خواص فیلم‌های کربن شبه‌الماسی داشته است. نتایج بررسی ساختاری توسط آنالیز رامان نشان می‌دهد که با افزایش توان جریان مستقیم در محتوای SP^3 تغییر ایجاد نشده است ولی اعمال ولتاژ بایاس به زیرلایه‌ها در هنگام افزایش توان جریان مستقیم سبب افزایش محتوای SP^3 شده است. افزایش توان فرکانس رادیویی سبب افزایش ساختار SP^2 شده است در حالی که افزایش ولتاژ بایاس روند ثابتی برای اینگونه ساختار نشان نداده است. خواص اپتیکی فیلم‌ها که متاثر از نسبت SP^3/SP^2 در ساختار فیلم‌ها بوده است در هر مرحله مورد بررسی قرار گرفته است. ضریب شکست فیلم‌ها که به روش طیف‌سنجی بیضی‌سنجی به دست آمده است علاوه بر نسبت SP^3/SP^2 به میزان هیدروژن و پیوندهای هیدروکربنی در ساختار فیلم‌ها مرتبط بوده است. مقاومت فیلم‌های لایه‌نشانی شده با استفاده از شیب منحنی جریان – ولتاژ (I-V) به دست آمده است که میزان ذرات مس در فیلم‌ها و همچنین اکسیداسیون این ذرات در سطح فیلم‌ها بر مقدار آن تاثیر گذار بوده است. از آنالیز طیف‌سنجی گسیل اپتیکی (OES) برای ارزیابی پلاسما ایجاد شده برای انجام فرآیند لایه‌نشانی و همچنین تاثیر گونه‌های فعال حاضر در فرآیند لایه‌نشانی بر ساختار فیلم‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: کربن شبه‌الماسی، منبع تغذیه جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان، ناخالصی

غیرکاربیدی، ولتاژ بایاس

فصل اول: معرفی کربن آمورف و روش های لایه نشانی فیلم های نازک کربن شبه الماسی

۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ انواع پیوندهای کربنی.....	۳
۳-۱ کربن شبه الماسی.....	۹
۴-۱ انواع روش های لایه نشانی.....	۱۴
۱-۴-۱ لایه نشانی به روش قوس الکتریکی کاتدی.....	۱۴
۲-۴-۱ لایه نشانی تبخیر بخار شیمیایی به کمک پلاسما (PECVD).....	۱۶
۳-۴-۱ لایه نشانی به روش پرتو یونی (IBD).....	۱۹
۴-۴-۱ لایه نشانی به روش لیزر پالسی (PLD).....	۲۰
۵-۴-۱ لایه نشانی به روش کندوپاش.....	۲۱
۱-۵-۴-۱ کندوپاش مغناطیسی.....	۲۳
۲-۵-۴-۱ کندوپاش جریان مستقیم (DC).....	۲۶
۳-۵-۴-۱ کندوپاش فرکانس رادیویی (RF).....	۲۷

فصل دوم: معرفی روش های مشخصه یابی لایه های نازک کربن شبه الماسی

۱-۲ مقدمه.....	۳۲
----------------	----

۳۲	طیف‌سنجی گسیل اپتیکی (OES)
۳۷	طیف‌سنجی رامان (Raman Spectroscopy)
۴۰	۱-۳-۲ آنالیز رامان فیلم‌های کربن شبه‌الماسی
۴۳	۴-۲ بیضی‌سنجی (Elipsometry)
۴۶	۵-۲ طیف‌سنجی فرابنفش - مرئی (UV-Vis)
۴۷	۱-۵-۲ گاف نواری اپتیکی
۴۹	۶-۲ مشخصه یابی الکتریکی

فصل سوم: چیدمان و مراحل انجام آزمایش، با استفاده از دستگاه کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان

۵۲	۱-۳ مقدمه
۵۲	۲-۳ آماده سازی زیرلایه
۵۳	۳-۳ سیستم کندوپاش
۵۴	۱-۳-۳ کندوپاش مغناطیسی فرکانس رادیویی
۵۵	۱-۱-۳-۳ منبع تغذیه فرکانس رادیویی
۵۶	۲-۱-۳-۳ دستگاه تطبیق امپدانس
۵۷	۲-۳-۳ کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم (DC)
۵۸	۴-۳ منبع تغذیه ولتاژ بایاس
۶۰	۵-۳ محفظه لایه‌نشانی

- ۳-۵-۱ نگهدارنده زیر لایه ۶۰
- ۳-۵-۲ شاتر ۶۱
- ۳-۵-۳ ضخامت سنج ۶۲
- ۳-۵-۴ ماده هدف ۶۳
- ۳-۵-۵ نگهدارنده ماده هدف ۶۳
- ۳-۶ خلاء سازی ۶۴
- ۳-۷ گاز ۶۵
- ۳-۸ کنترل کننده شار جرمی (MFC) ۶۶

فصل چهارم: نتایج و بحث حاصل از لایه نشانی کربن ثبالماسی باناهالسی غیر کاربردی

- ۴-۱ مقدمه ۶۸
- ۴-۲ بررسی اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم در توان ثابت منبع تغذیه فرکانس رادیویی همزمان ۶۹
- ۴-۲-۱ طیف سنجی رامان ۶۹
- ۴-۲-۲ بررسی خواص اپتیکی فیلم های لایه نشانی شده ۷۳
- ۴-۲-۲-۱ طیف جذب ۷۳
- ۴-۲-۲-۲ گاف نواری ۷۵
- ۴-۲-۲-۲-۱ E_{04} ۷۵

- ۷۸ E_g ۲-۲-۲-۴
- ۷۹ ۳-۲-۲-۴ بررسی ضریب شکست فیلم‌های لایه‌نشانی شده
- ۸۱ ۳-۲-۴ آنالیز عناصر فعال در پلاسما
- ۸۳ ۴-۲-۴ بررسی خواص الکتریکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده با استفاده از منحنی I-V
- ۳-۴ بررسی اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم در توان ثابت منبع تغذیه فرکانس رادیویی
- ۸۵ همزمان و اعمال بایاس ثابت به زیر لایه
- ۸۶ ۱-۳-۴ آنالیز نمونه‌های لایه‌نشانی شده بوسیله طیف‌سنجی رامان
- ۸۹ ۲-۳-۴ بررسی خواص اپتیکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده
- ۸۹ ۱-۲-۳-۴ طیف جذب
- ۹۰ ۲-۲-۳-۴ گاف نواری
- ۹۰ E_{04} ۱-۲-۲-۳-۴
- ۹۲ E_g ۲-۲-۲-۳-۴
- ۹۵ ۳-۲-۳-۴ بررسی ضریب شکست فیلم‌های لایه‌نشانی شده
- ۹۸ ۳-۳-۴ آنالیز عناصر فعال در پلاسما
- ۱۰۱ ۴-۳-۴ بررسی خواص الکتریکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده با استفاده از منحنی I-V
- ۴-۴ بررسی اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه در روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان
- ۱۰۳ ۱-۴-۴ آنالیز نمونه‌های لایه‌نشانی شده بوسیله طیف‌سنجی رامان
- ۱۰۴ ۲-۴-۴ بررسی خواص اپتیکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده

- ۱۰۷ طیف جذب ۱-۲-۴-۴
- ۱۰۸ گاف نواری ۲-۲-۴-۴
- ۱۰۸ E_{04} ۱-۲-۲-۴-۴
- ۱۱۰ E_g ۲-۲-۲-۴-۴
- ۱۱۱ بررسی ضریب شکست فیلم‌های لایه‌نشانی شده ۳-۴-۴
- ۱۱۲ آنالیز عناصر فعال در پلاسما ۴-۴-۴
- ۱۱۵ I-V بررسی خواص الکتریکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده با استفاده از منحنی ۵-۴-۴
- ۵-۴ بررسی اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی در توان ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم
- ۱۱۶ همزمان با اعمال ولتاژ بایاس ثابت به زیرلایه ۵-۴-۴
- ۱۱۷ آنالیز نمونه‌های لایه‌نشانی شده بوسیله طیف‌سنجی رامان ۱-۵-۴
- ۱۲۰ بررسی خواص اپتیکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده ۲-۵-۴
- ۱۲۰ طیف جذب ۱-۲-۵-۴
- ۱۲۲ گاف نواری ۲-۲-۵-۴
- ۱۲۲ E_{04} ۱-۲-۲-۵-۴
- ۱۲۴ E_g ۲-۲-۲-۵-۴
- ۱۲۵ بررسی ضریب شکست فیلم‌های لایه‌نشانی شده ۳-۵-۴
- ۱۲۶ آنالیز عناصر فعال در پلاسما ۴-۵-۴
- ۱۲۹ I-V بررسی خواص الکتریکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده با استفاده از منحنی ۵-۵-۴

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۱-۵ نتیجه‌گیری ۱۳۲
- ۱-۱-۵ اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم بدون ولتاژ بایاس زیرلایه ۱۳۲
- ۲-۱-۵ اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم در حضور ولتاژ بایاس زیرلایه ۱۳۳
- ۳-۱-۵ اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه در توان‌های ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان ۱۳۵
- ۴-۱-۵ اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی در حضور ولتاژ بایاس زیرلایه ۱۳۶
- ۲-۵ پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده ۱۳۷
- مراجع ۱۳۹

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: انواع آلوتروپ‌های کربن و ساختار تشکیل دهنده آن‌ها ۳
- شکل ۲-۱: انواع هیبریداسیون اتم کربن ۴
- شکل ۳-۱: تصویری از یک سلول الماس ۵
- شکل ۴-۱: ساختار لایه‌ای از گرافیت و صفحه‌های گرافن ۶
- شکل ۵-۱: پیوندهای کربن و هیدروژن در مولکول اتان (سه پیوند ناشی از SP^2 از نوع σ و پیوند ناشی از همپوشانی دو پیوند P از نوع π) ۷
- شکل ۶-۱: ساختار مولکولی اتم استیلن ۷
- شکل ۷-۱: شماتیکی از تمام هیبریداسیون اتم کربن شامل ساختار هیبریدی SP^1 , SP^2 , SP^3 ۸

- شکل ۸-۱: مدل a ساختار کربن شبه‌الماسی و مدل b ساختار کربن شبه‌الماسی با ناخالصی فلزی مس (حدود ۱,۵۶٪ اتمی مس) افزوده شده به آن را نشان می‌دهد. ۱۳
- شکل ۹-۱: شماتیکی از دستگاه تبخیر قوس کاتدی ۱۵
- شکل ۱۰-۱: شماتیکی از سیستم قوس کاتدی خلاء فیلتر شده (FCVA) ۱۶
- شکل ۱۱-۱: شماتیکی از سیستم های ECR-PECVD، DC-PECVD، RF-PECVD ۱۷
- شکل ۱۲-۱: نمای شماتیک از لایه‌نشانی به روش پرتو یونی ۱۹
- شکل ۱۳-۱: الگویی از لایه‌نشانی به روش لیزر پالسی (PLD) ۲۱
- شکل ۱۴-۱: شماتیکی از روش کندوپاش در بمباران ماده هدف توسط یون‌های آرگون ۲۳
- شکل ۱۵-۱: شماتیکی از سیستم کندوپاش مغناطیسی تعادلی ۲۴
- شکل ۱۶-۱: انواع سیستم‌های کندوپاشی مغناطیسی تعادلی و غیرتعادلی که در حالت غیرتعادلی نوع اول کناری قوی‌تر و در نوع دوم وسطی قوی می‌باشد ۲۵
- شکل ۱۷-۱: شماتیکی از روش کندوپاش جریان مستقیم ۲۷
- شکل ۱۸-۱: شماتیکی از سیستم کندوپاش مغناطیسی فرکانس رادیویی ۲۸
- شکل ۱-۲: شماتیکی از فرآیند جذب و گسیل اتمی در مدل بور ۳۴
- شکل ۲-۲: نمودار ترازهای انرژی در اتم و یون a, b حالت برانگیخته، c یونش، d یونش/برانگیختگی، e گسیل یونی، و h و g گسیل اتمی ۳۵
- شکل ۳-۲: فوتوکاتد، داینود و آند در یک فتومولتی پلیمر ۳۶
- شکل ۴-۲: شماتیکی از انواع پراکندگی رامان و ریلی ۳۸
- شکل ۵-۲: شماتیکی از طیف رامان کربن آمورف و عوامل موثر بر شدت و تغییر مکان قله‌های D و G ۴۱

- شکل ۲-۶: شماتیکی از طیف رامان چند نمونه از آلوتروپ‌های بلوری و آمورفی کربن ۴۲
- شکل ۲-۷: اثر بازتاب و شکست نور فرودی به یک فیلم نازک و زیرلایه ۴۳
- شکل ۲-۸: شماتیکی از گاف نواری اپتیکی مستقیم و غیرمستقیم ۴۸
- شکل ۲-۹: دستگاه پتانسیومتر آنالیز الکتروشیمیایی مدل ۲۰۶۵PGS ۴۹
- شکل ۳-۱: نمای کلی سیستم کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان واقع در دانشگاه صنعتی شاهرود ۵۴
- شکل ۳-۲: منبع تغذیه فرکانس رادیویی با توان خروجی $W 300$ و فرکانس 13.56 MHz ۵۵
- شکل ۳-۳: دستگاه تطبیق امپدانس مدل MTC03BF با توان خروجی $W 300$ ۵۷
- شکل ۳-۴: تصویر منبع تغذیه جریان مستقیم ۵۸
- شکل ۳-۵: تصویر منبع تغذیه ولتاژ بایاس معکوس ۵۹
- شکل ۳-۶: نمایی از محفظه لایه‌نشانی شامل نگهدارنده، شاتر و ضخامت‌سنج ۶۰
- شکل ۳-۷: تصویری از ماده‌های هدف و نگهدارنده آن در سیستم کندوپاشی ۶۳
- شکل ۳-۸: تصویری از پمپ‌های روتاری و توربومولکولی ۶۵
- شکل ۳-۹: تصویری از یک کنترل کننده شار جرمی ۶۶
- شکل ۴-۱: نمودار فیت‌های گوسی برای نمونه $W 120$ ۷۰
- شکل ۴-۲: نمودار طیف‌های رامان نمونه‌های لایه‌نشانی شده در توان‌های 60 ، 80 ، 100 و 120 منبع تغذیه جریان مستقیم ۷۱
- شکل ۴-۳: نمودار تغییرات I_D/I_G و موقعیت قله G برای فیلم‌های لایه‌نشانی شده بر حسب تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم ۷۲
- شکل ۴-۴: نمودار طیف جذب نمونه‌های لایه‌نشانی شده در توان 60 ، 80 ، 100 و 120 منبع تغذیه

جریان مستقیم ۷۴

شکل ۴-۵: طیف عبوری فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان

مستقیم ۷۶

شکل ۴-۶: ضریب جذب فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده با تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم

..... ۷۷

شکل ۴-۷: گاف نواری اپتیکی فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان

مستقیم و ثابت بودن توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی ۷۹

شکل ۴-۸: ضریب شکست فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده بر حسب تغییر توان منبع تغذیه جریان

مستقیم در طول موج ثابت ۶۲۳ nm ۸۰

شکل ۴-۹: طیف گسیلی جذبی (OES) از پلاسمای ایجاد شده با توان ۱۲۰ W منبع تغذیه جریان

مستقیم و ۱۰ W منبع تغذیه فرکانس رادیویی ۸۲

شکل ۴-۱۰: نمودار روند تغییرات گونه‌های اصلی در پلاسمای ایجاد شده با تغییر توان منبع تغذیه

جریان مستقیم و ثابت بودن منبع تغذیه فرکانس رادیویی ۸۳

شکل ۴-۱۱: نمودار ولتاژ جریان (I-V) برای فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده با تغییر توان منبع

تغذیه جریان مستقیم در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد (۳۹۳ درجه کلوین) ۸۴

شکل ۴-۱۲: طیف رامان فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده با تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم

و ثابت نگه داشتن منبع تغذیه فرکانس رادیویی با اثر ولتاژ بایاس ثابت زیرلایه ۸۶

شکل ۴-۱۳: نمودار I_D/I_G و موقعیت پیک G فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان

منبع تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن منبع تغذیه فرکانس رادیویی با اعمال ولتاژ بایاس به زیرلایه ... ۸۷

شکل ۴-۱۴: نمودار طیف جذب فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه

جریان مستقیم و فرکانس رادیویی ثابت و همزمان با ولتاژ بایاس زیرلایه ثابت ۹۰

شکل ۴-۱۵: طیف عبور حاصل از فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه

جریان مستقیم در حضور ولتاژ بایاس ثابت ۹۱

شکل ۴-۱۶: نمودار ضریب جذب فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه

جریان مستقیم و ثابت بودن توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی با اثر ولتاژ بایاس زیرلایه ۹۲

شکل ۴-۱۷: گاف نواری اپتیکی فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه

جریان مستقیم و ثابت بودن توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی با حضور ولتاژ بایاس ثابت ۹۳

شکل ۴-۱۸: تصویر شماتیکی چگالی حالت‌ها (DOS) در فیلم‌های DLC براساس مدل رابرتسون ۹۴

شکل ۴-۱۹: نمودار تغییرات ضریب شکست فیلم‌های Cu-DLC در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان

مستقیم و ثابت بودن توان فرکانس رادیویی در حضور ولتاژ بایاس در طول موج ۶۳۲ nm ۹۶

شکل ۴-۲۰: طیف‌سنجی اپتیکی پلاسما ایجاد شده در توان ۱۲۰ W منبع تغذیه جریان مستقیم و W

۱۰ منبع تغذیه فرکانس رادیویی همزمان در حضور ولتاژ بایاس ۱۰۰ v ۹۹

شکل ۴-۲۱: نمودار تغییرات گونه‌های اصلی در پلاسمای ایجاد شده با تغییر توان منبع تغذیه جریان

مستقیم و ثابت بودن منبع تغذیه فرکانس رادیویی با حضور ولتاژ بایاس ۱۰۰

شکل ۴-۲۲: نمودار ولتاژ جریان (I-V) برای فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده با تغییر توان منبع

تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن منبع فرکانس رادیویی در حضور ولتاژ بایاس در دمای ۱۲۰ درجه

سانتیگراد (۳۹۳ درجه کلون) ۱۰۲

شکل ۴-۲۳: طیف‌سنجی رامان فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه با

ثابت بودن توان‌های جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان ۱۰۴

شکل ۴-۲۴: موقعیت قله G و همچنین نسبت I_D/I_G در فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر

- تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه با ثابت بودن توان‌های جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان ۱۰۵
- شکل ۴-۲۵: طیف جذب فیلم‌های Cu-DLC در اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه و ثابت بودن توان‌های جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان ۱۰۷
- شکل ۴-۲۶: طیف عبور فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر بایاس زیرلایه و ثابت بودن توان‌های جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان ۱۰۸
- شکل ۴-۲۷: ضریب جذب فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان بایاس زیرلایه و ثابت بودن توان‌های جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان ۱۰۹
- شکل ۴-۲۸: گاف نواری فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه و توان‌های ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان ۱۱۰
- شکل ۴-۲۹: ضریب شکست فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده با تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه و ثابت بودن توان‌های جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان ۱۱۱
- شکل ۴-۳۰: طیف سنجی انتشار اپتیکی برای فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده با ولتاژ بایاس ثابت ۲۰۰۷ و توان‌های ثابت جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان ۱۱۳
- شکل ۴-۳۱: تغییرات گونه‌های فعال موجود در محیط پلازما در اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه و ثابت بودن توان‌ها منبع تغذیه جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان ۱۱۴
- شکل ۴-۳۲: نمودار جریان-ولتاژ فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه و توان‌های ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان در دمای ۳۹۳ K ۱۱۵
- شکل ۴-۳۳: طیف رامان نمونه W100-R25 در بازه $100-500\text{ cm}^{-1}$ ۱۱۸
- شکل ۴-۳۴: طیف رامان فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و ثابت بودن توان منبع تغذیه جریان مستقیم و با اعمال ولتاژ بایاس ثابت به زیرلایه ۱۱۹

شکل ۴-۳۵: نسبت I_D/I_G و همچنین موقعیت قله G در فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و توان ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم با اعمال ولتاژ بایاس ۱۲۰

شکل ۴-۳۶: طیف جذب فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و توان ثابت جریان مستقیم همزمان در حضور ولتاژ بایاس ثابت زیرلایه ۱۲۱

شکل ۴-۳۷: طیف عبور فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و توان ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم همزمان با اعمال ولتاژ بایاس ثابت زیرلایه ۱۲۲

شکل ۴-۳۸: ضریب جذب فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و توان ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم همزمان در حضور ولتاژ بایاس زیرلایه ۱۲۳

شکل ۴-۳۹: گاف نواری فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و ثابت بودن منبع تغذیه جریان مستقیم همزمان در حضور ولتاژ بایاس زیرلایه ۱۲۴

شکل ۴-۴۰: ضریب شکست فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و توان ثابت جریان مستقیم در حضور ولتاژ بایاس زیرلایه ۱۲۶

شکل ۴-۴۱: طیف سنجی اپتیکی پلاسما ایجاد شده در توان ۲۵W منبع تغذیه فرکانس رادیویی و ۱۰۰ منبع تغذیه جریان مستقیم همزمان در حضور ولتاژ بایاس ۱۰۰ V- ۱۲۷

شکل ۴-۴۲: شدت گونه‌های فعال در محیط پلاسما در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و توان ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم همزمان در حضور ولتاژ بایاس ثابت. ۱۲۸

شکل ۴-۴۳: نمودار جریان-ولتاژ فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و توان ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم در حضور ولتاژ بایاس زیرلایه ثابت ۱۳۰

جدول ۱-۱: مقایسه ویژگی‌های مهم آلوتروپ‌های کربن.....	۹
جدول ۱-۴: پارامترهای استفاده شده برای ایجاد فیلم‌ها Cu-DLC در اثر تغییر توان منبع تغذیه	
جریان مستقیم.....	۶۹
جدول ۲-۴: پارامترهای بکار رفته در فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده با استفاده از تغییر منبع	
تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن منبع تغذیه فرکانس رادیویی با اثر بایاس ثابت به زیرلایه.....	۸۵
جدول ۳-۴: پارامترهای بکار رفته در فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر ولتاژ بایاس	
زیرلایه.....	۱۰۳
جدول ۴-۴: پارامترهای استفاده شده برای ایجاد فیلم‌های Cu-DLC در اثر تغییر توان منبع تغذیه	
جریان مستقیم.....	۱۱۷

فصل اول

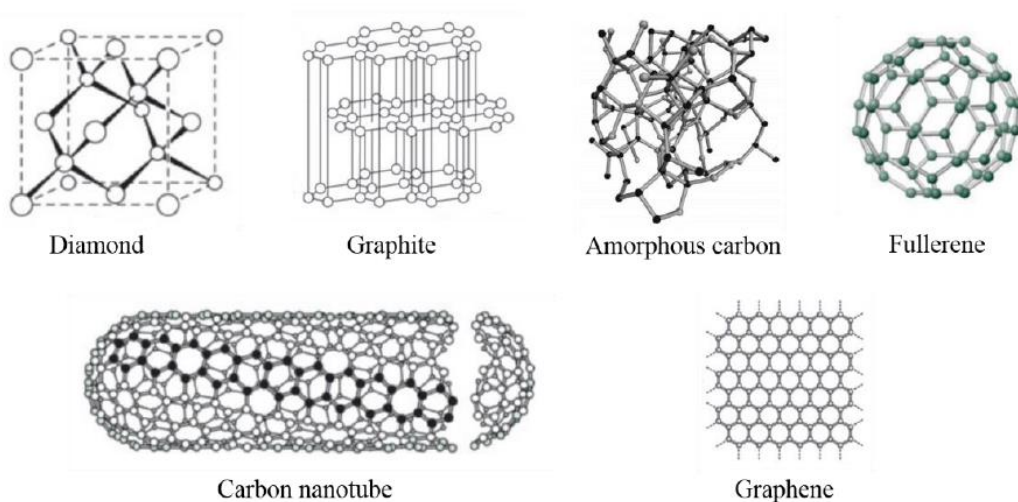
معرفی کربن آمورف و روش های لایه نشانی فیلم های نازک کربن شبه الماسی

۱-۱ مقدمه

علم لایه‌نشانی مواد، اصلاح و پردازش سطوح یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین علوم در زمینه‌های مختلف مانند صنعت، پزشکی، نظامی و... است. فیزیک لایه‌های نازک شاخه‌ای از علم فیزیک بوده و در دهه‌های اخیر گسترش بسیاری یافته است، به طوری که می‌توان گفت این شاخه از فیزیک، سیستم‌هایی را مورد مطالعه قرار می‌دهد که یکی از ابعاد آن بسار کوچک است و می‌توان آن را تقریباً دو بعدی در نظر گرفت. بدلیل خواص جالبی که لایه‌های نازک از خود نشان می‌دهند این نوع فیلم‌ها کاربردهای بسیاری در زمینه‌های گوناگون علم نظیر اپتیک، الکترونیک، میکروالکترونیک، ابرسانایی، نیمه‌هادی‌ها و... دارد. بی شک امروزه رشد سریع علم مانند فناوری اطلاعات، صنایع تزئینی، پوشش‌های سخت و مقاوم و همچنین بسیاری از ابزار آلات اپتیکی مرهون پیشرفت فناوری لایه نازک با روش‌های لایه‌نشانی مناسب و مختلف است. به عنوان یک نمونه‌ای از کاربرد لایه‌های نازک، می‌توان به دی الکتریک‌هایی که به بصورت پوشش روی سیستم‌های اپتیکی استفاده می‌شود و موجب تغییرات قابل توجه در بازتاب می‌گردد اشاره نمود، و یا یک دسته از فیلم‌های نازک مواد با ضخامت‌های مناسب می‌تواند به عنوان فیلتری برای عبور یا عدم عبور یک ناحیه از طول موج مشخص استفاده شود. یکی از موادی که امروزه در فیلم‌های نازک بطور گسترده از آن استفاده می‌شود کربن می‌باشد، کربن به دلیل ساختار گوناگون و کاربردهای فراوان و روش‌های مختلف لایه‌نشانی که برای آن وجود دارد انتخاب بسیار خوبی برای تحقیق و بررسی در این زمینه از علم می‌باشد. از بین لایه‌های نازک کربنی، فیلم‌های کربن شبه‌الماسی علایق بسیار زیادی را به خاطر کاربردهای زیادی که در پزشکی، صنعت و... دارند به خود جلب کرده است. همچنین محققین نشان دادند که افزودن ناخالصی فلزی خواص اپتیکی این نوع از فیلم‌ها را بهبود می‌بخشد. ما در فصل اول این تحقیق به معرفی مختصر کربن و ساختار تشکیل دهنده آن می‌پردازیم و همچنین کربن شبه‌الماسی با ناخالصی فلزی و روش‌های لایه‌نشانی آن را به تفصیل بیان خواهیم نمود.

۲-۱ انواع پیوندهای کربنی

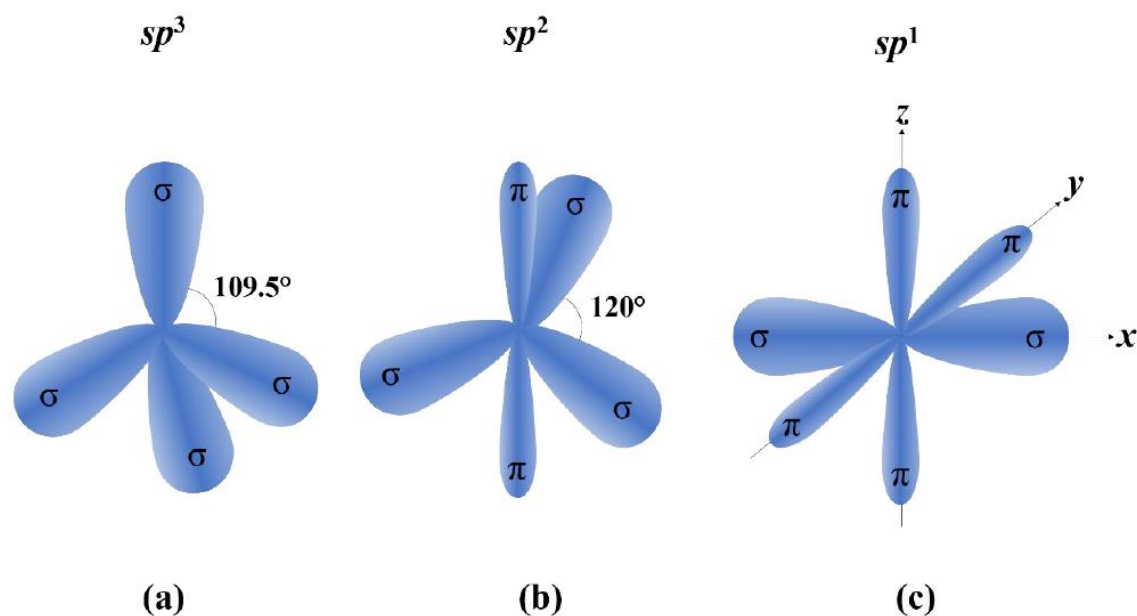
کربن یکی از عناصر جدول تناوبی می‌باشد که مورد توجه بسیار قرار گرفته است. همچنین در سیاره ما بطور مستقل در بیش از ۹۰٪ مواد شناخته شده است [۱]. کربن آلوتروپ‌های زیادی در میان همه عناصر دارد، مانند الماس، گرافیت، کربن آمورف که معمولاً می‌تواند در زندگی ما دیده شود. فولرن (C_{60})، نانوتیوپ کربنی و نانو سیم که در دو دهه اخیر به شدت مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است از دیگر آلوتروپ‌های کربن می‌باشند. امروزه تحقیقات بر روی فیلم‌های نازک کربنی به عنوان یک موضوع تحقیقاتی جذاب، مورد علاقه و استقبال بسیاری از دانشمندان و محققین می‌باشد [۲، ۳]. تعدادی از آلوتروپ‌های کربن و ساختار تشکیل دهنده آنها در شکل شماره ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: انواع آلوتروپ‌های کربن و ساختار تشکیل دهنده آنها

وجود تعداد زیادی از آلوتروپ‌های کربنی در ساختار کریستالی یا آمورفی می‌تواند به این دلیل باشد که کربن می‌تواند در سه قله‌ربندی متفاوت SP^1 ، SP^2 ، SP^3 وجود داشته باشد که بر مبنای مدل هیبریداسیون اوربیتال کلاسیکی می‌باشد. برای هیبریداسیون SP^3 (مانند الماس) یک اوربیتال S ($2s$) و سه اوربیتال P

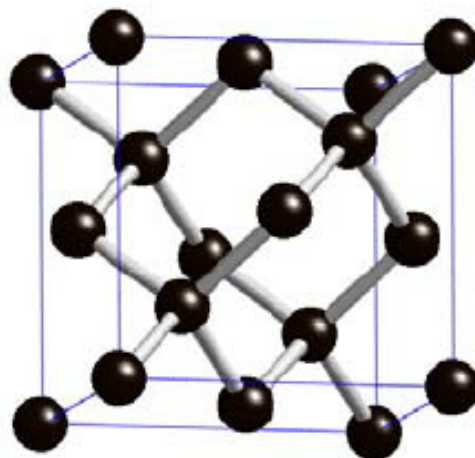
($2p_z$, $2p_y$, $2p_x$) با هم مخلوط شدند، که برای تشکیل اوربیتال‌های نیمه پر با انرژی یکسان در آرایش چهارگوشه‌ای، که در شکل (a) ۲-۱ نشان داده شده است، این ساختار یک ارتباط قوی (پیوند σ) بین اتم‌های کربن می‌سازد.



شکل ۲-۱: انواع هیبریداسیون اتم کربن

برای هیبریداسیون SP^2 (مانند گرافیت) یک اوربیتال $2s$ و دو اوربیتال $2p$ ($2p_y$, $2p_x$) اوربیتال‌های هیبریدی سه گانه را تشکیل می‌دهند. هر الکترون در این اوربیتال‌های هیبریدی SP^2 یک پیوند σ با اتم دیگر در پیکربندی مسطح (سطح محور x و y) با زاویه 120° درجه می‌سازد، و چهارمین اوربیتال (در جهت z) عمود بر صفحه SP^2 و الکترون داخل این اوربیتال می‌تواند یک پیوند ضعیف π روی یک یا همه اتم‌های مجاور ایجاد کند. برای هیبریداسیون SP ، فقط یک اوربیتال s و p هیبریدی وجود دارد. دو پیوند σ در طول محور $\pm x$ تشکیل می‌دهد و همچنین دو اوربیتال دیگر پیوندهای π در جهت x و y ایجاد می‌کنند. گرچه اتم کربن می‌تواند انواع دیگری از هیبریداسیون‌ها را نیز داشته باشد [۴].

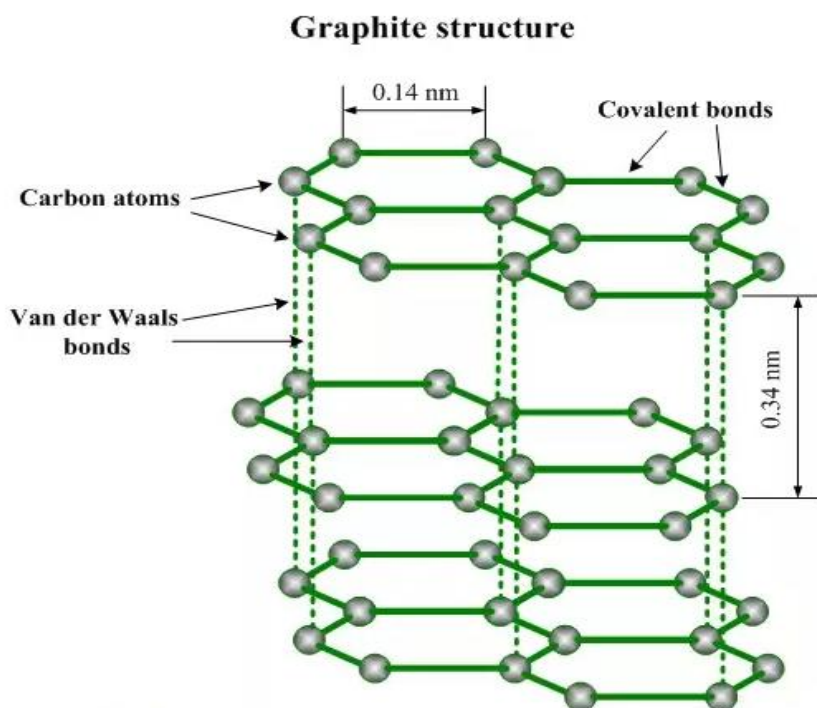
هیبریداسیون‌های پیچیده اتم کربن تفاوت‌های کاملی در خواص آلوتروپ‌های کربن ایجاد می‌کند، که سبب خواهد شد کربن در حالت‌های مختلفی در طبیعت یافت شود. الماس یکی از آلوتروپ‌های کریستالی کربن می‌باشد، که با پیوندهای جهت دار قوی SP^3 خواص منحصر به فردی مانند سختی بالا، رسانایی گرمایی بالا در دمای اتاق، پایین‌ترین ضریب انبساط حرارتی، مدول الاستیکی بالا و همچنین گاف نواری اپتیکی بزرگ دارای کاربردهای گوناگونی می‌باشد [۵، ۶]. الماس متشکل از ساختار بلوری مکعبی fcc است که در ساختار شبکه‌ای اتم کربن هر اتم کربن با چهار اتم کربن دیگر پیوندهای چهار وجهی تشکیل می‌دهند [۷]، تصویر یک سلول از یک شبکه الماس در شکل ۱-۳ آمده است.



شکل ۱-۳: تصویری از یک سلول الماس

یکی دیگر از آلوتروپ‌های کریستالی کربن گرافیت می‌باشد. در گرافیت عنصر کربن پایین‌ترین سطح انرژی در دما و فشار محیط را دارا می‌باشد. شبکه کریستالی گرافیتی از سه دسته موازی دو بعدی (2D) با هیبریداسیون SP^2 تشکیل شده است. اتم‌های کربن پیوندهای محکم σ در حلقه‌های مشبک شش ضلعی لانه زنبوری در صفحه‌های موازی ایجاد می‌کنند. اوربیتال‌های $2P_z$ از اتم‌های کربن می‌توانند همپوشانی خوبی داشته باشند و همچنین در بیرون صفحه پیوندهای ضعیف‌تر π را بین صفحات موازی ایجاد می‌کنند. گرافیت به دلیل تفاوت پیوندهای اتم کربن در درون و بیرون از صفحه آن بسیار جالب و بی‌نظیر است.

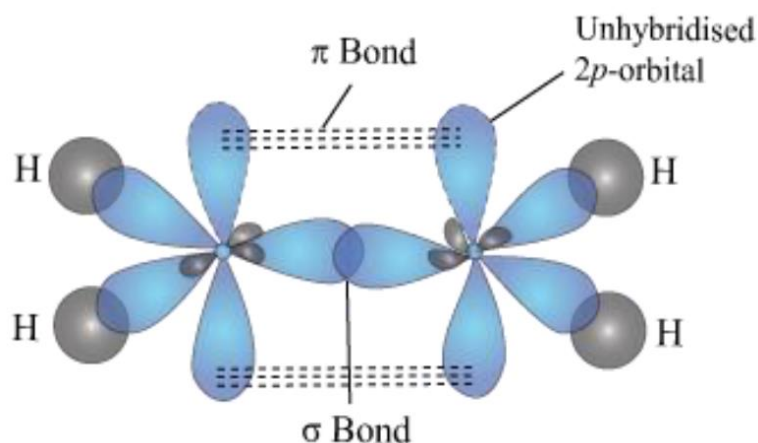
همچنین مدول الاستیک در صفحه‌های موازی در گرافیت، که گرافن (یک لایه کربنی تنها در شبکه کریستالی مشبک شش ضلعی لانه زنبوری گرافیتی به عنوان یک لایه گرافن یا شبکه گرافن شناخته شده است) نامیده می‌شود، از صفحه‌های عمودی بالاتر است. از این نظر گرافیت از الماس قوی تر خواهد بود. اوربیتال‌های π توزیع شده بر فراز تمام شبکه‌های گرافیتی سبب شده که از لحاظ حرارتی و الکتریکی رسانا باشد. ساختار لایه‌ای گرافیت در شکل ۱-۴ آمده است.



شکل ۱-۴: ساختار لایه‌ای از گرافیت و صفحه‌های گرافن

از دیگر پیوندهایی که کربن اساس آن است، می‌توانیم پیوندهای هیدروکربن را نام ببریم مانند استیلن، اتان و ... که شامل پیوندهای کربن با یکدیگر و با هیدروژن می‌باشد. یکی دیگر از مولکول‌های کربن‌دار که دارای پیوندهای sp^2 می‌باشد اتان (C_2H_4) است. در مولکول‌های اتان نحوه تشکیل پیوندها بدین صورت است که اتم‌های کربن با هیدروژن توسط پیوندهای سیگما به هم متصل شده‌اند. همچنین اتم‌های کربن به یکدیگر با پیوندهای دوگانه که یکی از آنها پیوند π و دیگری پیوند σ می‌باشد متصل شده‌اند که در شکل

۵-۱ نشان داده شده است.



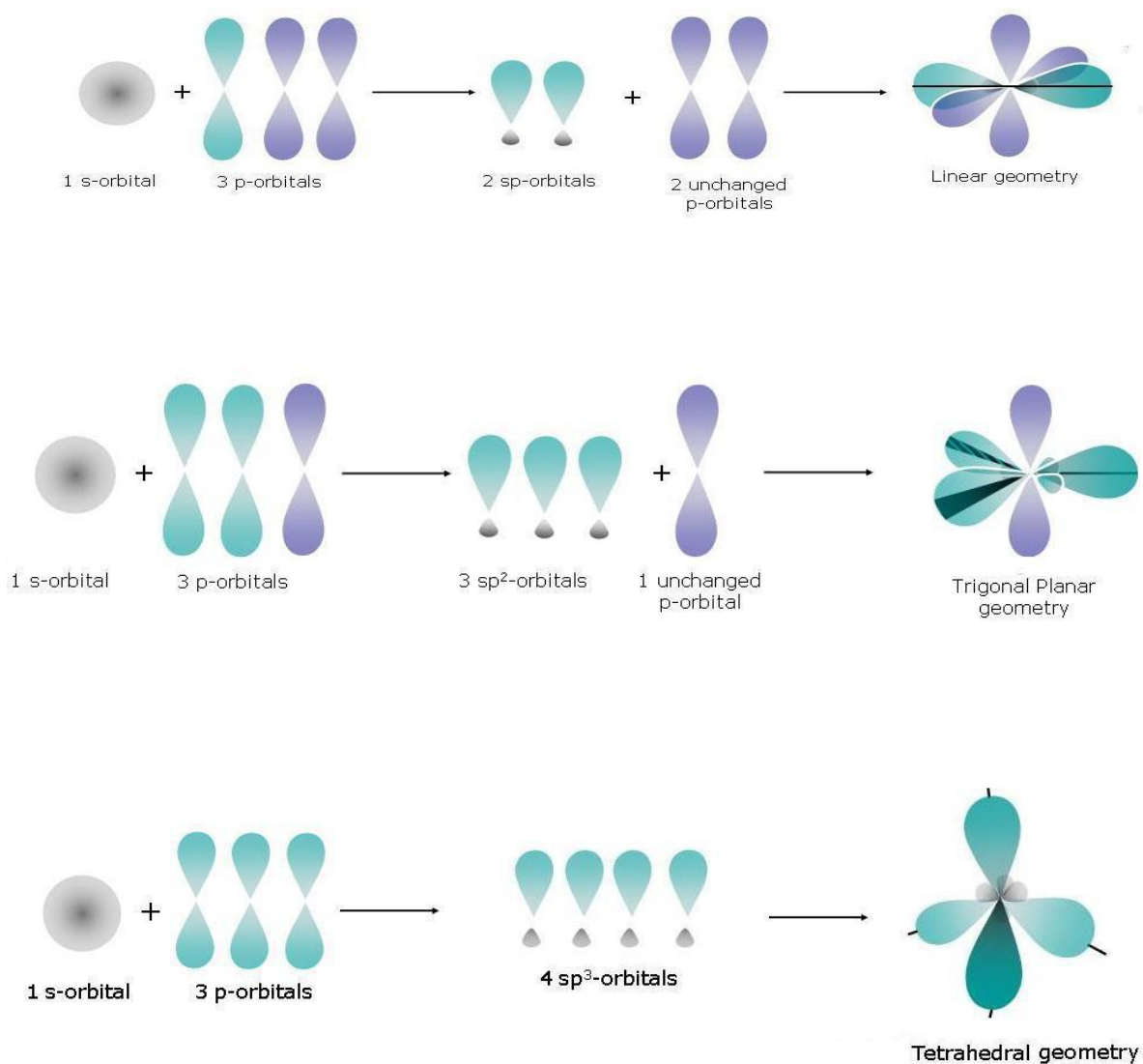
شکل ۵-۱: پیوندهای کربن و هیدروژن در مولکول اتان (سه پیوند ناشی از sp^2 از نوع σ و پیوند ناشی از همپوشانی دو پیوند P از نوع π)

بسته به تعداد پیوندهای کربن با اتم‌های دیگر ترکیب دیگری از پیوندها مانند sp^1 نیز وجود دارد. زمانی که در اتم کربن تنها یکی از اوربیتال‌های p مثلاً p_x با اوربیتال s ترکیب گردد دو پیوند ترکیبی sp^1 ایجاد می‌شوند. این نوع پیوندها در هیدروکربن‌هایی نظیر استیلن (C_2H_2)، که در آن اتم‌های کربن با دو اتم کربن و هیدروژن دیگر پیوند دارد برقرار می‌باشد. در این مولکول اتم‌های کربن با پیوند سه گانه به یکدیگر و با پیوندی یگانه به اتم‌های هیدروژن متصل است که ساختار مولکولی اتم استیلن در شکل ۶-۱ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱: ساختار مولکولی اتم استیلن

پیوند کربن - هیدروژن و یکی از پیوندهای کربن - کربن از نوع σ هستند و دو پیوند کربن - کربن دیگر از نوع پیوندهای π هستند. همان طور که گفته شده است بطور کلی پیوندهای کربن با کربنهای دیگر در طبیعت شامل سه هیبریداسیون SP^1 , SP^2 , SP^3 می باشد که در شکل ۷-۱ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۷-۱: شماتیکی از تمام هیبریداسیون اتم کربن شامل ساختار هیبریدی SP^1 , SP^2 , SP^3

با توجه به انواع مختلف هیبریداسیون اتم کربن که دارای ویژگی ساختاری و خواص متفاوتی می باشند

ویژگی چند نوع از آلوتروپ‌های کربن در جدول (۱-۱) آورده شده است.

جدول ۱-۱: مقایسه ویژگی‌های مهم آلوتروپ‌های کربن [۵]

Hardness(Gpa)	Gap(eV)	Density(g/cm ³)	H(%)	sp ³ (%)	
۱۰۰	۵/۵	۳/۵۱۵	۰	۱۰۰	الماس
	۰	۲/۲۶۷	۰	۰	گرافیت
	۱/۶		۰	۰	C ₆₀
۳	۰/۰۱	۱/۳-۱/۵۵	۰	۰	کربن شفاف
۳	۰/۴-۰/۷	۱/۹	۰	۰	کربن تبخیر شده
	۰/۵	۲/۲	۰	۵	کربن کندوپاش شده
۸۰	۲/۵	۳/۱	۰	۸۰-۸۸	ta-C
<۱۰	۱/۷-۴	۱/۲-۱/۶	۴۰-۵۰	۶۰	a-C:H نرم
۱۰-۲۰	۱/۱-۱/۷	۱/۶-۲/۲	۳۰-۴۰	۴۰	a-C:H سخت
۵۰	۲-۲/۵	۲/۴	۳۰	۷۰	ta-c:H
۰/۰۱	۶	۰/۹۲	۶۷	۱۰۰	پلی اتیلن

۳-۱ کربن شبه‌الماسی

امروزه پیشرفت‌های مهمی در علم کربن که شامل رسوب بخار شیمیایی الماس، کشف C_{۶۰} و نانو تیوپ-های کربنی و همچنین توسعه فیلم‌های آمورف کربنی می‌باشد صورت گرفته است. کربن آمورف یا کربن

بی‌شکل، کربنی آزاد و واکنشی است که هیچ ساختار بلورینگی در آن دیده نمی‌شود. کربن آمورف در حالت کلی با نام $a-C^1$ و کربن آمورف هیدروژنی به شکل $a-C:H^2$ یا HAC و کربن آمورف هرمی (چهار گوشه) با $ta-C^3$ نمایش داده می‌شود. کربن آمورف در واقع اشاره به شبکه بسیار نامنظم اتم‌های کربن دارد. اگرچه کربن آمورف در محدوده وسیع نظم‌ی ندارد ولی گاهی نظم‌هایی در محدوده کوچکی از آن دیده می‌شود. ماهیت این نظم‌های کوچک بطور معین با توجه به روش تهیه فیلم‌های آمورف کربنی تغییر می‌کند. لذا خصوصیات فیلم‌های کربن آمورف وابسته به روش‌های تهیه آن می‌باشد. دو پارامتر پیوند کربنی (نسبت پیوندهای sp^3/sp^2) و میزان هیدروژن، برای شناسایی نظم‌ها در محدوده کوچک، پارامترهای بسیار مهمی هستند [۵]. کربن شبه‌الماسی که به اختصار DLC^4 نامیده می‌شوند یک اصطلاح کلی برای یک کلاسی از فیلم‌های آمورف کربنی تشکیل شده از یک ساختار مخلوطی الماسی با پیوند SP^3 و گرافیتی با پیوند SP^2 می‌باشد. نسبت SP^3/SP^2 به طور قابل توجهی تعیین کننده خواص و ساختار این نوع از فیلم‌های آمورف کربنی می‌باشند [۸] که اولین فیلم‌های کربن شبه‌الماسی توسط آیزنبرگ و چابوت^۵ ایجاد شده است [۹]. از اوایل سال ۱۹۷۰ با کشف فیلم‌های نازک شبه‌الماسی که به عنوان یک ماده برای کاربردهای صنعتی، پزشکی و ... می‌باشد علائق زیادی را به خود جلب کرد تا به امروز پیشرفت‌های بسیار گسترده‌ای در کاربرد و روش‌های لایه‌نشانی این نوع از فیلم‌ها صورت گرفته است [۱۰]. خواص فیزیکی این فیلم‌ها به سبب پیوند-های SP^3 و همچنین خواص الکتریکی و اپتیکی آن به سبب پیوندهای SP^2 می‌باشد. فیلم‌های کربن شبه‌الماسی دارای ویژگی‌های منحصر به فرد مکانیکی، اپتیکی، تریبولوژیکی مانند سختی بالا، ضریب اصطکاک پایین، مقاوت سایشی، عدم تحریک شیمیایی، شفافیت اپتیکی بالا در ناحیه فروسرخ (IR) و گاف نواری

¹Amorphous carbon

²Hydrogenated amorphous carbon

³Tetrahedral amorphous carbon

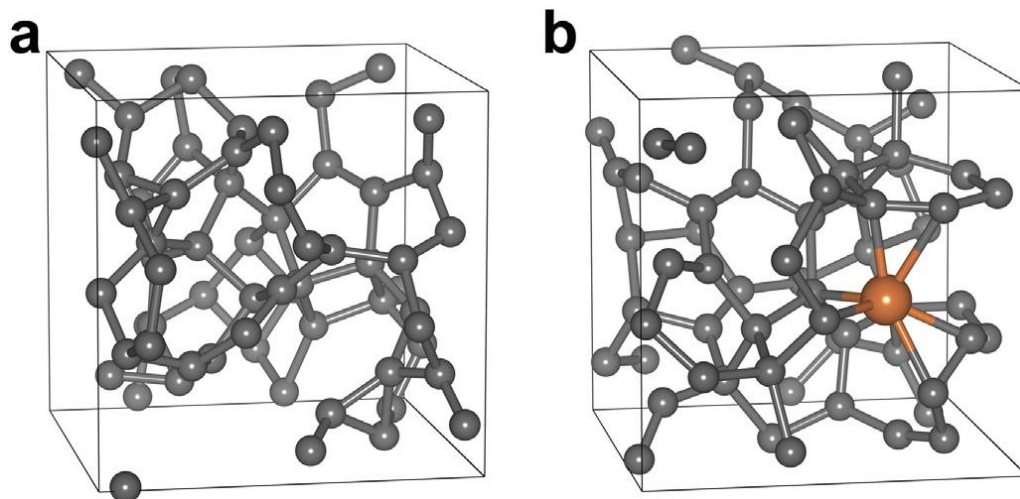
⁴Diamond-like carbon

⁵Aisenberg and Chabot

وسیع می‌باشند. این ویژگی‌ها، فیلم‌های DLC را برای کاربردهای صنعتی، پزشکی و نظامی گوناگون مهم و مفید ساخت، که به عنوان پوشش‌های محافظ اپتیکی و مکانیکی در سلول‌های خورشیدی و ابزارهای برشی صنعتی مانند مته‌های صنعتی و همچنین پوشش‌های بیومدیکال مورد استفاده قرار می‌گیرد. از دیگر کاربردهای فیلم‌های DLC ساخت دستگاه‌های میکروالکترومکانیک با استفاده از این نوع از پوشش‌ها و در زمینه های اپتیکی مانند پوشش‌های عبوردهنده اپتیکی مناسب در ناحیه مادون قرمز (IR) که به عنوان پنجره‌های اپتیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۱]، روکش‌های اپتیکی ضد بازتاب، پوشش‌های محافظتی در صفحه‌های حافظه مغناطیسی و همچنین در زمینه پزشکی مانند چیپ‌ها و حسگرهای زیستی هستند [۱۲] علاوه بر این خواص فیلم‌های DLC می‌تواند بوسیله افزودن عناصر شیمیایی دیگر نسبت به کربن و هیدروژن در فیلم‌ها کنترل شود [۱۳]. امروزه افزودن فلزات در زمینه‌های علوم و مهندسی فیلم‌های DLC اهمیت بسزایی را به سبب سهمی از استرس باقی مانده ذاتی پایین‌تر و چسبندگی بهتر فیلم‌های DLC خالص روی زیرلایه ایفا می‌کند. همچنین به خاطر همین دلایل ناخالصی‌های فلزی افزوده شده به فیلم‌های کربن شبه‌الماسی خواص اپتیکی و تریبولوژیکی فیلم‌ها را بهبود می‌بخشد [۱۴]. امروزه افزودن تنها چند درصد ناخالصی فلزی در ساختار فیلم‌های آمورف کربنی باعث افزایش چسبندگی به زیرلایه، افزایش مقاومت به سایش و روانکاری می‌شود [۱۵، ۱۶]. افزودن ناخالصی فلزی به فیلم‌های آمورف کربنی در بسیاری از کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۷]. ویژگی‌های اپتیکی و الکترونی این فیلم‌ها برای کاربردهای فتوولتائیک (PV)، سلول‌های خورشیدی و اصلاح انرژی گاف نواری اپتیکی در رنج وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۸] که افزودن ناخالصی فلزی به فیلم‌های آمورف کربنی سبب افت مقاومت الکتریکی و تغییر در رسانایی فیلم‌ها می‌شود [۱۹]. لازم به ذکر است که ساختار و خواص فیلم‌های کربن شبه‌الماسی با ناخالصی فلزی بطور قابل توجهی به ویژگی ناخالصی فلزی افزوده شده به آن وابسته است. برای افزودن ناخالصی‌های فلزی به فیلم‌های آمورف کربنی در واقع با دو نوع از ناخالصی‌ها روبرو خواهیم شد. دسته‌ای از ناخالصی‌هایی مانند (W, Ti)

(Cr, V, ... و ...) که با کربن واکنش داده و تشکیل کاربید می‌دهند و به فلزات سخت مشهورند [۱۷]. وجود این عناصر در فیلم‌های DLC موجب می‌شود که سختی و نرخ سایش بوسیله تشکیل فاز سخت کاربید عمدتاً بهبود یابند [۱۴]. دسته دوم از ناخالصی‌های فلزی که با کربن واکنش نمی‌دهند و کاربید تولید نمی‌کنند به فلزات نرم مشهورند مانند (Cu, Pd, Pt, Au, Ag, ...) [۲۰, ۲۱] که این نانو ذرات منجر به رشد نانو کامپوزیت و همچنین ترکیب سودمندی از سختی بالا، مقاومت سایشی، شفافیت اپتیکی، نفوذ شیمیایی و همچنین سازگاری زیستی فیلم‌های کربن شبه‌الماسی می‌شود. از این رو نانو ذرات فلزی گروه IB (گروه ۱۱) جدول تناوبی که شامل طلا، نقره و مس می‌باشد به دلیل دارا بودن برخی ویژگی‌های منحصر به فرد خود مانند حضور رزونانس پلاسمون سطحی، اثر ضد باکتریال و عدم تشکیل کاربید در مخلوط کربنی می‌توانند گزینه مناسب به عنوان ناخالصی فلزی به فیلم‌های آمورف کربن اضافه شوند و کاربردهای بسیاری در صنعت و پزشکی ایجاد کنند. از نانو ذرات فلزی گروه IB، مس (Cu) دارای برخی مزایای بالاتری نسبت به Au و Ag می‌باشد [۱۳]. باتوجه به عدم تعادل شیمیایی که اثرات اپتیکی مفید را از بین می‌برد فیلم‌های DLC به عنوان ماتریس دی‌الکتریک برای پراکندگی مختلف نانو ذرات و تولید مواد نانو کامپوزیتی با خواص اپتیکی و ساختاری مناسب است [۲۲]. در شکل ۱-۸ ساختار کربن شبه‌الماسی با ناخالصی نانو ذرات مس افزوده شده به آن نشان داده شده است [۲۳]. نانو ذرات فلزی گروه IB نوسانات مربوط به الکترون‌های هدایت را نشان می‌دهد، نانو ذرات پلاسmoni کاربردهای ویژه‌ای دارد که منجر به به افزایش و تنظیم هندسی لبه جذب و پراکندگی رزونانسی می‌شود برای مثال کاربردهایی در موجبرهای انتقال انرژی اپتیکی، سوئیچ-های اپتیکی، افزایش اثرات اپتیکی غیرخطی، حسگرهای زیستی، تصویر برداری و درمان سرطان دارند. در مورد مس و طلا اثر رزونانس سطحی در دامنه مشابه‌ای در بسیاری از امواج الکترومغناطیسی مشاهده شده

است، که مس نسبت به طلا دارای مزایای ویژه‌تری همچون ارزان‌تر بودن و سازگاری بستری با دستگاه‌های نیمه هادی نیز دارا می‌باشد.



شکل ۸-۱: مدل a ساختار کربن شبه‌الماسی و مدل b ساختار کربن شبه‌الماسی با ناخالصی فلزی مس (حدود ۱.۵۶٪ اتمی مس) افزوده شده به آن را نشان می‌دهد [۲۳].

نانوذرات مس در واکنش‌های شیمیایی به عنوان کاتالیست به کار می‌روند، همچنین به علت هدایت الکتریکی بالا در صنایع الکترونیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ذرات در مهندسی مواد به عنوان آلیاژ فلز و پوشش‌های ضد خوردگی و سایش حائز اهمیت می‌باشند [۲۴]. اگرچه فلز مس مستعد اکسیداسیون می‌باشد اما ماتریس DLC می‌تواند حفاظی را برای تثبیت این نانو ذرات فراهم کنند. پوشش‌های ایجاد شده نه تنها به عنوان مواد پلاسمونی بلکه همچنین به عنوان مواد سخت کاری یا پوشش‌های مکانیکی، آنتی باکتریالی و اپتیکی را دارا می‌باشند [۲۲]. تقویت میدان پلاسمونی از کاربردهای فعال نانو ذرات برای بهبود برداشت نور خورشیدی و فوتوکاتالیز بعد از فروپاشی پلاسمون هست، که الکترون حفره‌هایی در نانو ذرات تولید می‌کنند و یک بخش قابل توجهی از این الکترون‌ها تونل زنی می‌کنند و به باند رسانش که منجر به جریان الکتریکی قابل توجهی در نیمه رسانا می‌شوند منتقل می‌شوند [۲۵]. مس گنجانده شده در فیلم DLC قادر است با تغییر محتوا و روش‌های اضافه کردن آن خواص اپتیکی را در فیلم‌ها کنترل کند. تنظیم

خاصیت اپتیکی فیلم‌های DLC به شدت با تغییر ساختار آن‌ها مرتبط است که معمولاً توسط فناوری رسوب و فرآیند آماده سازی تعیین می‌شود. ساختار خصوصیات مکانیکی، اپتیکی فیلم‌های DLC را می‌توان با معرفی لایه نازک Cu تنظیم کرد [۲۶].

۱-۴ انواع روش‌های لایه‌نشانی

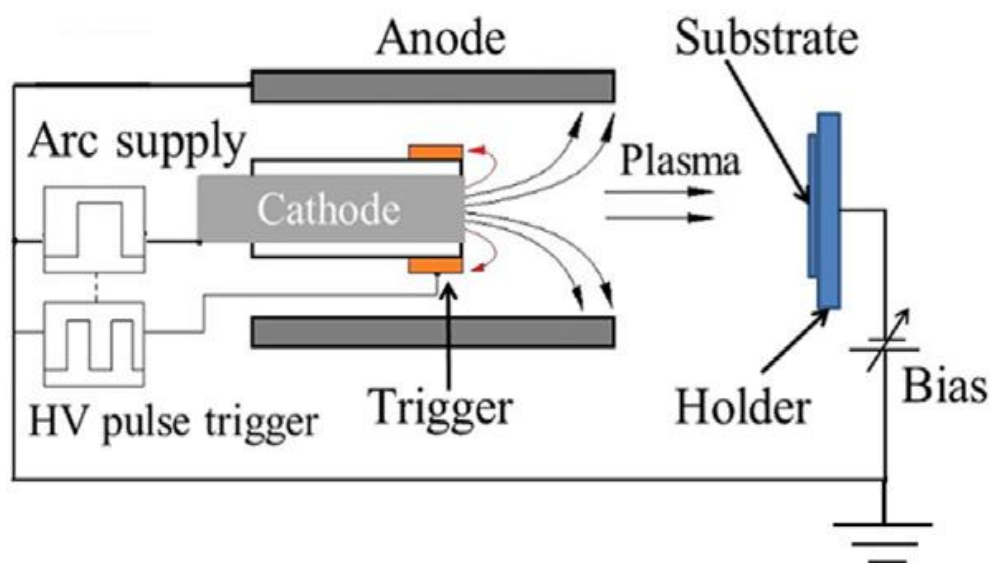
پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های پوششی سبب شده است تا برخی از خواص فیلم‌های نازک که حتی در یک دهه گذشته غیر قابل تحقق بودند اکنون امکان تحقیق و توسعه برای این بخش از علم فراهم شود. تکنیک‌های پوششی تحت خلا و مبتنی بر پلاسما و بر پایه یون در ابتدای این توسعه‌های جدید قرار گرفته‌اند [۲۷]. فرآیندهای رسوب فیلم‌های آمورف کربنی به شرایطی همچون دما، انرژی یون و فشار کاری بسیار حساس است زیرا چنین شرایطی به شدت بر روی غلظت هیبریداسیون sp^2 و sp^3 تاثیر گذار بوده و از این رو خواص فیزیکی، الکترونیکی و اپتیکی فیلم‌های کربن آمورف را تغییر می‌دهد. به همین دلیل انتخاب روش مناسب برای ایجاد فیلم‌های با کیفیت بالا بسیار مهم است. با توجه به این نکته که روش لایه‌نشانی فیلم‌های آمورف کربنی در سال‌های اخیر رواج بیشتری داشته به برخی از فواید و معایب این روش‌ها نیز اشاره خواهد شد.

۱-۴-۱ لایه‌نشانی به روش قوس الکتریکی کاتدی

تبخیر قوس کاتدی یکی از روش‌هایی رسوب بخار فیزیکی (pvd^1) است که بطور گسترده در صنعت برای رسوب فیلم‌های آمورف کربنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تکنولوژی استفاده شده در این روش از لایه‌نشانی بر پایه پلاسما بوده که برای ساخت فیلم‌های رسوبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. منبع تغذیه مورد

¹Physical vapor deposition

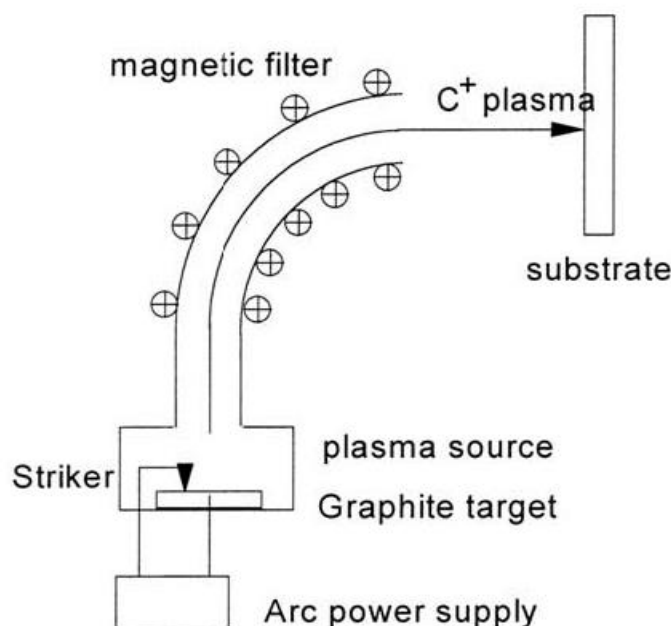
استفاده در این نوع سیستم‌ها برای ایجاد قوس و تولید پلاسما در یک محیط خلاء بدین صورت است که ولتاژ در آن پایین و جریان بالا نگه داشته می‌شود. یک نمونه از سیستم تبخیر قوس کاتدی در شکل ۹-۱ نشان داده شده است. در کاتد، جریان قوس خلا در تعداد کمی از نقاط گسسته متمرکز شده اند که نقاط کاتدی نامیده می‌شود. تشکیل نقطه کاتدی یکی از مشخصه‌های اساسی تخلیه قوسی تحت خلا می‌باشد. اندازه نقاط در حدود 10^{-10} تا 10^{-6} متر است. همچنین چگالی جریان در نقاط کاتدی در مرتبه $10^8 - 10^6 \text{ A cm}^{-2}$ خواهد بود. ولتاژ قوس بطور معمول در حدود $30\text{V} - 10\text{V}$ می‌باشد که مطابق مواد مورد استفاده تغییر می‌کند. جریان حامل توسط یک نقطه کاتدی معمولاً از چند تا چند ده آمپر است.



شکل ۹-۱: شماتیکی از دستگاه تبخیر قوس کاتدی

نقطه قوس کوچک است و بوسیله فرآیند انتشار منفجر شونده تشکیل می‌شود و طول عمر (زمان اقامت) نقاط فرودی در مکان‌های ثابت در حدود 10^{-10} ثانیه می‌باشد. تبخیر قوس کاتدی می‌تواند انرژی پلاسمایی با چگالی یونی از مرتبه 10^{13} cm^{-3} تولید کند. در مرحله تشکیل قوس کاتدی هر دو پلاسما مورد نظر (گونه های اتمی یونیزه شده) و ذرات ناخواسته تولید می‌شوند. مجموعه نقاط کاتدی یک سیر صعودی برای چگالی

پلاسمایی در کاتد ایجاد می‌کند. قوس کاتدی خلاء فیلتر شده (^۱FCVA) یک سیستم اصلاح شده با یک فیلتر و میدان مغناطیسی ثابت شده در آن است، که در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است. از این روش برای ایجاد پوشش‌های سخت مانند ابزارهای برشی و محافظتی در صنعت استفاده می‌شود [۲۸-۳۱].



شکل ۱-۱۰: شماتیکی از سیستم قوس کاتدی خلاء فیلتر شده (FCVA)

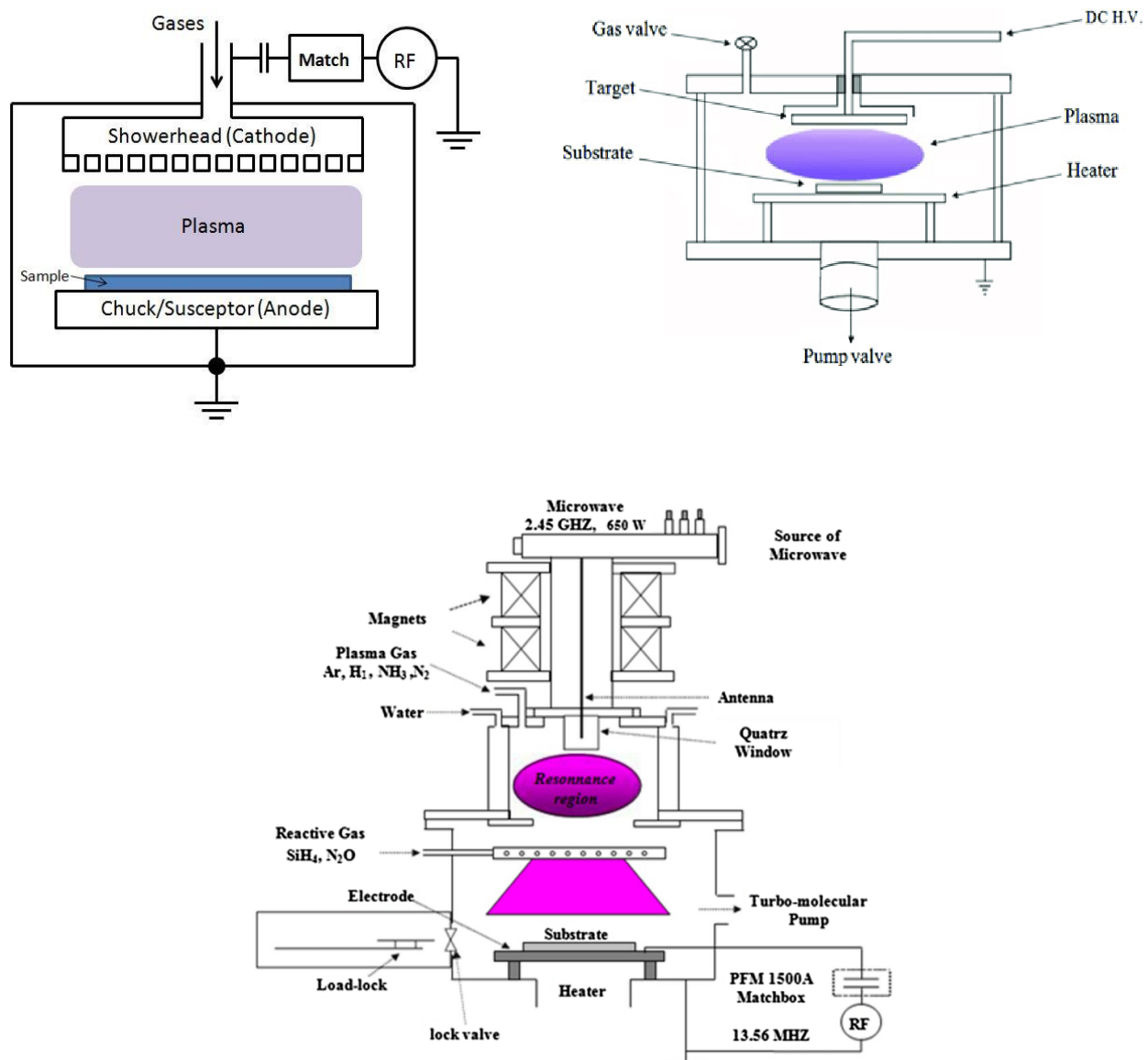
۱-۴-۲ لایه‌نشانی تبخیر بخار شیمیایی به کمک پلاسما (^۲PECVD)

یکی از روش‌هایی که بطور گسترده برای تولید فیلم‌های آمورف کربنی مورد استفاده قرار می‌گیرد تبخیر شیمیایی به کمک پلاسما (PECVD) می‌باشد. مکانیزم کلی این روش تحریک یا فعال‌سازی پیش‌سازها به وسیله ایجاد کردن یک پلاسما در فاز بخار و گسترش واکنش‌های شیمیایی می‌باشد که در غیر این

^۱Filtered Cathodic Vacuum Arc

^۲Plasma-enhanced chemical vapor deposition

صورت برای رسیدن به آن از طریق روش‌های معمولی دشوار و حتی غیر ممکن است. بر اساس شکل‌های مختلف تحریک پلاسمایی، PECVD را می‌توانیم بیشتر به صورت‌های PECVD جریان مستقیم (DC-)، PECVD، فرکانس رادیویی (RF-PECVD)، PECVD رزونانس الکترونی سیکلوترون (ECR-PECVD) مرتب سازی نمود. الگوی شماتیکی از روش‌های PECVD در شکل ۱-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۱: شماتیکی از سیستم های RF-PECVD, DC-PECVD, ECR-PECVD [۹۲]

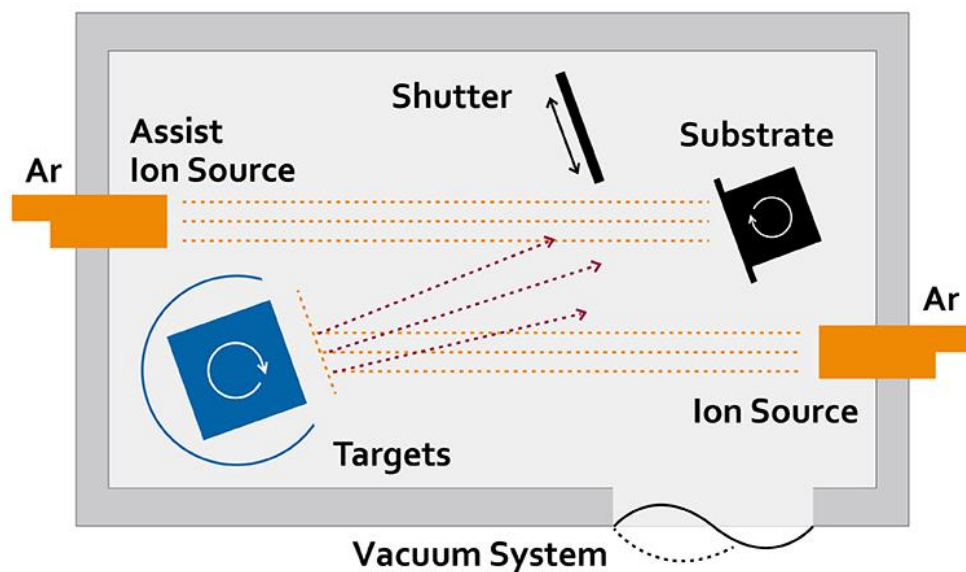
برای رسوب فیلم‌های کربن آمورفی گاز پیشرو (به عنوان مثال اتان و استون) به وسیله فرآیند تخلیه تابان به انواع مختلفی از گونه‌های خنثی مانند CH ، CH_3 ، H و یون‌های CH^+ ، H^+ ، C^+ تجزیه خواهد شد. یون‌ها زیرلایه را بمباران کرده و در آن رسوب می‌کنند. همچنین با اعمال یک ولتاژ بایاس به زیرلایه و تنظیم مقدار ولتاژ بایاس می‌توان خواص فیلم را تنظیم نمود. برای تولید فیلم‌های آمورف کربنی اگرچه روش‌های معمولی مانند CVD^1 در دمای بالا مناسب هستند اما این روش‌ها در انتخاب زیر لایه و همچنین افزودن ناخالصی دارای محدودیت می‌باشند که یکی از مزایای روش PECVD دمای رسوب نسبتاً کم ($> 350^\circ$) در مقایسه با روش‌های معمول CVD است، که اجازه می‌دهد تا مواد حساس به دما مانند آلومینیوم، استیل آستینی، و حتی پلیمرها هم به عنوان بستر مورد استفاده قرار گیرند [۳۲]. همچنین عدم تطابق انبساط حرارتی بین فیلم و زیرلایه می‌تواند کاهش پیدا کند زیرا دمای رسوب پایین منجر به به کاهش استرس در فیلم‌ها می‌شود [۳۳]. مزیت دیگر انعطاف‌پذیری شکل بستر است. بسترهایی با شکل پیچیده سه بعدی مانند لوله‌ها می‌توانند توسط PECVD با ضخامت یکنواخت پوشش داده شوند. چشمه‌های کربنی که به طور معمول برای ساخت فیلم‌های آمورف کربنی به وسیله PECVD مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل گاز هیدروکربن مانند متان و استیلن هستند. در نتیجه، اکثر فیلم‌های آمورف کربنی ساخته شده توسط PECVD حاوی مقدار قابل توجهی هیدروژن هستند که معمولاً بالاتر از ۲۰٪ می‌باشند [۳۴]. از طرفی، این ناخالصی‌سازی با هیدروژن می‌تواند استرس داخلی فیلم را در مقایسه با موارد غیرهیدروژنی کاهش دهد. همچنین اتم‌های هیدروژن (پیوند شبه پلیمر C-H) می‌تواند سختی فیلم را کاهش دهد. اتم‌های هیدروژن می‌توانند پیوندهای اتم کربن با یکدیگر را غیرفعال کنند و پیوندهای C-H SP^3 تشکیل بدهند که این نوع از پیوند به سختی و مدول الاستیک فیلم‌های آمورف کربنی مانند پیوند C-C SP^3 کمک نمی‌کنند. به همین دلیل فیلم‌های آمورف کربنی هیدروژنی ساخته شده بوسیله PECVD به طور معمول

¹Chemical vapor deposition

سختی کمتری در مقایسه با فیلم‌های آمورف کربنی غیرهیدروژنی دارند. از این رو آقای پارک و همکاران^۱ [۳۵] یک فیلم آمورف کربنی هیدروژنی را به روش PECVD و با استفاده از گاز CH_4 روی یک ویفر Si رسوب دادند، و بعد از آن، پلاسمای CF_4 برای حکاکی^۲ کردن لایه نازک آمورف کربنی لایه‌نشانی شده مورد استفاده قرار گرفت. پیوندهای C-H را می‌توان بوسیله رادیکال‌های F حکاکی کرد، و بقیه اتم‌های کربن می‌تواند برای تشکیل فیلم کربن آمورفی بدون هیدروژن باقی بمانند [۳۶].

۳-۴-۱ لایه‌نشانی به روش پرتو یونی (IBD^۳)

اولین فیلم آمورف کربنی که در مقالات علمی گزارش شده است از طریق روش پرتو یونی و به وسیله آیزنبرگ و کابوت در دهه ۷۰ میلادی لایه‌نشانی شده است [۳۷]. یک نوع از روش لایه‌نشانی به کمک پرتوهای یونی بصورت شماتیک در شکل ۱۲-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۲-۱: نمای شماتیک از لایه‌نشانی به روش پرتو یونی

^۱ Park

^۲ Etch

^۳ Ionic beam deposition

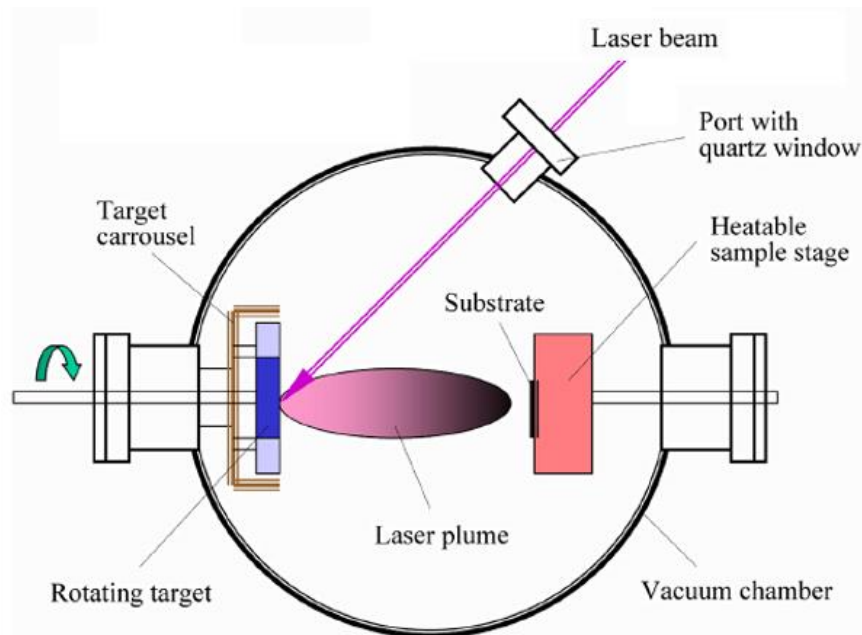
در این روش یون‌های کربن می‌توانند بوسیله کندوپاش پلاسمایی از یک کاتد گرافیتی و یا گاز هیدروکربنی مانند متان به عنوان چشمه یونی استفاده کنند و سپس توسط الکترون‌های پرنرژی (تولید شده به وسیله رشته داغ) یونیزه تولید شوند [۳۸] پس از آن، پرتو یونی از چشمه پلاسمایی توسط یک توری استخراج می‌شود. در یک محفظه خلا بالا، یون‌های کربن/هیدروکربن پس از پرتو یونی شتاب می‌گیرند. در هر دو مورد، از آنجایی که چشمه یونی در یک فشار محدود اجرا می‌شود، پرتو حاوی یک نسبت بالایی از ذرات خنثی یونیزه نشده ویژه می‌باشد، که منجر به ایجاد شار نسبتاً کمی از یون‌ها به ذرات خنثی در حدود ۱۰٪-۲ گزارش شده است. بهترین محدوده انرژی برای شتاب چنین چشمه‌های یونی، بین ۱۰۰-۱۰۰۰ eV است.

۱-۴-۴ لایه‌نشانی به روش لیزر پالسی (PLD)^۱

در لایه‌نشانی لیزر پالسی (PLD)، لیزرهای محرک پالسی شبیه ARF که دارای پالس‌های خیلی کوتاه و پرنرژی می‌باشند می‌توانند برای تبخیر مواد و همچنین تولید یک پلاسما قوی مورد استفاده قرار گیرند. انرژی یون‌ها در این روش به فرکانس لیزر وابسته است [۷]. PLD یا لیزرهای پالسی برای استفاده آزمایشگاهی مفید بوده و همچنین توانایی بسیار بالایی برای رسوب مواد مختلف مانند ابررساناهای دمای بالا و پوشش‌های فوق سخت را دارا می‌باشند. تصویر شماتیک از فرآیند لایه‌نشانی بوسیله لیزر پالسی در شکل ۱-۱۳ نشان داده شده است. در سال‌های اخیر با توسعه تکنولوژی PLD، این روش از لایه‌نشانی برای تولید فیلم‌های DLC جدید با کاربرد متفاوت مناسب شده است. پالس‌های فمتو ثانیه (بطور معمول در محدوده ۱۵۰ fs)، می‌تواند یک چگالی توان به شدت بالا، حداکثر تا $10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ ارایه دهد. در مقایسه با انواع روش‌های معمول PLD (در محدوده نانو ثانیه)، اتم‌های کربن تولید شده از این روش سرعت بسیار بالاتری دارد به طوری که می‌توان انرژی جنبشی خیلی بالا و تا حدود ۱ keV به دست بیاورند [۳۹]. به

^۱Pulse laser deposition

همین دلیل فرآیند کاشت (رسوب) بوسیله این اتم‌های کربن پرانرژی آسان خواهد شد. همچنین بعضی از اتم‌های کربن ضربه زننده می‌توانند در سطح زیرلایه نفوذ کرده و یک چسبندگی قوی‌ای بین فیلم آمورف کربنی و زیرلایه ایجاد کنند.



شکل ۱-۱۳: الگویی از لایه‌نشانی به روش لیزر پالسی (PLD)

فیلم‌های آمورف کربنی رسوب گذاری شده بوسیله فرآیند PLD فمتوثانیه با غلظت SP^3 ۷۰٪ ضریب اصطکاک فوق العاده پایین در حدود ۰/۱ ایجاد می‌کند. فیلم‌های آمورف کربنی تولید شده با استفاده از این روش هنگامی که با یک سطح مقطع توپ فولادی کشیده می‌شوند رفتاری با نرخ سایش $10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ × ۱/۶ تحت یک فشار تماسی ۰/۵ GPa از خود نشان می‌دهد.

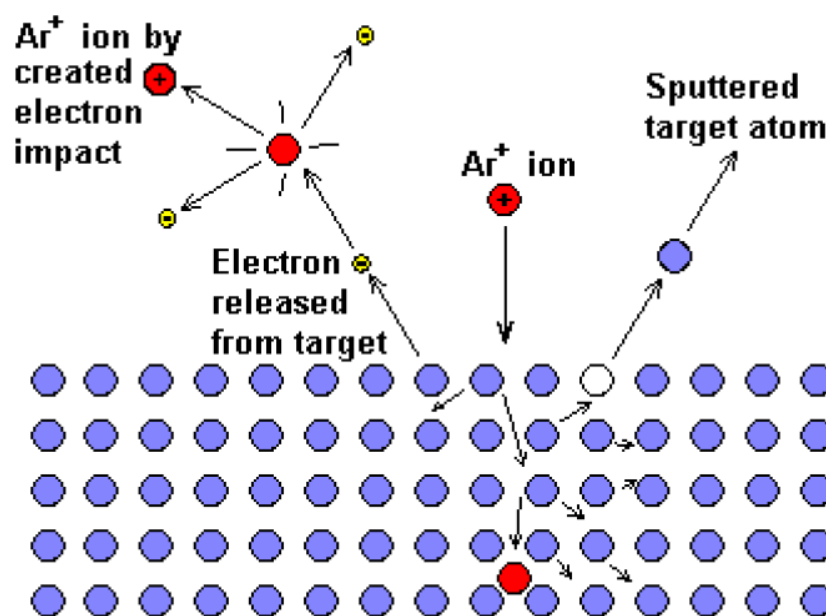
۵-۴-۱ لایه‌نشانی به روش کندوپاش

فرآیند کندوپاش برای رسوب بر روی زیرلایه امروزه بطور کامل شناخته شده است که برای لایه‌نشانی مواد مختلف در صنعت، پزشکی و ... از آن استفاده می‌شود. کندوپاش بطور معمول شامل تجزیه یک کاتد

با ایجاد یون‌های گازی در یک محیط کم فشار برای وارد شدن به کاتد و بیرون آمدن اتمی از سطح کاتد است. اتم‌ها از سطح کاتد خارج می‌شوند و سپس به علت هجوم به سمت یک زیرلایه بر روی آن به صورت لایه‌نشانی قرار خواهند گرفت [۴۰]. کندوپاش یکی از رایج‌ترین روش‌های صنعتی برای سنتز فیلم‌های آمورف کربنی است. همان طور که گفته شد در روش کندوپاش ساخت فیلم‌ها مستلزم رشد فیلم از پس‌زنی ذرات از بعضی مواد هدف می‌باشد. این پس‌زنی ذرات از ماده هدف منجر به یک برخورد و تبادل تکانه بین سطح مواد هدف و بعضی گونه‌های ذرات دارای انرژی که ماده هدف را بمباران می‌کنند، می‌شوند و سپس ذرات خارج شده بر سطوح محیط اثر می‌گذارند. زیرلایه برای رشد فیلم‌ها به گونه‌ایی قرار داده شده است که ذرات پراکنده شده روی سطح آن متراکم شوند تا تشکیل فیلم روی سطح زیرلایه آغاز شود. بازده کندوپاش به جرم ذرات درگیر، انرژی برخوردی گونه‌های بمباران و انرژی اتصال سطح به مواد ماده هدف بستگی دارد. انرژی اتصال ماده هدف منجر به ایجاد یک آستانه پرانرژی می‌شود که باید برطرف شود تا کندوپاش انجام شود. در انرژی‌های کم ممکن است یک رویداد ضربه‌ایی رخ دهد. در یک اتفاق ضربه‌گیری^۱ گونه‌های رویداد با یک اتم هدف برخورد می‌کنند و انرژی کافی را برای جابجایی اتم هدف عمیق‌تر در ماده هدف انتقال می‌دهد. ممکن است انرژی کافی در تعامل‌های بعدی با ماده مورد نظر منتقل شود تا باعث کندوپاش شود. انرژی آستانه برای بسیاری از مواد بین ۵-۴۰ eV گزارش شده است [۴۱]. در انرژی‌های بالاتر نفوذ به هدف ممکن است بیشتر رخ دهد، و برخوردهای آبشاری ایجاد شود. به طور کلی دو دسته‌بندی برای مکانیزم رسوب کندوپاش وجود دارد که در بعضی وقت‌ها پرتو یونی و در مواردی هم تخلیه تابان مطرح شده است [۴۲]. همان طور که از نام آن مشخص است در یک مکانیزم کندوپاش پرتو یونی یک پرتوی از یون‌های ضربه زننده روی ماده هدف هدایت می‌شوند و متعاقباً کندوپاش از مواد ماده هدف انجام می‌شود. در حالی که در روش تخلیه تابان یک پلاسما در محفظه رسوب ایجاد می‌شود. این پلاسما روشن شده، به

^۱Knock-on

عنوان ماده هدف برای فرآیند کندوپاش به کار برده می‌شود. الکترون‌ها توسط میدان شتاب می‌گیرد و به یونیزه کردن گاز محیط کمک می‌کند که به نوبه خود الکترون‌های بیشتری تولید می‌کند و متعاقبا آبشار-هایی برای روشن شدن پلاسما می‌سازد. در شکل ۱-۱۴ نمایی از نحوه کندوپاش از ماده هدف را نشان داده شده است.

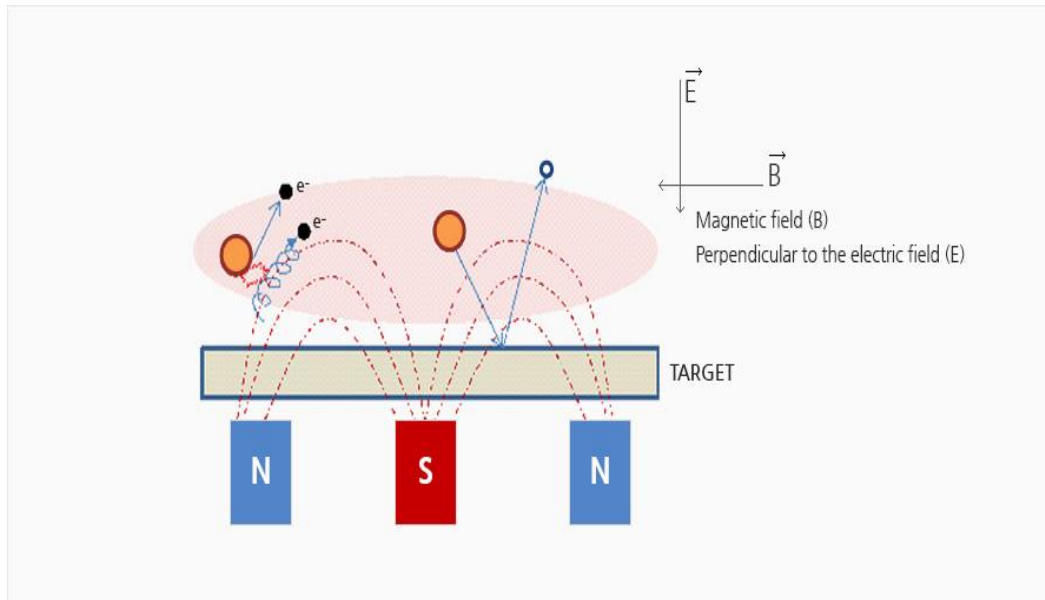


شکل ۱-۱۴: شماتیکی از روش کندوپاش در بمباران ماده هدف توسط یون‌های آرگون

۱-۵-۴-۱ کندوپاش مغناطیسی

کندوپاش مغناطیسی یک روش کندوپاش تخلیه تابان برای لایه‌نشانی فیلم‌های نازک می‌باشد. در کندوپاش مغناطیسی آهنرباها (دائمی یا الکترومغناطیسی) در نزدیکی کاتد (ماده هدف) هدف به طور موازی قرار می‌گیرند تا الکترون‌های ثانویه تولید شده را در مجاورت هدف محدود کند. در نتیجه برآیند میدان $E \times B$ از ترکیب کاتد منفی و مگنترون ثابت منجر به افزایش چگالی پلاسما می‌شود. این افزایش چگالی به این دلیل می‌باشد که الکترون‌ها با حضور میدان مغناطیسی یک مسیر طولانی‌تری را طی می‌کنند و برخورد-ها با حضور این میدان بیشتر شده و یونیزاسیون در محیط به صورت آبشاری افزایش یافته و سبب افزایش

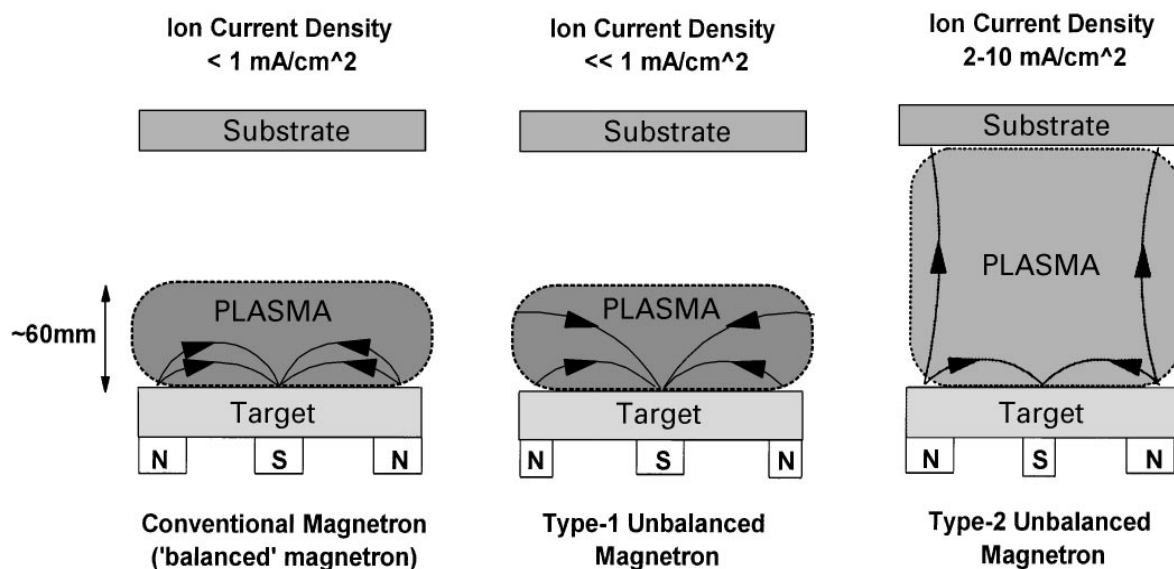
چگالی پلاسما در محفظه می‌شوند. در واقع برآیند میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی سبب افزایش برخوردها شده و یونیزاسیون گاز کاری (آرگون) را افزایش می‌دهد که این افزایش یونیزاسون، چگالی پلاسما را نیز افزایش خواهد داد که در شکل ۱-۱۵ شماتیکی از سیستم کندوپاش مغناطیسی نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۵: شماتیکی از سیستم کندوپاش مغناطیسی تعادلی

در سیستم کندوپاش مغناطیسی نحوه قرار گرفتن مگنت‌ها و اندازه آنها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. به طوری که حتی شاید سبب تغییر ساختار در فیلم‌های لایه‌نشانی شده شوند. مگنت‌ها در سیستم‌های مگنترونی می‌تواند پیکربندی متفاوتی را به خود بگیرند. پیکربندی سیستم‌های کندپاش مغناطیسی به طور کلی به دو دسته تعادلی و غیر تعادلی تقسیم می‌شود که این دسته‌بندی بر اساس اندازه مگنت‌های بکار برده شده می‌باشد. در حالت تعادلی همه مگنت‌های به کار رفته می‌بایست اندازه یکسانی داشته باشند ولی در حالت غیرتعادلی اندازه مگنت‌های بکار رفته اندازه متفاوتی دارند بدین صورت که اگر مگنتی که در وسط قرار می‌گیرد اندازه بیشتری داشته باشد مگنت‌های کناری اندازه کمتر و هم اندازه دارند و یا بالعکس اگر مگنتی که در وسط قرار گرفته مقدار کمتری داشته باشد مگنت‌های کناری مقدار بیشتر و هم اندازه خواهند

داشت. نحوه قرار گرفتن مگنت‌ها در سیستم‌های کندوپاش مغناطیسی تعادلی و غیر تعادلی در شکل ۱-۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۶: انواع سیستم‌های کندوپاش مغناطیسی تعادلی و غیر تعادلی که در حالت غیر تعادلی نوع اول کناری قوی‌تر و در نوع دوم وسطی قوی می‌باشد [۴۴]

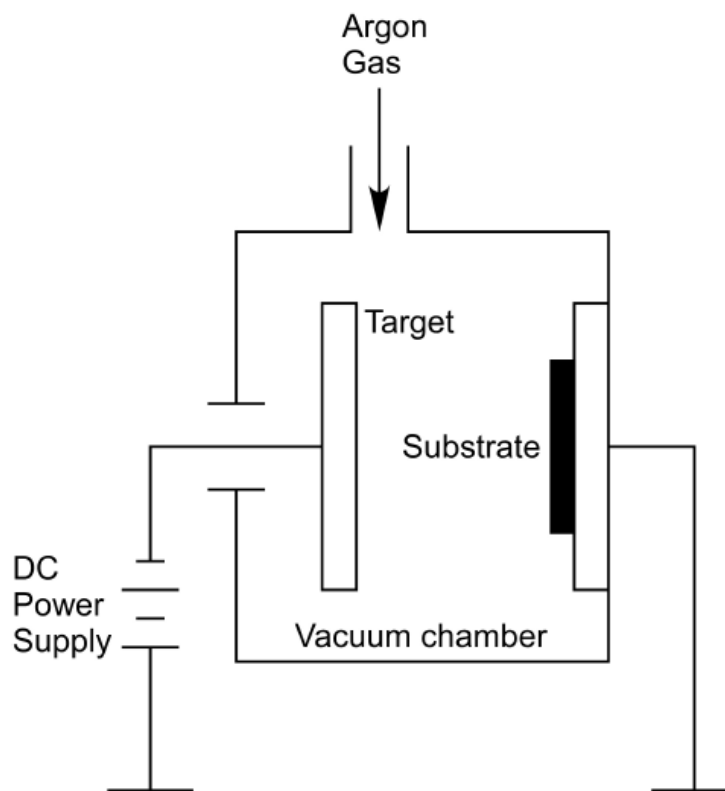
در این تحقیق از قلهربندی کاتد مگنترون مدور سطحی استفاده شده است. همان طور که گفته شد افزایش چگالی پلاسما به واسطه میدان برآیندی $E \times B$ در این پیکربندی می‌باشد که یک ناحیه حلقوی کندوپاشی روی ماده هدف ایجاد می‌کند. در حالی که مگنترون در مقایسه با دیگر روش‌های تخلیه تابان مزیت‌هایی دارد، اما سایش (کندوپاش) ناهموار روی ماده کاتد یک ضرر محسوب می‌شود که این کندوپاش ناهموار از سطح کاتد هدف ممکن است منجر به ضخامت غیریکنواخت در فیلم‌های ساخته شده شود. این غیریکنواختی تابعی از مسافت کاتد به زیرلایه می‌باشد، و با یک فاصله نسبتاً بزرگ کاهش خواهد یافت. از مزیت‌هایی کندوپاش مغناطیسی این است که در یک فشار پایین نسبت به کندوپاش کار می‌کنند. همچنین ممکن است در ولتاژ پایین‌تر و با یک نرخ رسوب بالاتر کار کند. یکنواختی بالاتری از فیلم‌ها با این نوع از تکنیک لایه‌نشانی برای ایجاد پوشش‌های آمورف کربنی به وسیله تعدادی از گروه‌های تحقیقاتی ساخته و گزارش شده است [۴۵-۴۷].

۱-۴-۵-۲ کندوپاش جریان مستقیم (DC^۱)

حوزه کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم یکی از مواردی است که به خوبی شناخته شده است. در این فرآیند یک منبع تغذیه جریان مستقیم (DC) پتانسیل الکتریکی را بین کاند و آند ایجاد می‌کند و با برهمکنش میدان الکتریکی با الکترون‌های آزاد در داخل محفظه بدین صورت که الکترون‌ها در خلاف جهت میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند و با برخورد الکترون‌های شتاب گرفته با گاز کاری (آرگون) سبب یونیزاسیون گاز در محفظه می‌شوند. با یونیزاسیون گاز کاری در داخل محفظه این فرآیند یونیزاسیون به صورت آبشاری افزایش یافته و با افزایش نرخ یونیزاسیون در نتیجه پلاسما ایجاد می‌شود. پلاسما ایجاد شده یک پلاسمای تخلیه تابان می‌باشد و در مد رسوبی یک پلاسما بر روی هدف ماده عمل می‌کند تا یک فیلم نازک در بستر ایجاد نماید [۴۶]. این نوع روش لایه‌نشانی برای رسوب فلزات و فیلم‌های رسانا به کار می‌رود. از مهم‌ترین دلایل استفاده از این روش ایجاد فیلم‌های با کیفیت بالا و ارزان که در صنعت کاربردهای زیادی دارد، می‌باشد. از مشکلات این روش مدت زمان طولانی برای ایجاد فیلم‌ها نارسانا می‌باشد [۴۸-۵۰]. برای رسوب فیلم‌ها نازک معمولاً از دو نوع ماده هدف رسانا و نارسانا می‌توان استفاده کرد. که در این روش اگر از ماده هدف نارسانا استفاده کنیم برای ایجاد پلاسما به ولتاژ زیادی نیاز داریم که از طرفی پس از زمان اندکی از لایه‌نشانی یون‌ها بروی سطح ماده هدف جمع می‌شوند و باعث می‌شود که پتانسیل سطح موثر کاند به تدریج روند کاهشی داشته باشد و فرآیند لایه‌نشانی پس از مدتی متوقف شود و به همین دلیل لایه‌نشانی فیلم‌های نارسانا با استفاده از این روش مقرون به صرفه و قابل انجام نخواهد بود و برای حل این مشکل از روش کندوپاش فرکانس رادیویی (RF Sputtering) برای لایه‌نشانی نیز استفاده شده است [۲۷].

^۱ Direct current

در شکل ۱-۱۷ شماتیکی از سیستم لایه‌نشانی به روش کندوپاش جریان مستقیم نشان داده شده است.



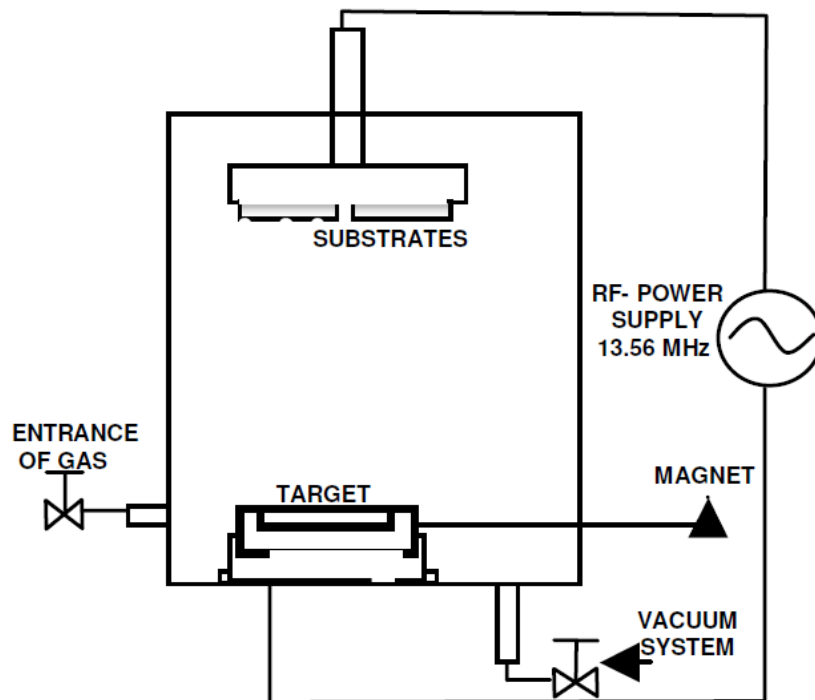
شکل ۱-۱۷: شماتیکی از روش کندوپاش جریان مستقیم

۱-۴-۳-۵ کندوپاش فرکانس رادیویی (RF^1)

همان طور که در بخش قبل اشاره شد به علت عایق بودن برخی مواد، کندوپاش جریان مستقیم برای مواد نارسانا غیر ممکن می‌باشد، ولی در روش کندوپاش فرکانس رادیویی محدودیتی در انتخاب ماده به عنوان رسانا یا نارسانا بودن ماده هدف برای لایه‌نشانی وجود ندارد. در روش کندوپاش فرکانس رادیویی می‌تواند فیلم‌های با کیفیت بالا تولید شود اما به دلیل پایین بودن نرخ لایه‌نشانی در این روش (بطور معمول در محدوده $\mu\text{m/h}$) و همچنین سیستم‌های کندوپاش فرکانس رادیویی برای کاربردهای تجاری پیچیده و

¹ Radio Frequency

مشکل است که از مشکلات اصلی استفاده از این روش لایه‌نشانی می‌باشد [۴۷]. در شکل ۱۸-۱ نمایی از سیستم کندوپاش مغناطیسی فرکانس رادیویی نشان داده شده است.



شکل ۱۸-۱: شماتیکی از سیستم کندوپاش مغناطیسی فرکانس رادیویی

اگر الکترودی با یک پلازما ارتباط خازنی برقرار کند (به کار بردن خازن جهت انتقال انرژی از یک مدار به مدار دیگر به ارتباط خازنی موسوم است) و یک پتانسیل AC اعمال شود، به علت اختلاف تحرک الکترون‌ها و یون‌ها، در مقایسه با جریان یونی وقتی که الکتروود منفی است، جریان الکترونی به مراتب بیشتری را نسبت به وقتی که الکتروود مثبت است به دست می‌آید. با این حال، جریان خالص عبوری از مدار در یک چرخه کامل باید صفر باشد. بنابراین برای بخش بیشتری از چرخه، الکتروود باید دارای پتانسیل منفی باشد، به طوری که کل جریان یون‌ها در ضمن پتانسیل منفی چرخه برابر کل جریان الکترون‌ها در ضمن پتانسیل مثبت چرخه که به مراتب کوتاه‌تر است می‌باشد و در این روش معمولاً از یک ولتاژ متناوب با

فرکانس 13.56 MHz به کار رفته است. در سیکل مثبت الکترون‌ها می‌توانند روی سطح کاتد تجمع کنند و یک پتانسیل منفی ایجاد کنند و پس از تغییر سیکل منبع تغذیه، به سیکل منفی یون به علت سنگین‌تر بودنشان برخلاف الکترون‌ها نمی‌توانند به این تغییر سیکل واکنش نشان و در پلاسما به راحتی حرکت کنند. در نتیجه روی سطح کاتد یک بایاس منفی خودالقایی ایجاد می‌گردد که نتیجه آن بمباران ماده هدف توسط یون‌ها می‌باشد [۴۹]. سیستم کندوپاش RF بسیار شبیه به سیستم کندوپاش جریان مستقیم است و تنها اختلاف عمده در این رابطه نیاز به داشتن یک شبکه الکتریکی مستقل تطبیق بین منبع تغذیه RF و هدف است. این امر برای کاهش اثرات انعکاس انرژی در سیستم است تا اثرات تخریبی روی سیستم را کاهش دهد. یکی از مزایای روش کندوپاش فرکانس رادیویی نسبت به روش کندوپاش مغناطیسی این است که می‌تواند در فشار کمتری تولید پلاسما و لایه‌نشانی انجام می‌شود (۵mtorr, ۰-۱۰) [۵۰].

فصل دوم

معرفی روش های مشخصه یابی لایه های نازک کربن شبه الماسی

۱-۲ مقدمه

لایه‌های نازک برخلاف نمونه‌های حجیم خواص منحصر به فردی از خود نشان می‌دهند. یک نمونه از این فیلم‌های نازک، فیلم‌های کربن شبه‌الماسی می‌باشد. همان طور که در فصل قبل گفته شد فیلم‌های آمورف کربنی یا همان کربن شبه‌الماسی به دلیل کاربردهای بسیاری که در صنایع مختلف، پزشکی، الکترونیک و ... دارند، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. همان طور که می‌دانیم یکی از مهم‌ترین موارد در ساخت هر وسیله بررسی کیفیت ساخت آن و همچنین ویژگی‌های کاربردی بالقوه آن است. بدین منظور برای بررسی کیفیت هر وسیله‌ای نیاز به شناخت ابزار آلات مناسب جهت تجزیه و تحلیل آن می‌باشد. برای استفاده از هر ابزاری در ابتدا شناخت نحوه ساخت و کارکرد آن به جهت حصول نتایج درست و دقیق‌تر حائز اهمیت می‌باشد. بیشتر ابزار آلات اندازه‌گیری مبتنی بر اصول اپتیکی و الکترونیکی می‌باشد. در این فصل به بررسی مختصر نحوه کارکرد و فیزیک استفاده شده در ابزارهای آنالیزی مورد استفاده جهت مشخصه‌یابی فیلم‌های آمورف کربنی لایه‌نشانی شده پرداخته خواهد شد. آنالیزهای مورد استفاده برای بررسی فیلم‌های آمورف کربنی که در مطالعه ما مورد استفاده قرار گرفته‌اند شامل طیف‌سنجی رامان، طیف سنجی بیضی‌سنجی، طیف‌سنجی گسیل اپتیکی، طیف‌سنجی مرئی-فرا بنفش (UV-vis) و مقاومت الکتریکی می‌باشد.

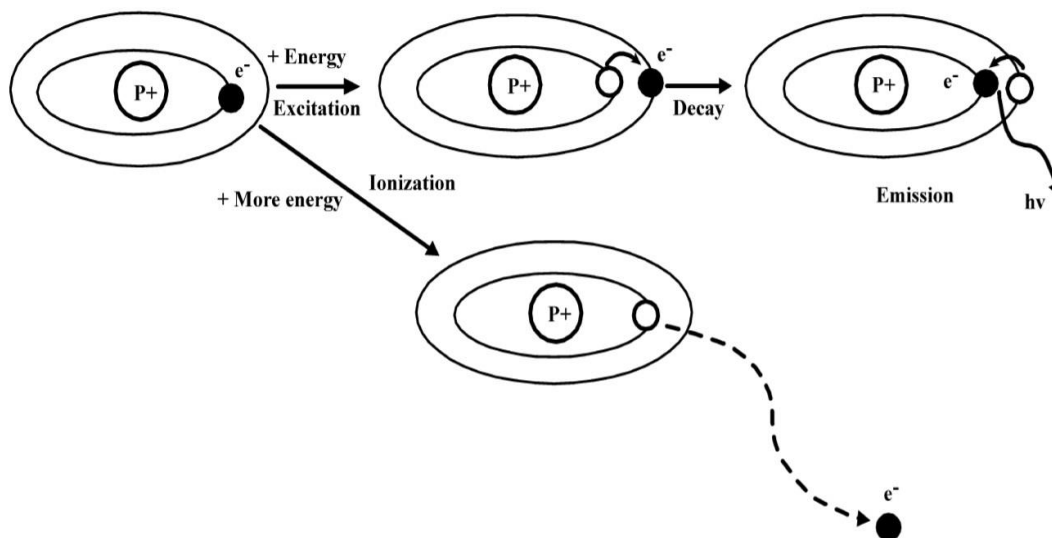
۲-۲ طیف‌سنجی گسیل اپتیکی (OES)

روش طیف‌سنجی گسیلی اپتیکی (OES) یک روش غیرمخرب می‌باشد که بررسی اتم‌ها، یون‌ها و مولکول‌های داخل پلاسما را فراهم می‌کند. همچنین می‌تواند اطلاعاتی در مورد برخی خواص مانند (برانگیختگی گونه‌ها) یا چگالی گونه‌ها، و تاثیرات برخوردی بین الکترون-اتم، اتم-اتم، یون-اتم، توزیع

^۱Optical Emission Spectroscopy

انرژی گونه‌ها، انتقال بار بین ترکیبات پلاسما و میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را فراهم کند. از آنجایی که بررسی مشاهدات OES به چشمه انتشار و فهم فرآیندهای فیزیکی اتفاق افتاده در داخل چشمه وابسته است پس می‌بایست در بررسی این مشاهدات دقت شود. استفاده از OES که در تشریح پلاسمای کم چگال و دمای پایین در همه جا به طور گسترده گسترش یافته است، دستیابی به اطلاعات زیادی در مورد خواص داخل پلاسما را فراهم می‌کند [۵۱]. همچنین برای تعیین پارامترهای پلاسمایی همچون دمای گاز، دمای الکترون و چگالی الکترونی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۵۲]. طیف‌سنجی انتشار ایتیکی به دلایل مختلف بسیار جالب و جذاب به نظر می‌رسد. این روش جز روش‌های ساده برای انجام تشخیص در موقعیت (مکان) فرآیندهای پیچیده که در یک تخلیه پلاسما اتفاق می‌افتاد، می‌باشد. همچنین این امکان را فراهم می‌کند تا بدون ایجاد هیچ گونه دخالتی در پلاسما، اطلاعات در زمان واقعی نشان داده شود، که در واقع این کار توسط یک سنسور بسیار حساس و آسان در فضای محیط پلاسما انجام می‌شود. با این حال که این روش مزایایی بسیاری دارد از مهمترین ایرادات این نوع مشخصه‌یابی نیز بدین خاطر می‌باشد که فقط برخی از گونه‌های برانگیخته و یا یونیزه شده در این طیف‌سنجی قابل شناسایی هستند، یعنی آن دسته از واکنش-هایی که در باند طیف مرئی در محدوده طول موج ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر ساطع می‌شوند قابل مشاهده و اندازه‌گیری می‌باشند [۵۳]. البته امروزه دستگاه‌های OES ساخته شده قادر می‌باشند طیف طولی موجی ۱۱۰۰-۳۰۰ نانومتر را نیز اندازه‌گیری نمایند. اصول اساسی و کلی تمام دستگاه‌های طیف‌سنجی اتمی بر این اساس می‌باشد که بروز و اندازه‌گیری انتشار تابش الکترومغناطیسی یا نور وقتی که ماهیت طیف‌های اتمی و یونی بخوبی درک شده باشند به راحتی بررسی شوند. یک الگوی ساده‌ای از مدل اتمی بور در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. اتم شامل یک هسته محصور شده با یک یا چند الکترون می‌باشند که در اطراف هسته اتم در سطح اوربیتال‌های مشخصی قرار گرفته شده اند. در هر اتم تعدادی اوربیتال وجود دارد که الکترون‌هایی در سطح آن اوربیتال‌ها به دور هسته در حال چرخش‌اند. هر اوربیتال یک سطح انرژی مشخص

به خود دارد، که به فاصله از هسته وابسته می‌باشد و هرچه این فاصله بیشتر باشد اوربیتال سطح انرژی بیشتری دارد.



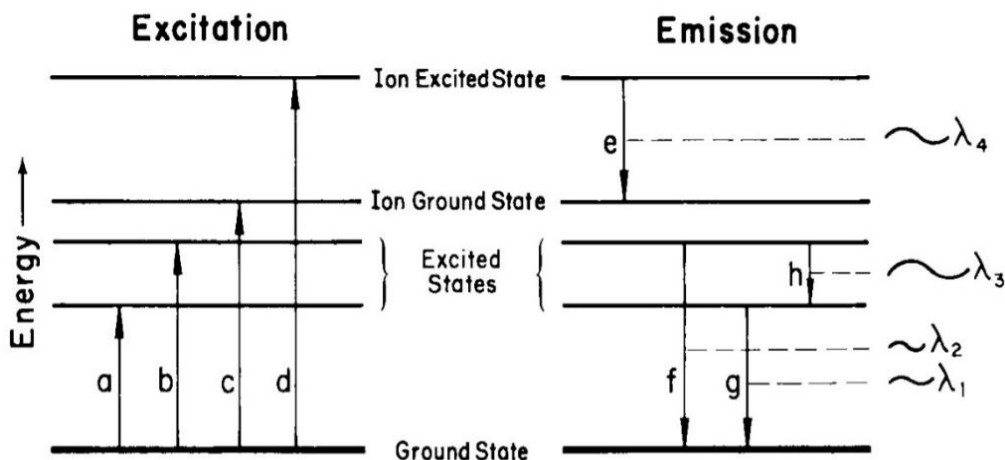
شکل ۱-۲: شماتیکی از فرآیند جذب و گسیل اتمی در مدل بور

هرچه فاصله کمتر این مقدار انرژی وابسته به آن کمتر خواهد بود، و به همین ترتیب الکترون‌هایی که در هریک از این اوربیتال‌ها قرار گرفته‌اند همان سطح از انرژی اوربیتال‌ها را به خود می‌گیرند. با کم شدن فاصله این اوربیتال‌ها از هسته مقدار انرژی الکترون کاهش پیدا می‌کند تا که به کم‌ترین فاصله الکترون از هسته که دارای کم‌ترین سطح انرژی است و به آن حالت پایه گفته می‌شود برسند. وقتی انرژی اضافی به وسیله اتم به شکل یک تابش الکترومغناطیسی، و یا برخوردی با موارد دیگر (الکترون دیگر، اتم، یون یا مولکول) جذب می‌شود ممکن است یک یا چند اتفاق رخ دهد. یکی از محتمل‌ترین اتفاقات تحریک است، که در این حالت الکترون از اوربیتال حالت پایه به اوربیتال‌های دورتر از هسته با یک سطح انرژی بالاتر صعود می‌کند. به این حالت، حالت اتم برانگیخته گفته می‌شود. یک اتم در حالت برانگیخته ناپایدار است و تمایل دارد به حالت پایه خود در سطح انرژی کمتر و نزدیک به هسته برگردد. این فرآیند به یک انرژی رهایی وابسته است که هر یک از آن‌ها از طریق برخورد با ذرات دیگر یا از طریق انتشار تابش الکترومغناطیسی که به عنوان فوتون شناخته می‌شود به دست می‌آید. اگر انرژی جذب شده توسط یک اتم

به اندازه کافی بزرگ باشد ممکن است که الکترون اتم را رها کند و اتم به حالت یک بار مثبت تبدیل شود، که به این حالت یونیزاسیون گفته می‌شود و ذرات حاصله را یون می‌نامند. همچنین یون‌ها هم می‌توانند مانند اتم یک حالت پایه و برانگیختگی داشته باشند که از طریق آن می‌تواند انرژی جذب یا انتشار دهند. همان طور که در شکل ۲-۲ شماتیکی از فرآیند گسیل و جذب اتمی نشان داده شده است. خطوط افقی این نمودار میزان انرژی متفاوت یک اتم و فلش‌های عمودی نشان دهنده انتقال انرژی هستند. اختلاف انرژی بین دو سطح انرژی بالا و پایین در یک انتقال تابشی به میزان طول موج فوتون تابش شده (λ) وابسته می‌باشد. این اختلاف انرژی را می‌توان با استفاده از معادله ۱-۲ بیان کرد.

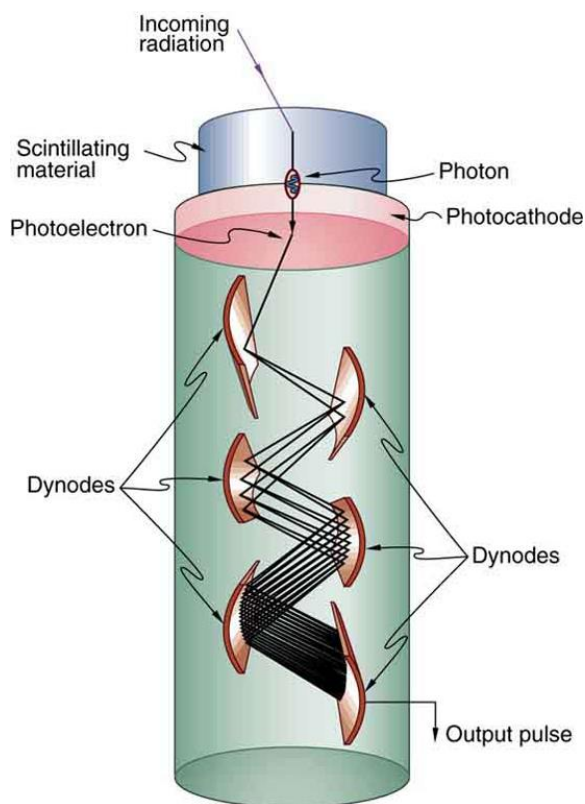
$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2-1)$$

λ طول موج فوتون تابش شده، h ثابت پلانک، c سرعت نور و ΔE هم اختلاف انرژی ترازهای انرژی می‌باشد. هر عنصر مجموعه مشخصه‌هایی از سطح انرژی و طیف انتشاری مخصوص به خود را دارد که این خاصیت همه عناصر در جدول تناوبی بوده که طیف‌سنجی انتشار اتمی را برای اندازه‌گیری طیف عناصر خیلی مفید می‌سازد و می‌توان با استفاده از این روش برای شناسایی عناصر استفاده کرد [۵۴]. شکل ۲-۲ حالت جذب و برانگیختگی اتمی در ترازهای انرژی را مشخص می‌کند.



شکل ۲-۲: نمودار ترازهای انرژی در اتم و یون a, b حالت برانگیخته، c یونش، d یونش/برانگیختگی، e گسیل یونی، و f و g ه گسیل اتمی [۵۷].

اساس کار دستگاه‌های طیف‌سنجی بدین صورت می‌باشد که نور توسط یک عدسی متمرکز شده و به وسیله فیبر اپتیکی به دستگاه اسپکتروفوتومتر وارد می‌شود. سپس به وسیله توری شکست که از شیارهای موازی ریز بر روی یک آینه تخت تشکیل شده است (۴۲۰۰-۶۰۰ خط بر میلی‌متر)، نور به طول موج‌های مختلف سازنده‌اش جدا می‌شود. سپس نور جدا شده به سمت یک آشکارساز حرکت می‌کنند. آشکارساز متشکل از یک فوتومولتی پلیر^۱ (PMT) بوده که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳: فوتوکاتد، داینود و آند در یک فتومولتی پلیر

همان طور که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است فوتومولتی پلیر شامل یک محفظه‌ی خلاء که در آن از یک فوتوکاتد و همچنین یک ماده‌ی حساس به تابش فوتون می‌باشد، استفاده شده است. پس از برخورد فوتون‌ها به سطح فوتوکاتد تعداد یک یا چند الکترون از سطح این فوتوکاتدها جدا می‌شوند. الکترون‌های

^۱Photomultiplier tubes

جدا شده به سمت داینوها حرکت کرده و با برخورد به سمت هر داینود دو یا پنج الکترون ثانویه را جدا می‌کنند. یک فوتومولتی‌پلیر متشکل از ۱۶-۹ داینود می‌باشد. در مرحله‌ی آخر الکترون‌های ثانویه توسط آند جمع شده و جریان آن‌ها اندازه‌گیری می‌گردد که این جریان به شدت نور فرودی به داخل PMT مرتبط می‌باشد [۵۵]. در این تحقیق از دستگاه طیف سنجی گسیل اپتیکی شرکت AvaSpec با مدل ULS3648 RS واقع در دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شده است.

۳-۲ طیف‌سنجی رامان (Raman Spectroscopy)

طیف‌سنجی رامان یک نوع از روش‌های طیف‌سنجی غیرمخرب می‌باشد که براساس پراکندگی‌های غیرکشسان عمل می‌کند. در این تکنیک از یک نور تک رنگ که معمولاً از یک چشمه لیزر می‌باشد استفاده می‌شود. پراکندگی غیرکشسان بدین معنی است که فرکانس فوتون‌ها در نور تک رنگ (تکفام) تابش شده به محض تعامل با یک نمونه تغییر می‌کند. فوتون‌های لیزر توسط نمونه جذب می‌شوند و مجدداً منتشر می‌شوند. فرکانس فوتون‌هایی که باز نشر شدند در مقایسه با فرکانس تک رنگ اصلی که به آن رامان گفته می‌شود به بالا یا پایین منتقل می‌شوند. وقتی یک دستگاه مولکولی در اندرکنش با امواج یا فوتون تابیده شده به آن قرار می‌گیرد این اندرکنش‌ها به شکل‌های مختلفی صورت می‌گیرد. بدین صورت که فوتون تابیده شده می‌تواند از سطح، بازتاب شود یا اینکه از آن عبور و یا جذب مولکول‌های جسم شود. اگر برخورد فوتون با جسم از نوع کشسان باشد بین فوتون و ذرات جسم هیچ انرژی مبادله نمی‌شود و تنها اتفاقی که رخ می‌دهد تغییر مسیر حرکت فوتون‌ها می‌باشد، در حالی که در برخورد ناکشسان بین فوتون و مولکول‌های سطح نمونه، انرژی مبادله خواهد شد و احتمال جهش به حالت برانگیخته فراهم می‌گردد. در این حالت فوتون تابیده شده به سطح جسم مقداری از انرژی خود را از دست می‌دهد [۵۶]. پس در نتیجه طیف ارتعاشی مولکول‌ها را می‌توان با استفاده از بررسی برخورد ناکشسان فوتون‌ها به سطح جسم بدست آورد. در طیف‌سنجی رامان محل قله‌های ارتعاشی همان اختلاف بین عدد موج مطلق و خط برانگیخته و عدد موجی

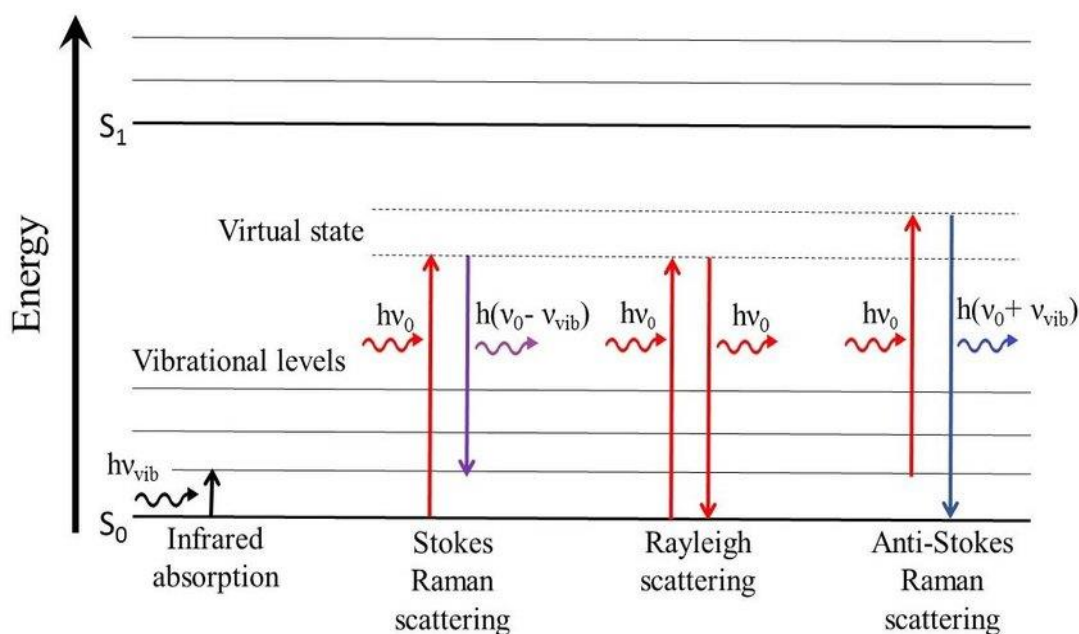
فوتون پراکنده شده است. در واقع می‌توان بیان کرد که طیف رامان، حاصل پراکندگی غیر کشسان بین فوتون تابیده شده و مولکول‌های جسمی است که فوتون به آن برخورد می‌کند [۵۷]. بنابراین به طور کلی به دلیل تغییری که در فرکانس پرتو تابیده در اثر برخورد فوتون‌ها به سطح ایجاد می‌شود پراکندگی به سه قسمت تقسیم می‌شوند [۵۸، ۶۰].

۱. **پراکندگی ریلی:** که در اثر برخورد کشسان فوتون با جسم ایجاد می‌شود و تغییری در فرکانس تابیده شده به جسم ایجاد نمی‌شود.

۲. **پراکندگی استوکس:** در این نوع از پراکندگی فرکانس پرتو پراکنده شده در اثر اندرکنش با سطح جسم نسبت به فرکانس پرتو تابیده شده کاهش می‌یابد.

۳. **پراکندگی آنتی استوکس:** این نوع از پراکندگی برخلاف پراکندگی‌های قبلی فرکانس پرتو پراکنده شده در اثر اندرکنش با سطح جسم نسبت به فرکانس تابیده افزایش می‌یابد [۵۷].

شکل ۲-۴ نمودار شماتیک از تغییر لایه‌های ظرفیت در اثر انواع پراکندگی‌های کشسان و غیر کشسان شامل پراکندگی ریلی، استوکس رامان، آنتی استوکس رامان را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴: شماتیک از انواع پراکندگی رامان و ریلی

حال به تبیین کلاسیکی پراکندگی رامان پرداخته خواهد شد. برهمکنش میدان الکتریکی پرتوهای

فرودی با الکترون‌ها و مولکول‌های موجود در جسم مورد تابش، الکترون‌ها را از موقعیت خود در اطراف هسته‌ها جابه‌جا می‌کند. در نتیجه یک ممان دوقطبی القایی $\vec{P}$ در مولکول‌های جسم مورد تابش ایجاد می‌شود، که ممان دوقطبی در مولکول با تقریب خوبی با میدان الکتریکی $\vec{E}$ متناسب است. میدان الکتریکی نور فرودی با رابطه ۲-۲ با دامنه E_0 و همچنین با فرکانس ν_0 مرتبط می‌باشد.

$$E = E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) \quad (2-2)$$

این نور فرودی طی برخورد با مولکول‌ها و الکترون‌های جسم مورد نظر آن‌ها را قطبیده و همچنین وادار به نوسان می‌کند. همچنین می‌دانیم که ممان دوقطبی مولکول تابعی از میدان است، که از رابطه ۳-۲ تبعیت می‌کند.

$$\vec{P} = \alpha \vec{E} \quad (2-3)$$

در این رابطه α ضریب قطبش‌پذیری ماده نامیده می‌شود. بردار جابجایی نوسانات طبیعی مولکول با دامنه‌ی q_0 و فرکانس ν_0 برابر است با:

$$q_{vib} = q_0 \cos(2\pi\nu_{vib} t) \quad (2-4)$$

حال برای اینکه یک پیوند بتواند در رامن فعال باشد باید قطبش‌پذیری آن به صورت تابعی از فاصله میان هسته‌ها (طول پیوند) تغییر کند. قطبش‌پذیری را می‌توان به صورت یک سری تیلور بسط یافته به صورت زیر تعریف کرد:

$$\alpha = \alpha_0 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q}\right) q_{vib} + \dots \quad (2-5)$$

حال می‌توان ممان دوقطبی مولکول را با استفاده از معادلاتی که در بالا توضیح داده شد به شکل زیر باز نویسی نمود:

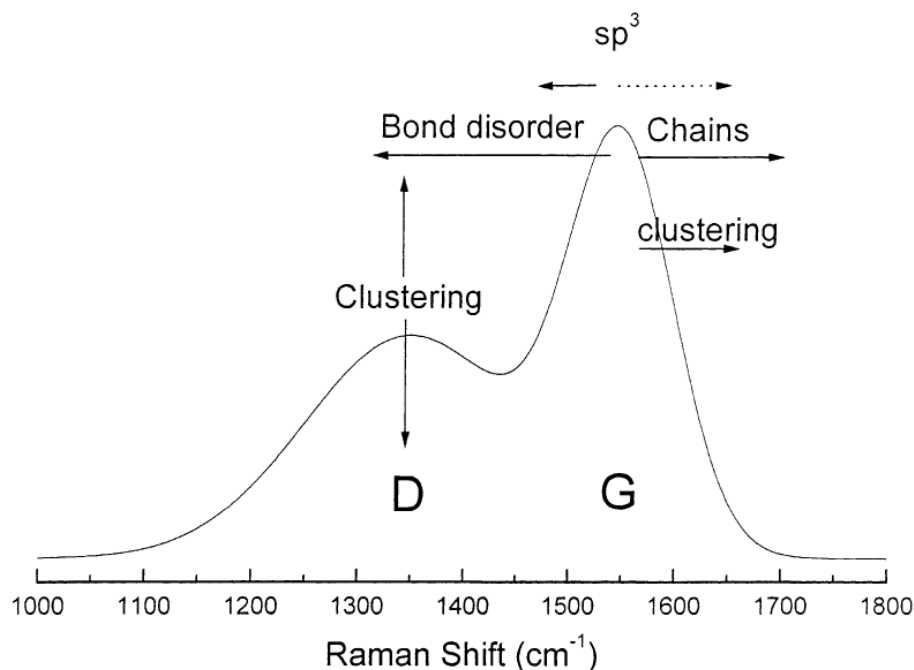
$$\vec{p} = \alpha \vec{E} = \alpha_0 E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q} \right) q_0 E_0 \{ \cos(2\pi(\nu_0 + \nu_{vib})t) + \cos(2\pi(\nu_0 - \nu_{vib})t) \}$$

همان طور که در رابطه مشخص است سه نوع فرکانس پراکندگی نور وجود دارد که به ترتیب شامل ν_0 (پراکندگی ریلی)، $\nu_0 + \nu_{vib}$ (پراکندگی آنتی استوکس رامان) و همچنین $\nu_0 - \nu_{vib}$ (پراکندگی استوکس رامان) می‌باشد [۵۹].

۲-۳-۱ آنالیز رامان فیلم‌های کربن شبه‌الماسی

طیف‌سنجی رامان یک روش مشخصه‌یابی قوی و غیرمخرب برای مواد پایه کربن می‌باشد که اکنون بطور گسترده به عنوان یک روش استاندارد برای بررسی ریزساختارهای فیلم‌های a-c به خاطر حساسیت بالا به ساختار پیوند کربنی و اندازه خوشه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶۰]. طیف رامان فیلم‌های a-c بطور معمول با یک قله نامتقارن در محدوده $1000-1800 \text{ cm}^{-1}$ نشان داده می‌شود. این قله‌های نامتقارن پهن معمولاً می‌توانند با استفاده از دو قله گوسی با نام‌های قله D و قله G برازش شوند. قله D که در حدود 1350 cm^{-1} می‌باشد به مدل تنفسی مکان SP^2 در حلقه‌های شش‌تایی (آروماتیک) کربن وابسته است و قله G در حدود 1580 cm^{-1} به مدل کششی SP^2 کربن در هردو ساختار زنجیره‌ای و حلقه آروماتیک مربوط می‌شود [۶۱]. شکل ۲-۵ که عوامل موثر بر تغییر مکان و شدت مربوط به قله‌های D و G را نشان می‌دهد. برای هر منحنی نسبت شدت‌های I_D/I_G ، مکان قله G و همچنین FWHM قله G محاسبه می‌گردد و این پارامترها کاملاً مربوط به چگالی، اندازه و ساختار خوشه‌های SP^2 می‌باشند. نسبت شدت قله‌های D و G (I_D/I_G) معمولاً در مقالات بسیار استفاده می‌شود و اطلاعات کلیدی در مورد ریز ساختارهای فیلم‌های a-c

را ارائه می‌دهد.



شکل ۲-۵: شماتیکی از طیف رامان کربن آمورف و عوامل موثر بر شدت و تغییر مکان قله‌های D و G [۵]

معمولاً از نسبت I_D/I_G برای بررسی کیفی اندازه و ترتیب خوشه‌های SP^2 استفاده می‌شود [۶۲] که رابطه

زیر، رابطه بین نسبت‌های I_D/I_G و اندازه بلوری (L_a) گرافیت را نشان می‌دهد.

$$\frac{I_D}{I_G} = C(\lambda) L_a^2 \quad (۲-۷)$$

$C(\lambda)$ مربوط به طول موج تحریکی و L_a هم به طول همبستگی درون صفحه یا اندازه بلوری گرافیت

مربوط می‌باشد. پس بدین صورت با کاهش I_D/I_G ساختار SP^3 افزایش یافته و اندازه دانه‌های کربنی هم

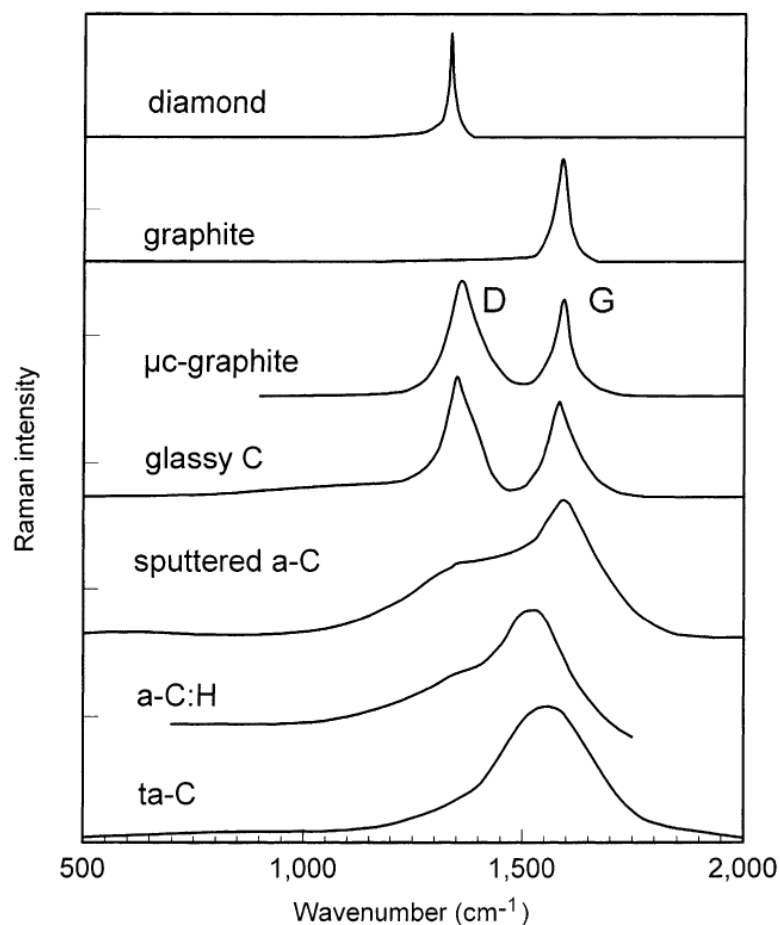
بدین ترتیب کاهش خواهد یافت. گستردگی قله D به پخش خوشه‌های SP^2 با ترتیب و ابعاد مختلف وابسته

است. حداکثر ارتفاع روند قله D وابسته است به سطح اعوجاج حلقه آروماتیک که به بی‌نظمی وابسته است.

پس بنابراین به محتوای SP^3 مربوط می‌شود [۶۱]. همچنین عرض کامل در نیمی از حداکثر ($FWHM^1$)

¹Full width at half maximum

قله G می‌تواند مربوط به ساختار SP^3 باشد [۶۳]. طیف رامان برخی از آلوتروپ‌های کربن که شامل ساختار بلوری و آمورف کربنی می‌باشد در شکل ۶-۲ نشان داده شده است.

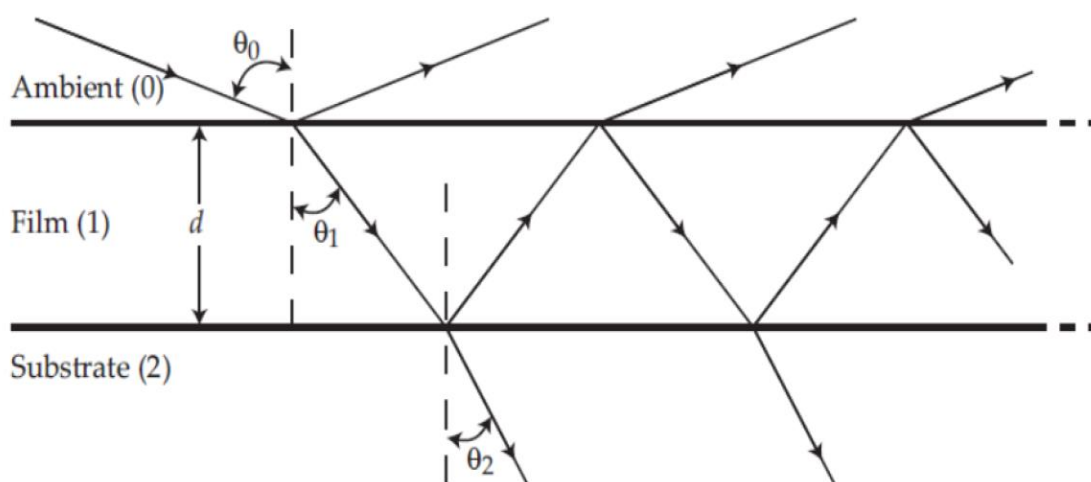


شکل ۶-۲: شماتیکی از طیف رامان چند نمونه از آلوتروپ‌های بلوری و آمورفی کربن [۵]

در این تحقیق برای طیف‌سنجی رامان فیلم‌های آمورف کربنی لایه‌نشانی شده از دستگاه طیف‌سنجی رامان محصول شرکت Avantes با مدل uRaman-532-Ci واقع در دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شده است. برای آنالیز نمونه‌ها توان مورد استفاده برای همه نمونه‌ها ۳۰ mW بوده و در $1200-1800\text{ cm}^{-1}$ طیف رامان نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

۴-۲ بیضی‌سنجی (Ellipsometry)

بیضی‌سنجی یک روش اندازه‌گیری اپتیکی می‌باشد که ضرایب خاموشی، شکست و ضخامت نمونه‌ها را با استفاده از نور عبوری یا بازتابی از یک نمونه مشخص می‌کند. از ویژگی کلیدی بیضی‌سنجی اندازه‌گیری تغییر پولاریزه شدن نور تحت بازگشت نور از روی یک نمونه (یا نور عبوری بوسیله یک نمونه) می‌باشد. نور فرودی در اثر برخورد با یک فیلم نازک از سطح فیلم و زیرلایه چند بار شکسته و یا بازتاب می‌شود که این موضوع در شکل ۷-۲ نشان داده شده است.



شکل ۷-۲: اثر بازتاب و شکست نور فرودی به یک فیلم نازک و زیرلایه

نام بیضی‌سنجی بدین منظور انتخاب شده است که نور پولاریزه شده تحت نور بازگشتی اغلب بیضوی می‌شود. بیضی‌سنجی دو مقدار Δ و Ψ را اندازه‌گیری می‌کند که این‌ها به ترتیب مربوط به نسبت دامنه و اختلاف فاز بین دو مولفه عمودی (S) و مولفه موازی مماسی (P) نور نسبت به صفحه تابش می‌باشند. در طیف‌سنجی به روش بیضی‌سنجی طیف‌ها با تغییر طول موج نور اندازه‌گیری می‌شوند. ناحیه کاربرد بیضی-سنجی گسترده می‌باشد که از آن برای ارزیابی ثابت‌های اپتیکی و ضخامت فیلم‌های نازک نیز استفاده می‌شود. با این حال ناحیه کاربرد بیضی‌سنجی بسیار گوناگون می‌باشد. در بیضی‌سنجی دو پارامتر اصلی بیضی‌سنجی یعنی Δ و Ψ بوسیله معادله زیر بیان می‌شوند [۶۶، ۶۷].

$$\tan \psi \exp(i\Delta) = \frac{R^P}{R^S} \quad (2-8)$$

در واقع در بیضی‌سنجی دو پارامتر $\tan \psi$ (پارامتری بر حسب انعکاس) و Δ (تعیین کننده جابجایی فاز) سنجیده می‌شود. همان طور که گفته شد اساس کار بیضی‌سنجی بر اساس مد بازتابی می‌باشد که ابتدا بازتاب کلی و سپس تغییر فاز را از ضرایب بازتاب فرنل برای هر مرز مشخص می‌نمایید. بدین منظور بازتاب نور فرودی از مرز مشترک محیط و فیلم نازک را با ضرایب فرنل r_{01}^P و r_{01}^S و همچنین بازتاب از فصل مشترک فیلم و زیرلایه آن با ضرایب فرنل r_{12}^P و r_{12}^S مشخص شده است. همان طور که گفته شد بالاوند-های S و P مربوط به مولفه عمودی و موازی میدان با سطح تابش و زیروندهای ۰، ۱، ۲ مربوط به نوع سطح که شامل هوا و فیلم نازک و زیرلایه می‌باشد. بدین ترتیب برای مشخص کردن ضریب شکست و ضخامت لایه نازک از این روش و با استفاده از معادله فرنل و اسنل استفاده خواهد شد. از معادله اسنل به خاطر داریم

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 \quad (2-9)$$

و همچنین از ضرایب بازتاب فرنل می‌دانیم که

$$r_{01}^P = \frac{N_1 \cos \theta_0 - N_0 \cos \theta_1}{N_1 \cos \theta_0 + N_0 \cos \theta_1} \quad (2-10)$$

$$r_{01}^S = \frac{N_0 \cos \theta_0 - N_1 \cos \theta_1}{N_0 \cos \theta_0 + N_1 \cos \theta_1} \quad (2-11)$$

$$r_{12}^P = \frac{N_2 \cos \theta_1 - N_1 \cos \theta_2}{N_2 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_2} \quad (2-12)$$

$$r_{12}^S = \frac{N_1 \cos \theta_1 - N_2 \cos \theta_2}{N_1 \cos \theta_1 + N_2 \cos \theta_2} \quad (2-13)$$

بدین ترتیب مجموع ضرایب بازتاب عمودی و موازی از سطح محیطها بر حسب ضرایب فرنل به صورت زیر محاسبه می شود.

$$R^P = \frac{r_{01}^P + r_{12}^P \exp(-2i\beta)}{1 + r_{01}^P r_{12}^P \exp(-2i\beta)} \quad (2-14)$$

$$R^S = \frac{r_{01}^S + r_{12}^S \exp(-2i\beta)}{1 + r_{01}^S r_{12}^S \exp(-2i\beta)} \quad (2-15)$$

که در این رابطه اخیر β را می توانیم بر حسب ضخامت فیلم نازک (d)، طول موج (λ)، زاویه فرودی پرتو نور (θ) و N_1 ضریب شکست مختلط فیلم محاسبه کرد.

$$\beta = 2\pi \left(\frac{\lambda}{d} \right) N_1 \cos \theta \quad (2-16)$$

Ψ به کمک نسبت ضرایب بازتاب موازی و عمودی به دست می آید.

$$\tan \psi = \frac{|R^P|}{|R^S|} \quad (2-17)$$

$$N_2 = n_2 + ik_2 \quad (2-18)$$

برای محاسبه d و N_2 هیچ تحلیلی بر حسب تغییر فاز و میرایی وجود ندارد. در روش بیضی سنجی همان طور که گفته شد بدست آوردن ثابت های اپتیکی بر حسب محاسبه طیف Ψ و Δ بر اساس طول موج می باشد. و سپس با برازش کردن مناسب این طیف ها و با استفاده از یک مدل مناسب می توان ثابت های اپتیکی را محاسبه کرد [۶۴]. در این تحقیق برای طیف سنجی بیضی سنجی از دستگاه SENTECH مدل SE800

DUV واقع در دانشگاه شهید بهشتی استفاده گردید.

۲-۵ طیف‌سنجی فرابنفش - مرئی (UV-Vis)

طیف‌سنجی با اشعه ماوراء بنفش (UV-Vis) بخاطر تنوع بسیار زیاد آن یکی از محبوب‌ترین روش‌های تحلیلی بوده و تقریباً قادر به شناسایی هر مولکول می‌باشد. طیف‌سنجی اپتیکی در واقع به وسیله دستگاهی انجام می‌شود که در آن یک نور تکفام با شدت I_0 تولید می‌شود و با عبور دادن این نور از یک لایه با ضخامت مشخص قسمتی از نور عبوری بازتاب داده می‌شود (I_r) و قسمتی جذب لایه شده (I_a) و همچنین قسمتی از نور از لایه عبور می‌کند (I_t) که با رابطه زیر با هم مرتبط می‌شوند.

$$I_0 = I_r + I_a + I_t \quad (۲-۱۹)$$

برای طیف‌سنجی در این تحقیق از دستگاه طیف‌سنجی با مدل UV1800- SHIMADZU واقع در دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شده است. برای انجام طیف‌سنجی ابتدا می‌بایست دستگاه کالیبراسیون شود. برای کالیبراسیون سیستم ابتدا از دو قطعه همسان که از جنس زیرلایه که در این تحقیق از جنس شیشه می‌باشد، استفاده می‌شود. بدین صورت که در ابتدا دو قطعه از جنس زیرلایه را در محل مشخص شده دستگاه قرار داده و بعد درب دستگاه را بسته و سیستم را راه اندازی می‌کنیم و سیستم پس از چند ثانیه طیف‌های حاصل از زیرلایه رابه عنوان داده‌های صفر ذخیره‌سازی می‌کند و سپس یکی از قطعه‌ها را برداشته و فیلم لایه‌نشانی شده را قرار می‌دهیم و سپس درب دستگاه را بسته و سیستم را راه اندازی می‌کنیم تا مجدد شروع به کار نماید و طیف‌های جذبی و عبوری اندازه‌گیری شده فیلم‌ها را نشان دهد. در این سیستم داده‌ها به دو صورت عددی و نموداری مشخص می‌شود، که بازه اندازه‌گیری دستگاه از ۳۰۰nm- ۱۱۰۰ می‌باشد و با استفاده از این دستگاه و داده‌هایی که می‌توان به وسیله آن از فیلم‌های ساخته شده

^۱Ultraviolet-visible spectroscopy

استخراج کرد، به بررسی خواص اپتیکی مانند گاف نواری، ضریب جذب اپتیکی و ضریب خاموشی و شکست فیلم‌های لایه‌نشانی شده پرداخته خواهد شد. برای محاسبه ضریب جذب فیلم‌های لایه‌نشانی محققان گوناگون روش‌ها و رابطه‌های بسیاری را بیان کرده‌اند که در اینجا برای محاسبه ضریب جذب از فرمولی که به کمک طیف عبوری توسط دستگاه طیف‌سنجی بدست آمده است استفاده خواهد شد [۶۶]. طیف عبوری از فیلم‌ها با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است.

$$T(\lambda) = \frac{I_t}{I_0} \quad (2-20)$$

در این رابطه I_0 شدت نور تکفام ورودی به سطح نمونه و I_t شدت نور عبوری از آن می‌باشد. با استفاده از طیف عبوری به دست آمده و قرار دادن آن در معادله‌ی زیر ضریب جذب نمونه‌ها محاسبه خواهد شد [۶۷].

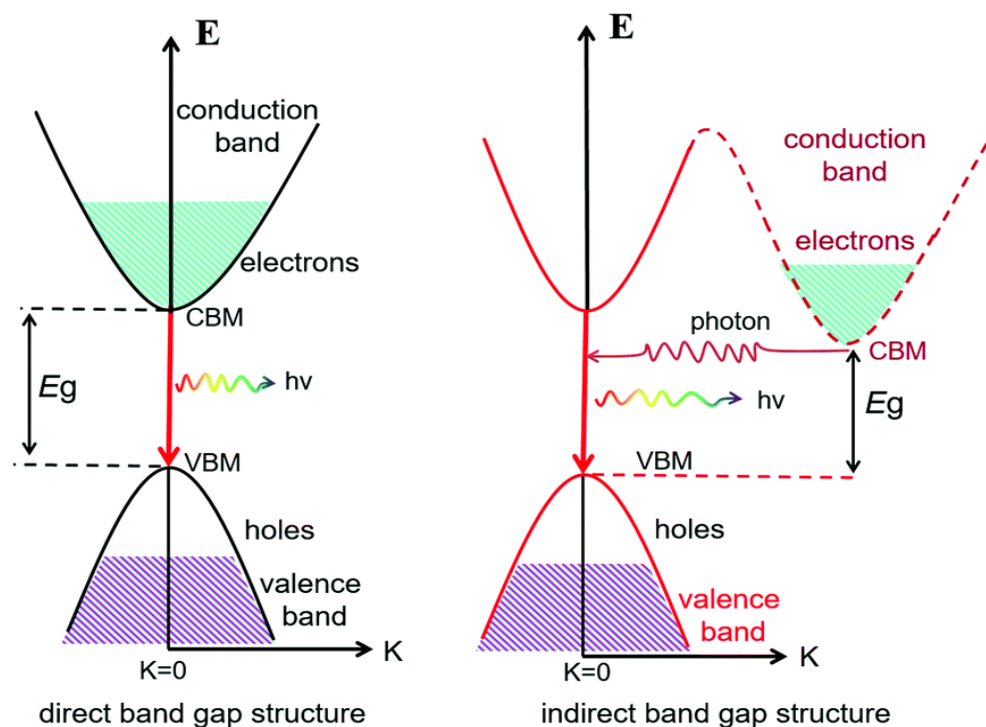
$$\alpha = \frac{1}{l} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2-21)$$

در این رابطه α ضریب جذب، l ضخامت فیلم لایه‌نشانی شده و T طیف عبوری از نمونه می‌باشد.

۲-۵-۱ گاف نواری اپتیکی

یکی از مشخصه‌های مهم برای بررسی خواص اپتیکی فیلم‌های نازک محاسبه گاف نواری اپتیکی فیلم‌ها می‌باشد. گاف نواری در فیزیک جامد و نیمه‌رسانا بسیار حائز اهمیت می‌باشد. گاف نواری در واقع به اختلاف انرژی بالای نوار ظرفیت که حاوی الکترون‌ها بوده و پایین نوار رسانش که بدون حضور الکترون‌ها یا به نوعی حاوی حفره‌ها می‌باشد گفته می‌شود. با این تعریف برای گاف نواری، در واقع آن بیان کننده رسانایی و یا نارسایی مواد می‌باشد که برای مواد رسانا این اختلاف نوارها وجود ندارد در نتیجه گاف نواری صفر خواهد بود در حالی که این اختلاف باند در مواد نارسانا خیلی زیاد بوده به طوری که اگر الکترونی بخواهد از نوار

ظرفیت به نوار رسانش انتقال یابد به انرژی زیادی نیاز دارد. در نیمه رساناها گاف نواری، بسته به نوع مواد این اختلاف باند می‌تواند در حدود چند الکترون ولت متغیر باشد. اگر انرژی فوتون تابیده شده به ماده از گاف اپتیکی آن بیشتر باشد الکترون نوار ظرفیت با جذب فوتون تابیده شده به آن به نوار رسانش منتقل خواهند شد. در بررسی گاف نواری فیلم‌ها، معمولاً به دو نوع گاف نواری برخورد می‌کنیم که برای برخی از مواد گاف نواری مستقیم و برای برخی دیگر غیرمستقیم می‌باشد. شماتیکی از گاف نواری در شکل ۸-۲ نشان داده شده است. مطابق تصویر اگر پایین نوار رسانش و قله نوار ظرفیت عدد موج یکسانی داشته باشند به این نوع گاف مستقیم گفته می‌شود ولی در غیر این صورت گاف نواری غیرمستقیم خواهد بود.



شکل ۸-۲: شماتیکی از گاف نواری اپتیکی مستقیم و غیرمستقیم [۷۰]

برای محاسبه گاف نواری اپتیکی در جذب بالا ($\alpha(\omega) > 10^4 \text{ cm}^{-1}$) می‌توانیم از رابطه زیر با عنوان معادله

تاک^۱ استفاده نمود.

^۱ Tac Equation

$$(ahv)^{\frac{1}{m}} = \text{const}(hv - E_g) \quad (2-22)$$

در این رابطه h ثابت پلانک، α ضریب جذب و E_g گاف نواری می‌باشد. اگر گاف نواری مستقیم باشد مقدار $m = \frac{1}{2}$ و همچنین اگر مقدار گاف نواری غیرمستقیم باشد مقدار $m = 2$ می‌باشد. برای محاسبه گاف نواری اپتیکی از طریق این معادله می‌توان از روش برون‌یابی نمودار $(ahv)^{\frac{1}{m}}$ بر حسب hv استفاده شود [۶۸]. برای نیمه‌هادی آمورف معمولاً گاف نواری اپتیکی غیرمستقیم می‌باشد [۶۹] و با توجه به اینکه ما در این تحقیق به بررسی فیلم‌های آمورف کربنی می‌پردازیم پس برای محاسبه گاف نواری اپتیکی در معادله تاک از مقدار $m = 2$ استفاده خواهد شد. برای بررسی خواص اپتیکی فیلم‌های Cu-DLC از دستگاه طیف‌سنج Shimadzu UV-Vis. 1800 که دارای بازه طول موجی ۴۰۰-۱۱۰۰ nm می‌باشد استفاده شده است.

۶-۲ مشخصه‌یابی الکتریکی

در این تحقیق برای مشخصه‌یابی جریان-ولتاژ (I-V) فیلم‌های نازک لایه‌نشانی شده از دستگاه پتانسیومتر آنالیز الکتروشیمیایی مدل PGS2065 واقع در دانشگاه صنعتی شاهرود که در شکل ۹-۲ نشان داده شده است، استفاده گردید.



شکل ۹-۲: دستگاه پتانسیومتر آنالیز الکتروشیمیایی مدل PGS2065

از آنجا که مقاومت می‌تواند بر مقاومت سری، ولتاژ آستانه، ظرفیت خازنی و دیگر پارامترها تاثیرگذار باشد، به همین دلیل اندازه گیری مقاومت فیلم‌های لایه نازک یکی از رایج‌ترین تست‌های الکتریکی می‌باشد. در این تحقیق برای بررسی مقاومت نمونه‌ها از مشخصه‌یابی جریان-ولتاژ ($I-V$) استفاده شده است. برای انجام این آنالیز ابتدا با استفاده از ماسک شانه‌ای یک ارتباط فلز-نیم‌رسانا با لایه‌نشانی بسیار ناچیز فلز (طلا) ایجاد می‌کنند و سپس الکتروود را به وسیله سیم مسی به دستگاه متصل خواهند نمود. حال با متصل کردن اتصال الکتریکی دستگاه به پایانه‌های خروجی نمونه و با اعمال یک ولتاژ در بازه‌های معین با سرعت روبش قابل تنظیم جریان عبوری از نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. برای مشاهده اطلاعات ذخیره‌سازی شده به کامپیوتر متصل به آن ارسال می‌گردد. در واقع مقدار افت ولتاژ در نمونه اندازه‌گیری می‌شود و شیب نمودار مقدار مقاومت سطحی نمونه را مشخص خواهد کرد.

فصل سوم

چیدمان و مراحل انجام آزمایش، با استفاده از دستگاه کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و فرکانس رادیویی

همزمان

۳-۱ مقدمه

برای ایجاد فیلم‌های نازک با کیفیت مناسب فراهم شدن شرایط بهینه‌ای نیاز می‌باشد که این شرایط شامل رسوب مناسب، روش‌های لایه‌نشانی بهینه و هزینه تولید مقرون به صرفه و ... می‌باشد. یکی از مهم‌ترین شرایط برای ایجاد لایه‌های نازک، با کیفیت مناسب از لحاظ فیزیکی و الکتریکی انتخاب روش‌ها و ابزار آلات مناسب برای لایه‌نشانی می‌باشند تا فیلم‌هایی با کیفیت بالاتر و مقرون به صرفه تولید شوند. برای ایجاد فیلم‌های نازک معمولاً روش‌های متعدد فیزیکی و شیمیایی در صنعت و آزمایشگاه از قبیل لیزر پالسی، قوس کاتدی و کندوپاش مغناطیسی و ... وجود دارد. فیلم‌های کربن شبه‌الماسی (DLC) که یکی از انواع فیلم‌های لایه نازک می‌باشند به روش‌های مرسوم موجود مانند کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم، لیزر پالسی و ... برای لایه‌نشانی آن‌ها استفاده می‌شود. در این پایان نامه از روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و فرکانس رادیویی به طور همزمان برای تولید فیلم‌های نازک کربن شبه‌الماسی با ناخالصی غیرکاربیدی که نانو ذرات فلزی مس می‌باشد، استفاده شده است. دلیل انتخاب این نوع از روش لایه‌نشانی کارایی بالا، کیفیت لایه‌نشانی مناسب و توانایی ایجاد فیلم‌های یکنواخت می‌باشد. همچنین هزینه لایه‌نشانی کم و نحوه کارکرد ساده و آسان با این روش سبب انتخاب این روش برای ایجاد فیلم‌های نازک کربن شبه‌الماسی با ناخالصی غیرکاربیدی شده است. در این فصل به نحوه آماده‌سازی و لایه‌نشانی فیلم‌های Cu-DLC با استفاده از روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان پرداخته خواهد شد.

۳-۲ آماده سازی زیرلایه

در تمامی مراحل انجام تحقیق در این پایان نامه از زیرلایه‌های شیشه‌ای با ابعاد $75 \times 25 \times 1 \text{ mm}^3$ استفاده شده است. برای اینکه فیلم‌های خالص و بدون آلودگی و همچنین با خواص اپتیکی بهینه ایجاد

شود لازم است زیرلایه‌ها قبل از انجام مراحل لایه‌نشانی عاری از هرگونه آلودگی و لکه گردند. بدین منظور زیرلایه‌ها ابتدا با آب و صابون برای تمیز کاری اولیه شستشو داده شده و سپس با آب مقطر یک بار تقطیر شده آبکشی می‌گردند. زیرلایه‌ها بعد از شستشو به مدت ۱۵ دقیقه در محلول آب مقطر قرار داده می‌شوند و سپس همان زیرلایه‌ها برای تمیزی بهتر و با کبیرازش‌تر به مدت ۲۰ دقیقه در محلول استون و اتانول (هرکدام به مقدار ۵۰ درصد) در دستگاه حمام اولتراسونیک و در دمای 50°C شستشوی مجدد می‌شوند. پس از اتمام کار شستشو زیرلایه‌ها با سشوار خشک و آماده لایه‌نشانی می‌شوند.

۳-۳ سیستم کندوپاش

در این تحقیق از سیستم کندوپاشی سه حالته مدل DST2-T استفاده شده است که شامل سه کارکرد، کندوپاشی مغناطیسی جریان مستقیم (DC)، کندوپاش مغناطیسی فرکانس رادیویی (RF) و همچنین تبخیر حرارتی یا جریان بالا (Hc^1) می‌باشد. نمای کلی این سیستم کندوپاش در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. برای انجام کارهای تحقیقاتی در این پایان نامه از دو کارکرد این سیستم یعنی کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم (DC) و کندوپاش مغناطیسی فرکانس رادیویی (RF) به طور همزمان با حضور و عدم حضور ولتاژ بایس زیرلایه استفاده شده است که در ادامه به بررسی هریک از سیستم‌های کندوپاشی برای انجام مراحل لایه‌نشانی پرداخته خواهد شد.

¹High current



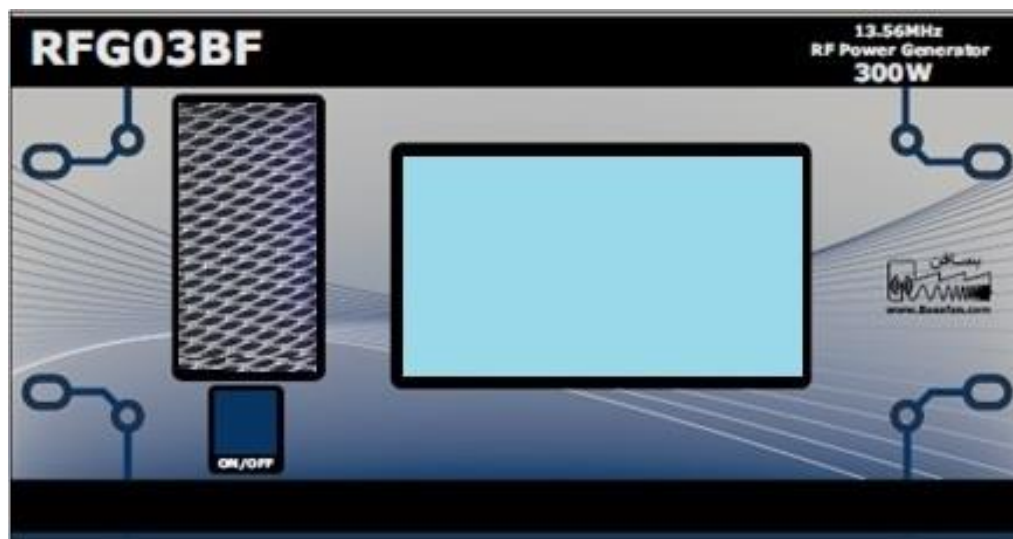
شکل ۳-۱: نمای کلی سیستم کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان واقع در دانشگاه صنعتی شاهرود

۳-۳-۱ کندوپاش مغناطیسی فرکانس رادیویی

این سیستم کندوپاش مغناطیسی خود شامل دو قسمت یا دارای دو سیستم جدا از هم برای انجام مراحل لایه‌نشانی و ایجاد فیلم‌های نازک می‌باشد. این دو قسمت شامل یک سیستم منبع تغذیه فرکانس رادیویی و یک سیستم جداگانه به نام سیستم تطبیق امپدانس می‌باشد.

۳-۱-۱ منبع تغذیه فرکانس رادیویی

در این تحقیق از یک مولد فرکانس رادیویی مدل RFG03BF که با توان ۳۰۰W و فرکانس ۱۳/۵۶MHz که ساخت شرکت بسا فن می باشد، استفاده شده است. مولد فرکانس رادیویی در حقیقت یک منبع سیگنال سینوسی در محدوده فرکانس رادیویی می باشد، که می تواند توانی معادل ۳۰۰ وات را به یک بار الکتریکی ۵۰ اهم خالص اعمال نماید. به این دلیل از این فرکانس در منابع تغذیه فرکانس رادیویی استفاده می شود که یکی از پرکاربردترین باندهای بین المللی آزاد می باشد. یعنی جزو فرکانس هایی است که کاربرد صنعتی، علمی و پزشکی دارند. در این باند اجازه فعالیت هایی در حد توان بالا بدون اینکه اختلالی در سیستم مخابراتی اطراف ایجاد نماید وجود دارد، زیرا باندی است که برای استفاده عموم اختصاص یافته است که در این باند از مولدهایی با توان چند میلی وات تا چند صد کیلو وات استفاده می شود. منبع تغذیه فرکانس رادیویی استفاده شده در این تحقیق در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲: منبع تغذیه فرکانس رادیویی با توان خروجی 300 W و فرکانس 13.56 MHz

در این تحقیق از منبع تغذیه فرکانس رادیویی برای کندوپاش از سطح ماده هدف مس استفاده شده

است .

۳-۱-۲-۳ دستگاه تطبیق امپدانس

از آن جایی که محفظه‌ی پلاسمایی از نظر الکتریکی باری متغیر با زمان محسوب می‌شود و امپدانس آن از ابتدای فرآیند تا انتهای آن ثابت نیست، لازم است که بین مولد فرکانس رادیویی و محفظه پلاسمایی یک شبکه تطبیق قرار داده شود. در حقیقت ما در جعبه تطبیق امپدانس سعی می‌کنیم که با اندازه‌گیری امپدانس محفظه و اعمال کنترل مناسب، بر روی المان‌های موجود در مولد فرکانس رادیویی، مولد در تمام طول فرآیند (با وجود تغییر بار الکتریکی محفظه) در خروجی خود بار ۵۰ اهم خالص را ببیند تا توان انعکاسی از محفظه به ژنراتور به صفر برسد تا هم توان مولد به صورت بهینه استفاده شود و همچنین با توجه به انعکاس امواج، از آسیب مولد فرکانس رادیویی جلوگیری گردد. مولدهای فرکانس رادیویی به صورت استاندارد با امپدانس ۵۰ اهم طراحی و ساخته می‌شوند. از آنجایی که محفظه پلازما اغلب دارای بارهای دیگری می‌باشند که نیاز به اعمال توان RF دارند، و همچنین دارای امپدانس معادل غیر ۵۰ اهم و معمولاً همراه با بخش سلفی و خازنی می‌باشد. بنابراین برای جلوگیری از انعکاس توان ارسال شده توسط مولد و حفاظت مولد RF و به حداکثر رساندن توان رسیده به بار و تکرار پذیر کردن فرآیندها و همچنین فراهم آوردن شرایط شدت میدان لازم در محفظه قبل و بعد از تشکیل پلازما نیاز به سامانه‌ای است که امپدانس معادل بار را به امپدانس مولد تغییر سطح دهد. این کار توسط شبکه تطبیق امپدانس که با نام مچینگ باکس^۱ نیز شناخته شده انجام می‌گیرد. دستگاه تطبیق امپدانس استفاده شده در این تحقیق از مدل MTC03BF با توان ۳۰۰ وات بوده است که توسط شرکت بسا فن تولید شده و در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. در این تحقیق برای تطبیق امپدانس محفظه و منبع تغذیه فرکانس رادیویی پس از اعمال توان دلخواه با پیچاندن و تنظیم دو پیچ تعبیه شده بر روی دستگاه توان انعکاسی به منبع تغذیه صفر خواهد شد

^۱Matchbox

و همچنین از آسیب به دستگاه و خاموش شدن پلاسما جلوگیری می‌گردد.

۳-۲-۳ کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم (DC)



شکل ۳-۳: دستگاه تطبیق امپدانس مدل MTC03BF با توان خروجی 300 W

این سیستم کندوپاشی که معمولاً برای لایه‌نشانی مواد مختلف رسانا استفاده می‌شود برخلاف سیستم فرکانس رادیویی فقط شامل یک منبع تغذیه جریان مستقیم و یک محفظه برای انجام مراحل کندوپاش می‌باشد. در این تحقیق از منبع تغذیه جریان مستقیم با توان خروجی ۱۲۰۰ وات که بالاترین جریان و ولتاژ خروجی آن به ترتیب ۱۰۰۰ میلی آمپر و ۱۲۰۰ ولت می‌باشد استفاده شده است. توان خروجی دستگاه از حاصل ضرب ولتاژ در جریان خروجی بدست می‌آید که ۱۲۰۰ وات می‌باشد. این منبع تغذیه با اعمال اختلاف پتانسیل (ولتاژ) به دوسر دو الکترود داخل محفظه خلاء باعث ایجاد پلاسما در داخل آن می‌شود. برای ایجاد فرآیند لایه‌نشانی بوسیله منبع تغذیه جریان مستقیم، ابتدا پیچ مخصوص تغییر ولتاژ را که بر روی منبع تغذیه قرار دارد، به نحوی تنظیم می‌گردد تا به ولتاژ مناسب که در آن پلاسما شروع به روشن شدن می‌نماید برسد در همین حین جریان منبع تغذیه تا روشن شدن پلاسما تغییر می‌کند و سپس ثابت می‌گردد. حال پس از روشن شدن پلاسما برای انجام فرآیند لایه‌نشانی، مجدد ولتاژ و جریان خروجی منبع تغذیه به نحوی

که به توان مطلوب برای شروع فرآیند لایه‌نشانی برسند تنظیم می‌گردد. در این تحقیق منبع تغذیه جریان مستقیم برای ایجاد فیلم‌های نازک و انجام فرآیند لایه‌نشانی به ترتیب در توان‌های ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ قرار داده شده است. در این تحقیق از منبع تغذیه جریان مستقیم ساخت شرکت نانو ساختارها استفاده شده است که در شکل ۳-۴ تصویر آن نشان داده شده است.



شکل ۳-۴: تصویر منبع تغذیه جریان مستقیم

۳-۴ منبع تغذیه ولتاژ بایاس

به منظور ایجاد لایه‌های یکنواخت و سخت‌تر معمولاً یک منبع تغذیه ولتاژ بایاس را به زیرلایه متصل می‌کنند تا با اعمال ولتاژ بایاس فیلم‌های با کیفیت بالاتر تهیه شود، که منبع تغذیه ولتاژ بایاس استفاده شده در این پروژه در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. منبع تغذیه ولتاژ بایاس دارای ولتاژ متغیری بین ۰ تا ۳۰۰V می‌باشد. دلیل استفاده از ولتاژ بایاس بدین خاطر می‌باشد که با اعمال ولتاژ معکوس سرعت فرآیند کندوپاش افزایش پیدا می‌کند و در واقع سرعت و انرژی ذرات فرودی به زیرلایه بیشتر شده و یکنواختی و سختی فیلم‌ها نیز افزایش پیدا می‌کند. در اثر اعمال ولتاژ بایاس سرعت و انرژی ذرات زیاد می‌شود که افزایش سرعت ذرات سبب افزایش دما زیرلایه هنگام برخورد ذرات با آن می‌شود که این یک اشکال برای

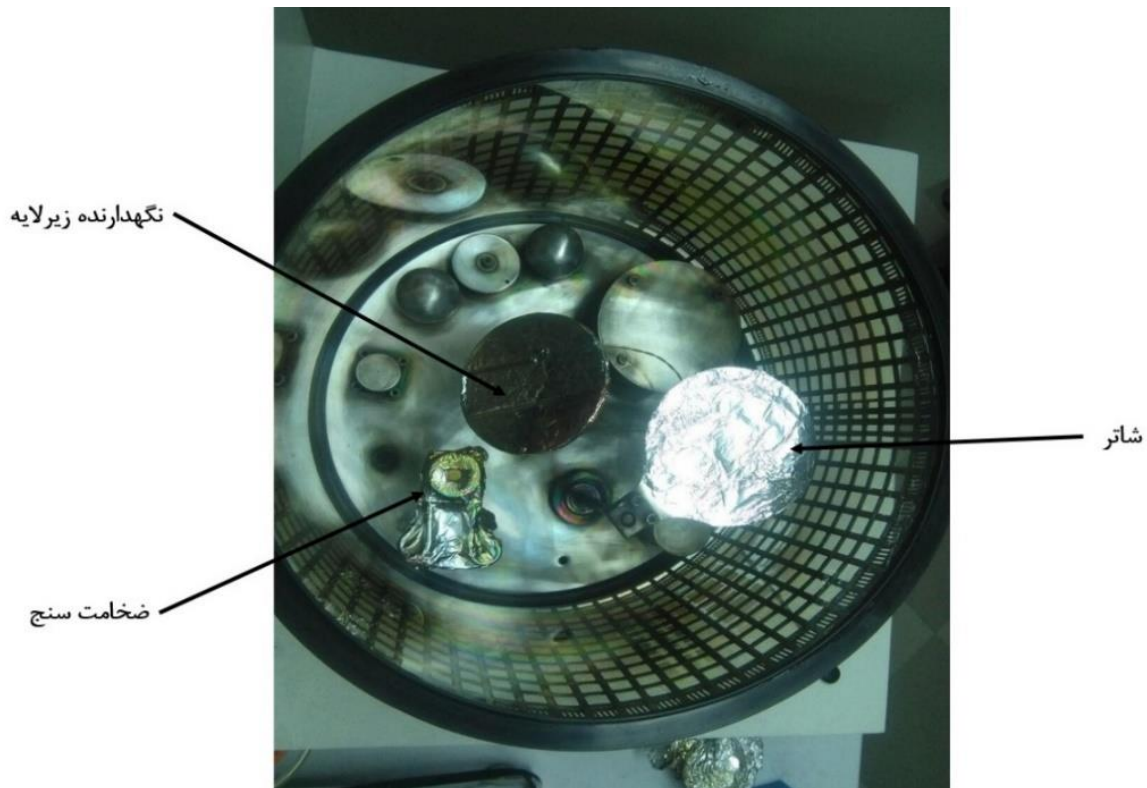
انجام آزمایش می‌باشد زیرا سبب آسیب به موتور نگهدارنده و چرخنده زیرلایه که زیرلایه برروی آن قرار می‌گیرد می‌شود. به همین دلیل بیشترین مقدار ولتاژ بایاس استفاده شده در این تحقیق $-200V$ می‌باشد. همچنین در این تحقیق برای تهیه فیلم‌ها، ولتاژ بایاس از 0 تا $-200V$ انتخاب شده که در هر مرحله به ولتاژ بایاس مقدار 50 واحد اضافه می‌شود و در واقع فرآیند لایه‌نشانی فیلم‌های Cu-DLC ایجاد شده در ولتاژ بایاس‌های 0 ، 50 ، 100 ، 150 ، 200 ولت انجام شده است



شکل ۳-۵: تصویر منبع تغذیه ولتاژ بایاس معکوس

۳-۵ محفظه لایه‌نشانی

محفظة لایه‌نشانی که در شکل ۳-۶ نشان داده شده است در این سیستم شامل یک استوانه پیرکس به قطر ۳۰۰ mm و ارتفاع ۲۵۰ mm می‌باشد.



شکل ۳-۶: نمایی از محفظه لایه‌نشانی شامل نگهدارنده، شاطر و ضخامت‌سنج

قابل جابجایی بوده و همچنین دور محفظه با یک استیل مشبک جهت حفاظت از آن پوشانده شده است. حال به بررسی اجزای و محتویات داخل محفظه لایه‌نشانی می‌پردازیم.

۳-۵-۱ نگهدارنده زیر لایه

برای نگهداری زیر لایه و انجام فرآیند لایه‌نشانی در این تحقیق از یک نگهدارنده دایره‌ای شکل متخلخل که دارای مزایای و ویژگی‌های می‌باشد استفاده شده است. از ویژگی‌های این نگهدارنده می‌توانیم به توانایی

چرخش ۳۶۰ درجه که سبب ایجاد فیلم‌هایی با یکنواختی بالا می‌شود نام برد. سرعت چرخش نگهدارنده در تمامی مراحل انجام آزمایش ۸rpm می‌باشد. همچنین از دیگر ویژگی‌ها نگهدارنده که بسیار حائز اهمیت می‌باشد قابل تنظیم بودن فاصله زیرلایه تا ماده هدف است، که در این سیستم لایه‌نشانی این فاصله بین ۴۰ تا ۱۲۰ mm قابل تغییر می‌باشد. به دلیل کم بودن بازده کندوپاشی ماده هدف گرافیت (۲/۰٪) فاصله ماده هدف تا زیرلایه در تمامی مراحل انجام آزمایش در فاصله مناسب ۶۰ mm قرار داده شده است. همچنین در این سیستم کندوپاشی، سیستم نگهدارنده به نحوی طراحی شده است که توانایی اعمال ولتاژ بایاس به زیرلایه را نیز دارا می‌باشد.

۳-۵-۲ شاتر

شاتر ورقه استیل نازکی می‌باشد، که به صورت الکترونیکی کنترل می‌شود و بر روی ماده هدف قرار می‌گیرد تا بوسیله آن بتوان لایه‌نشانی‌های ناخواسته حین فرآیند کندوپاش را کنترل کرد. کارکرد اصلی شاتر در سیستم‌های کندوپاشی، درست در هنگام قبل از شروع فرآیند لایه‌نشانی، که سیستم در حال خالص‌سازی و پاک‌سازی سطح ماده هدف از آلودگی‌های موجود می‌باشد است، تا عمل لایه‌نشانی به آسانی انجام شود. این پاک‌سازی بوسیله پلاسمای تشکیل شده انجام می‌گیرد، و شاتر بر روی زیرلایه قرار می‌گیرد تا سبب جلوگیری از قرار گرفتن مواد آلوده کنده شده از سطح ماده هدف بر روی زیرلایه شود. هنگامی که این خالص‌سازی به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد و ماده هدف پاک و خالص شد، شاتر کنار می‌رود تا فرآیند لایه‌نشانی شروع شود. در انتهای فرآیند لایه‌نشانی، وقتی که لایه‌نشانی به اتمام رسید و فیلم مطلوب ما ایجاد شد سیستم به صورت اتوماتیک خاموش شده و شاتر را دوباره بر روی زیرلایه قرار می‌دهد تا سبب جلوگیری از قرار گرفتن آلودگی ثانویه بر روی فیلم ایجاد شده گردد.

۳-۵-۳ ضخامت سنج

ضخامت سنج دستگاهی است که برای اندازه گیری ضخامت لایه های نازک در دستگاه های لایه نشانی مورد استفاده قرار می گیرد. اصول کار دستگاه های ضخامت سنجی بر اساس تغییر فرکانس نوسان کریستالی از جنس کوارتز که بر روی دستگاه قرار دارد می باشد. با اندازه گیری تغییرات فرکانس کریستال موجود در دستگاه، نرخ لایه نشانی و میزان لایه نشاندۀ شده قابل اندازه گیری می باشد. معمولاً برای تعیین ضخامت لایه از روش های متنوعی استفاده می شود که در همه آنها یک ویژگی از ماده که به صورت قابل قبولی با ضخامت مرتبط است، مورد استفاده قرار می گیرد. عمومی ترین روش تعیین ضخامت لایه ها که در این سیستم کندوپاشی نیز از آن استفاده شده است، ضخامت سنجی کریستالی می باشد که در آن از پارامتر تغییر جرم برای ضخامت سنجی استفاده می شود و به وسیله آن می توان ضخامت لایه و آهنگ انباشت لایه را کنترل نمود. نحوه کارکرد این ضخامت سنج به این گونه است که در حین فرآیند لایه نشانی فرکانس کریستال که در آن استفاده شده است متناسب با جرم انباشت شده روی سطح آن تغییر می کند و با تغییر این فرکانس میزان ضخامت لایه و نرخ لایه نشانی را در حین فرآیند مشخص می کند. در واقع این دستگاه از دو بخش نوسان ساز و آشکارساز تشکیل شده است، که با اعمال یک جریان به ضخامت سنج، شروع به نوسان سازی می کند. از آنجایی که فرکانس کریستال مورد استفاده در سیستم که کوارتز با پوشش طلا بوده است مشخص می باشد، با ایجاد لایه بر روی کریستال و تغییر جرم و به طبع آن تغییر فرکانس، ضخامت و نرخ لایه نشانی مشخص می گردد. ضخامت سنج ها معمولاً در بین ماده هدف و زیرلایه و بالای زیرلایه قرار می گیرد تا میزان ماده لایه نشانی شده و نرخ لایه نشانی را در حین فرآیند بر روی زیرلایه مشخص کند.

۳-۵-۴ ماده هدف

ماده هدف اجسامی با چگالی بالا از جنس مواد مختلف می‌باشند که به عنوان چشمه‌های کندوپاشی از آن‌ها استفاده می‌شود. ماده هدف مورد استفاده در این آزمایش شامل ماده هدف گرافیت و ورقه مسی می‌باشد که در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.



شکل ۳-۷: تصویری از ماده‌های هدف و نگهدارنده آن در سیستم کندوپاشی

در این تحقیق از ماده هدف گرافیتی با خلوص ۹۹ درصد و قطر ۲ اینچ و ضخامت ۵ میلی‌متر که ساخت شرکت لسکر آمریکا بوده و همچنین ورقه مسی با قطر ۲ اینچ و ضخامت ۱ میلی‌متر به عنوان ماده هدف مسی که از بازار تهیه شده است مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۵-۵ نگهدارنده ماده هدف

برای نگهداری ماده هدف در این تحقیق، از دو نگهدارنده استفاده شده است، که در پشت آن مگنت‌های دایره‌ای کوچک به صورت تعادلی قرار دارند. برای اینکه ماده هدف بر روی کاتد قرار بگیرد از یک واشر (آند)

و پیچ برای اتصال استفاده شده است. شکل ۳-۷ تصویر ماده هدف و نگهدارنده آن را در سیستم کندوپاشی نشان می‌دهد.

۳-۶ خلاءسازی

برای ایجاد خلاء در سیستم‌های کندوپاشی به دستگاه‌های خلاءساز نیاز می‌باشد. دستگاه‌های خلاءساز دستگاه‌هایی می‌باشند که با تخلیه مولکول‌های هوا (یا گازهای دیگر) از یک حجم مشخص از یک محفظه آب‌بندی شده یک فشار منفی یا (خلأ نسبی) ایجاد می‌کند. معمولاً دستیابی به خلأهای بالا کاری دشوار و سخت می‌باشد. زیرا همه مواد وقتی که در معرض خلأ قرار گیرند واکنش‌هایی از خود نشان می‌دهند. مانند تبخیر گازهایی که قبلاً جذب شده اند. به همین دلیل برای رسیدن به خلأهای بالا در بعضی مواقع نیاز به استفاده بیش از یک پمپ خلأ می‌باشد که این پمپ‌ها می‌توانند به صورت سری یا موازی به هم متصل شوند. در این تحقیق برای ایجاد خلأ بالا از پمپ‌های روتاری و توربومولکولی که به صورت سری به هم متصل شده اند استفاده شده است. بدین صورت که در ابتدا پمپ روتاری فشار داخل محفظه را از فشار اتمسفر به فشار در حدود 10^{-2} torr می‌رسانند و سپس برای ایجاد خلأهای بالاتر که در این تحقیق تا فشار 10^{-5} torr نیاز می‌باشد از پمپ توربومولکولی استفاده می‌شود. پمپ‌های توربومولکولی را نیز نمی‌توان در فشار اتمسفر استفاده کرد و در وروی آن حتماً باید فشار خلأ مناسبی ایجاد شود تا بتوان از این نوع پمپ‌ها استفاده کرد. در واقع دلیل اصلی استفاده از پمپ‌های روتاری قبل از توربومولکولی برای ایجاد این خلأ اولیه می‌باشد. در این سیستم کندوپاشی از پمپ روتاری با مدل WFE45 و پمپ توربومولکولی با مدل SDI54 استفاده شده است. در شکل ۳-۸ پمپ‌های روتاری و توربومولکولار نشان داده شده است که تصویر سمت راست پمپ روتاری و سمت چپ پمپ توربومولکولی می‌باشد.



شکل ۳-۸: تصویری از پمپ‌های روتاری و توربومولکولی

۷-۳ گاز

در این تحقیق برای شروع فرآیند لایه‌نشانی و تولید پلاسما از گاز آرگون که جزء گازهای نجیب در جدول تناوبی می‌باشد و با خلوص ۹۹/۹۹ درصد استفاده شده است. برای تولید پلاسما در سیستم‌های کندوپاشی معمولاً از گازهای نجیب و بی‌اثر استفاده می‌گردد که گاز آرگون نیز دارای بیشترین استفاده می‌باشد. دلیل استفاده از گازهای نجیب برای ایجاد پلاسما در این سیستم‌ها بدین خاطر می‌باشد که این گازها در گروه آخر جدول تناوبی مندلیف قرار گرفته‌اند و الکترون ظرفیت این گازها در فاصله دورتری از هسته قرار دارند و به خاطر اثر همپوشانی الکترون‌های داخلی، الکترون‌های ظرفیت به سهولت از اتم می‌توانند جدا شوند و تولید پلاسما نماید. از دلایل دیگر استفاده از این نوع گازها عدم شرکت در واکنش‌های شیمیایی و بی‌اثر بودن در واکنش‌ها می‌باشد.

۳-۸ کنترل کننده شار جرمی (MFC)

دستگاه‌های کنترل و اندازه‌گیری دبی از جمله پرمصرف‌ترین دستگاه‌های اندازه‌گیری در صنایع گوناگون می‌باشند. نوع سیال، میزان دبی عبوری، دقت اندازه‌گیری مطلوب، شرایط محیطی و بسیار عوامل دیگر باعث شده است تا انواع گوناگونی از دستگاه‌های کنترل اندازه‌گیری دبی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار بگیرد. با استفاده از دستگاه کنترل کننده‌ی شار جرمی که جزء دستگاه‌های اندازه‌گیری و کنترل شار سیال می‌باشد، می‌توان شار گاز مورد نظر را که در این مطالعه گاز آرگون می‌باشد را بر حسب sccm اندازه‌گیری نمود. دستگاه کنترل کننده شار جرمی مورد استفاده در این تحقیق از نوع Breezens بوده که توانایی عبور شار گاز تا ۲۰۰۰۰ sccm را نیز دارا می‌باشد. این سیستم کندوپاشی دارای دو دستگاه اندازه‌گیری شار جرمی می‌باشد تا بتوان در هنگام استفاده از دو گاز متفاوت شار جرمی هر دو نوع گاز را کنترل نمود که در شکل ۳-۹ یک نمونه از این نوع کنترل کننده جرمی نشان داده شده است.



شکل ۳-۹: تصویری از یک کنترل کننده شار جرمی

^۱Mass flux controller

فصل چهارم

نتیج و بحث حاصل از لایه نشانی کربن شبه الماسی با ناخالصی غیر کاربیدی

۴-۱ مقدمه

در فصل اول این تحقیق به معرفی کربن و ساختارهای مرتبط به آن پرداخته شد. در فصل دوم روش‌های آنالیز کربن شبه‌الماسی بیان شد و همچنین در فصل سوم نیز روش لایه‌نشانی و مراحل انجام آزمایش شرح داده شده است. در این فصل به بررسی و تحلیل فیلم‌های آمورف کربنی یا همان کربن شبه‌الماسی ایجاد شده توسط روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان با ناخالصی غیرکابیدی پرداخته خواهد شد. در این تحقیق چند نوع از فیلم‌های کربن شبه‌الماسی لایه‌نشانی شده در اثر تغییر چند پارامتر ایجاد شده است. در ابتدا به بررسی تاثیر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم بر روی خواص ساختاری، اپتیکی و الکتریکی فیلم‌های کربن شبه‌الماسی با ناخالصی غیرکابیدی که توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی در آن ثابت است پرداخته می‌شود. در بخش دوم این فصل نیز به بررسی خواص ساختاری، الکتریکی و اپتیکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن منبع تغذیه فرکانس رادیویی با اعمال ولتاژ بایاس ثابت به همه فیلم‌ها پرداخته شده است. در بخش سوم به بررسی تاثیر تغییر ولتاژ بایاس با ثابت بودن توان‌های منبع تغذیه جریان مستقیم و فرکانس رادیویی بر روی خواص الکتریکی، اپتیکی و ساختاری فیلم‌های لایه‌نشانی شده پرداخته شده و در بخش چهارم به بررسی تاثیر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی بر روی خواص فیزیکی اساسی فیلم‌های لایه‌نشانی شده پرداخته می‌شود. در این پژوهش خواص ساختاری فیلم‌های لایه‌نشانی شده با استفاده از آنالیز رامان مورد ارزیابی قرار گرفت. خواص اپتیکی فیلم‌ها بوسیله آنالیزهای طیف‌سنجی بیضی‌سنجی و طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش، بررسی خواص الکتریکی توسط آنالیز الکتروشیمیایی و همچنین طیف‌سنجی پلاسما نیز بوسیله آنالیز OES انجام گرفته است.

۲-۴ بررسی اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم در توان ثابت منبع

تغذیه فرکانس رادیویی همزمان

در این بخش به بررسی فیلم‌های آمورف کربنی با ناخالصی غیرکاربیدی (مس) لایه‌نشانی شده به روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان پرداخته شده است. در این بخش فیلم‌ها با تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم در ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰W و با ثابت نگه داشتن توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی در ۱۰W ایجاد شده است. پارامترهای اساسی استفاده شده برای انجام آزمایش در جدول ۱-۴ نمایش داده شده است.

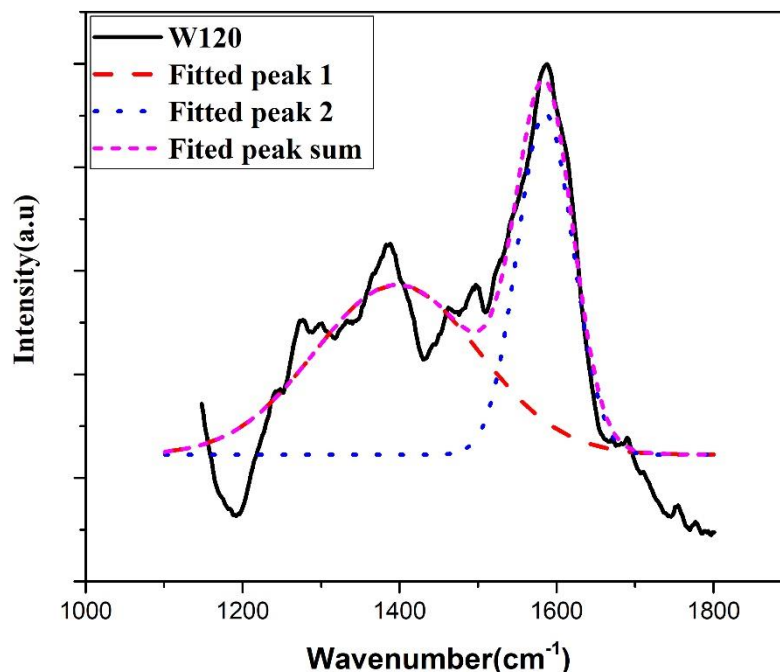
جدول ۱-۴: پارامترهای استفاده شده برای ایجاد فیلم‌ها Cu-DLC در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم

نام فیلم	توان DC(W)	توان RF(W)	شار گاز(sccm)	زمان(min)
W60	۶۰	۱۰	۳۰	۱۰۵
W80	۸۰	۱۰	۳۰	۷۵
W100	۱۰۰	۱۰	۳۰	۶۰
W120	۱۲۰	۱۰	۳۰	۴۰

۱-۲-۴ طیف‌سنجی رامان

در این آزمایش پس از انجام مراحل لایه‌نشانی نمونه‌ها مورد آنالیز قرار گرفته شده است و نمودار طیف رامان آن‌ها بصورت جداگانه رسم شده است. نمودارهای زیر نشان دهنده طیف رامان نمونه‌ها در توان ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ وات برای منبع تغذیه DC می‌باشد. طیف رامان نمونه‌ها توسط نرم افزار Origin pro 8

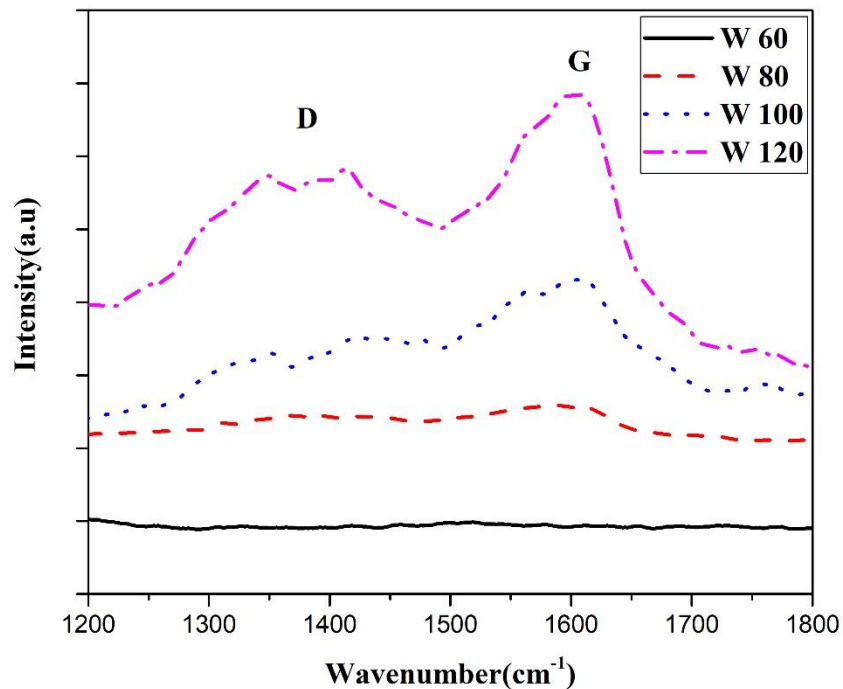
برازش شده‌اند که دارای دو برازش گوسی به نام‌های قله گرافیتی (G) و پراکندگی (D) می‌باشد که با استفاده از این روش مساحت زیر سطح هر قله و موقعیت قله G مشخص می‌شود و در هر یک از نمونه‌ها مشاهده شده است [۲۶]. با توجه به آنالیز طیف‌سنجی رامان نمونه‌ی W60، ساختار مشخصی که نشان دهنده فیلم‌های DLC باشد مشاهده نشده است. در شکل ۴-۱ طیف رامان فیلم W120 به همراه برازش‌های گوسی آن‌ها نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱: نمودار فیت‌های گوسی برای نمونه W120

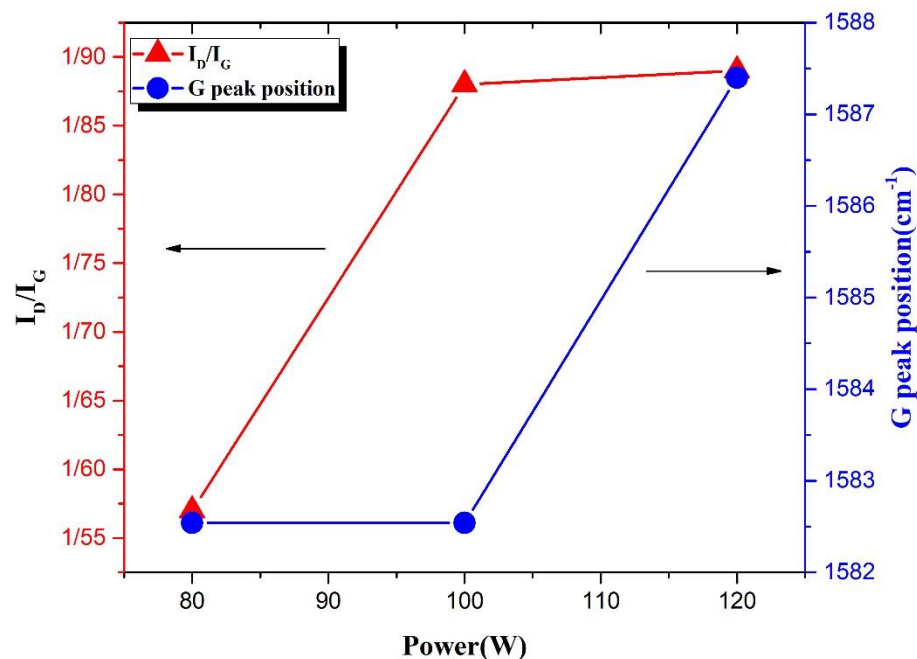
آنالیز رامان یکی از روش‌های طیف‌سنجی غیرمخرب و بهترین روش برای تشخیص ساختار کربن شبه‌الماسی می‌باشد [۷۰] این روش برای بررسی ساختاری فیلم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و محتوای تقریبی SP³ در فیلم‌های DLC لایه‌نشانی شده تعیین می‌شود [۷۱]. در شکل ۴-۲ طیف‌های آنالیز رامان برای فیلم‌های لایه‌نشانی شده نشان داده شده است. طیف پراکندگی رامان فیلم‌های DLC شامل قله‌های اصلی و شانه‌ای پهن است که در دامنه عدد موجی بین ۱۲۰۰-۱۸۰۰ cm⁻¹ مشاهده می‌شود. قله اصلی

در $1500-1600\text{ cm}^{-1}$ به عنوان قله G شناخته می‌شود که مربوط به مد ارتعاش کششی از پیوندهای SP^2 کربن است. شانه پهن در $1200-1400\text{ cm}^{-1}$ به عنوان قله D مربوط به مد ارتعاشی تنفسی از پیوند SP^2 حلقه کربن تعریف می‌شود [۱۳].



شکل ۴-۲: نمودار طیف‌های رامان نمونه‌های لایه‌نشانی شده در توان‌های ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ منبع تغذیه جریان مستقیم

مطابق شکل ۴-۲ با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم از ۶۰ تا به 120 W شدت قله‌های رامان فیلم‌های لایه‌نشانی شده افزایش یافته است. با برازش کردن چند تابع گاوسی قله رامان به ترتیب به دو قله G و D تجزیه می‌شوند. در طیف‌سنجی رامان موقعیت قله G و نسبت شدت قله D به G (I_D/I_G) که در شکل ۴-۳ نشان داده شده است به عنوان تحلیلی برای بررسی ویژگی پیوند فیلم‌های DLC استفاده می‌شود.



شکل ۳-۴: نمودار تغییرات I_D/I_G و موقعیت قله G برای فیلم‌های لایه‌نشانی شده برحسب تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم

در نمونه W60 بیشتر حجم فیلم‌های لایه‌نشانی شده را نانو ذرات مس تشکیل داده است. در این بخش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی متصل به ماده هدف مس همواره ثابت و در توان 10 W می‌باشد. به دلیل اینکه توان منبع جریان مستقیم متصل به هدف گرافیت کم بوده و منبع تغذیه قادر به کندوپاش از هدف گرافیت به اندازه کافی نمی‌باشد و نتیجتاً مقدار کربن درون ساختار فیلم به اندازه‌ای نبوده که طیف رامان قوی از خود منتشر سازد. در حالی که برای نمونه‌های دیگر، با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم از 80 W تا 120 W شدت طیف رامان به تدریج قوی‌تر شده و همان طور که مشاهده می‌شود موقعیت قله G برای فیلم‌های لایه‌نشانی شده افزایش یافته است. همچنین I_D/I_G فیلم‌ها که نشان دهنده نسبت سطح زیر نمودار قله D به قله G می‌باشد روند افزایشی داشته است. در واقع روند افزایشی در نسبت I_D/I_G بیان کننده افزایش تعداد پیوندهای SP^2 نسبت به پیوندهای SP^3 در فیلم‌های لایه‌نشانی شده می‌باشد [۷۲].

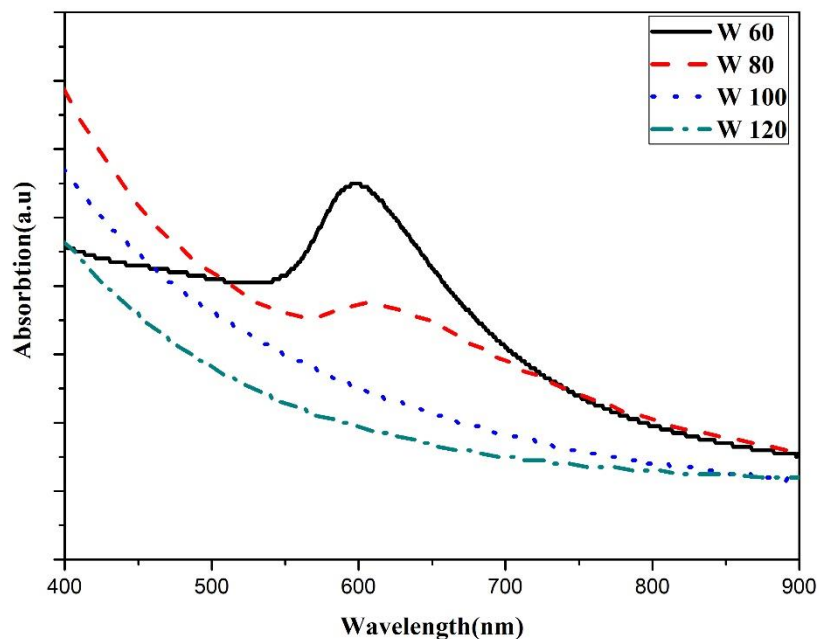
افزایش موقعیت قله G و همچنین روند افزایشی نسبت I_D/I_G که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است بیان

می‌کند که فیلم‌ها در حال گذار از حالت گرافیت به نانو کربن-گرافیت هستند در حالی که اندازه نانو ذرات گرافیتی در حال کاهش می‌باشند ولی حلقه‌های آروماتیک خود را حفظ می‌کنند [۵]. با توجه به روند افزایشی موقعیت G و افزایش نسبت I_D/I_G برای فیلم‌های لایه‌نشانی شده در این تحقیق و همچنین با توجه به کاهش اندازه نانو ذرات گرافیتی و حفظ حلقه‌های آروماتیک نتیجه می‌گیریم که در فیلم‌های لایه‌نشانی شده با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم از ۸۰ W تا ۱۲۰ W تعداد پیوندها SP^2 کربن-کربن روند افزایشی داشته است. با توجه به اینکه خواص اپتیکی و الکترونیکی فیلم‌های DLC به میزان پیوندهای SP^2 وابسته است پس انتظار داریم با افزایش میزان این نوع پیوندها در فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده، ضریب جذب و گاف نواری این نوع از فیلم‌ها روند کاهشی داشته باشند. اما از آنجایی که نانو ذرات مس موجود در فیلم‌ها جزء مواد رسانا هستند و این گونه مواد گاف نواری اپتیکی ندارند پس با کاهش این نانو ذرات گاف نواری فیلم‌ها روند افزایشی را نشان خواهد داد.

۲-۲-۴ بررسی خواص اپتیکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده

۱-۲-۲-۴ طیف جذب

برای بررسی خواص اپتیکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده در ابتدا طیف جذب (A) نمونه‌ها با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی مرئی – فرابنفش (UV -Vis) مدل shimadzu.1800 به دست آمده است که نمودار طیف جذب نمونه‌ها برحسب طول موج در شکل ۴-۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۴: نمودار طیف جذب نمونه‌های لایه‌نشانی شده در توان ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ منبع تغذیه جریان مستقیم

همان طور که در شکل ۴-۴ نشان داده شده است قله‌هایی در طیف جذب نمونه‌های لایه‌نشانی شده قابل مشاهده می‌باشد که این قله‌ها با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم کاهش پیدا می‌کند. این قله برای نمونه W60 دارای بیش‌ترین شدت قله در طیف طول موجی ۵۹۸nm بوده و همچنین برای نمونه W80 شدت این قله در طیف طول موجی ۶۰۴nm مشاهده شده است که به میزان قابل توجه‌ای شدت قله کاهش پیدا کرده است. این روند کاهشی برای نمونه‌های دیگر به طوری صورت گرفته است که برای دو نمونه آخر یعنی W100 و W120 هیچ‌گونه قله مشخصی قابل مشاهده نمی‌باشد. این قله‌های پهنی که در طیف طول موجی بین ۵۵۰-۷۰۰nm مشاهده شده‌اند مربوط به قله پلاسمونی حاصل از نانوذرات مس پراکنده شده در فیلم‌های Cu-DLC می‌باشند. به طور معمول این دسته از قله‌ها در روش‌های لایه‌نشانی کندوپاش مغناطیسی و فرکانس رادیویی در محدوده طول موجی ۵۴۰-۷۵۰nm در فیلم‌های Cu-DLC قابل مشاهده می‌باشند [۷۳]. با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم از ۶۰w به ۱۲۰ که به ماده هدف کربن

متصل است، غلظت ذرات کربن لایه‌نشانی شده به ترتیب بر روی فیلم‌ها افزایش می‌یابد و باعث کاهش غلظت نانو ذرات مس می‌شود، زیرا توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی برای همه نمونه‌ها ثابت بوده است که سبب کاهش قله‌های پلاسmoni در طیف جذبی فیلم‌های لایه‌نشانی شده می‌شود.

۲-۲-۲-۴ گاف نواری

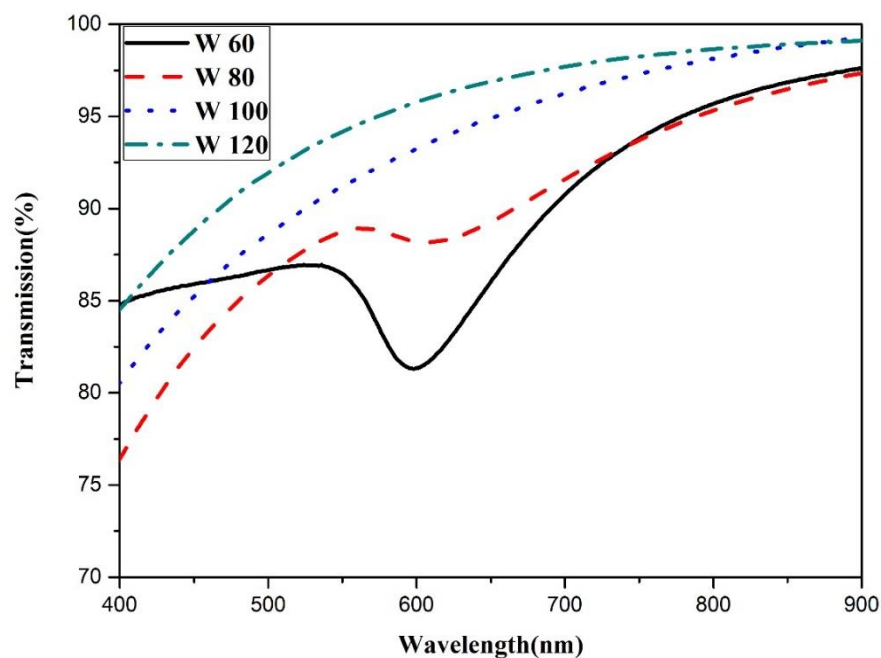
گاف نواری در واقع به اختلاف انرژی بین آخرین نوار ظرفیت و اولین نوار رسانش در نیم‌رسانا گفته می‌شود. این اختلاف انرژی سبب ایجاد خواص اپتیکی و الکترونیکی ویژه‌ای در مواد می‌شود. امروزه با مهندسی گاف نواری در نیم‌رساناها با استفاده از روش‌های لایه‌نشانی به دنبال بهبود خواص اپتیکی در این دسته از مواد می‌باشند. فیلم‌های آمورف کربنی علاوه بر ویژگی‌های مکانیکی و تربولوژیکی دارای ویژگی بسیار مهمی بوده که دارای گاف نواری اپتیکی گسترده می‌باشد. این گاف برای محتوای آمورف کربنی بدون هیدروژن در حد $2/6-2/2$ eV و برای آمورف کربن هیدروژنی بین $4/0-1/7$ الکترون ولت می‌باشد [۷۴]. گاف نواری گسترده را می‌توان بوسیله افزودن ناخالصی‌های فلزی و همچنین ایجاد روش‌های لایه‌نشانی مختلف برای کاربردهای صنعتی مختلف ایجاد کرد. برای محاسبه گاف نواری اپتیکی در این تحقیق از دستگاه طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش استفاده شده است. در اینجا به بررسی دو دسته گاف نواری اپتیکی با نام‌های گاف نواری اپتیکی E_g و E_{04} در فیلم‌های ساخته شده پرداخته خواهد شد.

E04 ۱-۲-۲-۲-۴

E_{04} گاف اپتیکی است که ضریب جذب در آن مقدار 10^4 cm^{-1} می‌باشد. برای محاسبه گاف اپتیکی E_{04} در فیلم‌های لایه‌نشانی شده ابتدا می‌بایست ضریب جذب این نوع از فیلم‌ها مشخص گردد که ضریب جذب فیلم‌های لایه‌نشانی شده با استفاده از معادله ۴-۱ به دست آمده است [۷۵].

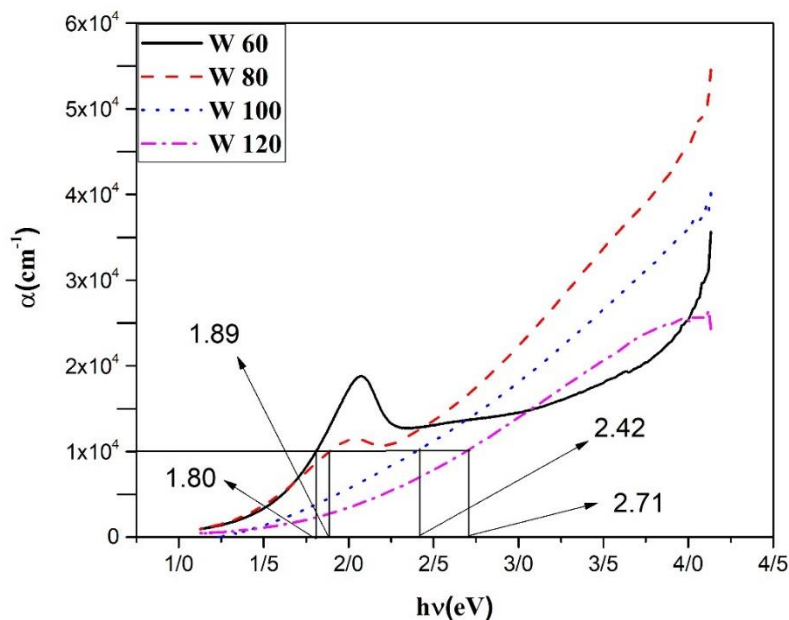
$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (4-1)$$

در این معادله α ضریب جذب و d ضخامت فیلم‌ها می‌باشند و برای تمام فیلم‌ها در حدود 100 nm در نظر گرفته شده است. طیف عبور (T) فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم در شکل ۴-۵ نمایش داده می‌شود.



شکل ۴-۵: طیف عبوری فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم

همان طور که گفته شد با استفاده از طیف عبور و معادله بالا طیف جذب فیلم‌های لایه‌نشانی شده به دست می‌آید که نمودار ضریب جذب فیلم‌های لایه‌نشانی شده بر حسب طول موج در شکل ۴-۶ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۶: ضریب جذب فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده با تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم

با توجه به شکل ۴-۶ مقدار گاف اپتیکی E_{04} فیلم‌های لایه‌نشانی شده با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم روند افزایشی دارد که این مقدار برای نمونه W60 برابر با $1/80 \text{ eV}$ می‌باشد و همچنین برای نمونه W80 این گاف اپتیکی با کمی افزایش، سطح انرژی به مقدار $1/89 \text{ eV}$ می‌رسد و سپس برای نمونه 100 W گاف اپتیکی به میزان $2/42 \text{ eV}$ بوده است. با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم تا به توان 120 W گاف اپتیکی (E_{04}) مقدار $2/71 \text{ eV}$ را نشان می‌دهد. افزایش گاف اپتیکی (E_{04}) در فیلم‌های لایه‌نشانی شده بیانگر کاهش محتوای پیوندهای SP^2 کربن می‌باشد [۷۶] که این روند تغییرات با نتایج حاصل از آنالیز رامان متناقض است. زیرا با توجه به آنالیز رامان محتوای SP^2 در فیلم‌ها در حال افزایش می‌باشد در حالی که نتایج این آنالیز کاهش این نوع از پیوندها را نشان می‌دهد که به سبب حضور نانو ذرات مس در فیلم‌های لایه‌نشانی شده می‌باشد که در بخش بعد توضیح داده خواهد شد. با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم که به ماده هدف کربن متصل است محتوای کربن در فیلم‌ها افزایش می‌یابد در حالی که ثابت بودن توان

منبع تغذیه فرکانس رادیویی که به ماده هدف مس متصل است سبب کاهش نانو ذرات مس در فیلم‌ها شده است (شکل ۴-۴) و قله‌های پلاسמוنی با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم کاهش پیدا کرده است.

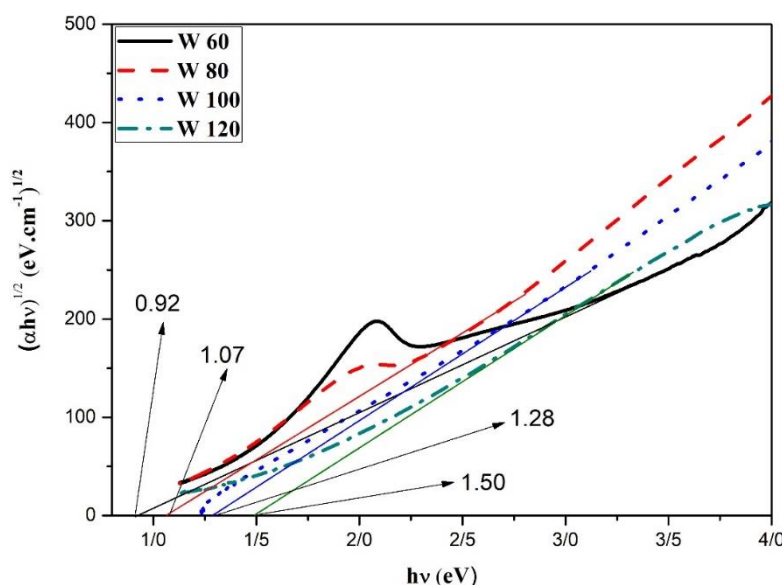
$$E_g \text{ ۲-۲-۲-۲-۴}$$

گاف نواری اپتیکی E_g فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در این تحقیق با استفاده از معادله تاک محاسبه شده‌اند [۲۶].

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = A(h\nu - E_g) \quad ۲-۴$$

در این معادله α ضریب جذب، A یک مقدار ثابت و $h\nu$ انرژی فوتون می‌باشد. با توجه به این که گاف نواری فیلم‌های DLC جز گاف‌های غیرمستقیم می‌باشد پس در سمت چپ معادله یک توان $(1/2)$ خواهد داشت. شکل ۴-۷ الگویی از معادله تاک را برای گاف نواری غیرمستقیم فیلم‌های Cu-DLC نشان می‌دهد. گاف نواری اپتیکی فیلم‌ها با استفاده از روش برون‌یابی از قسمت خطی $(\alpha h\nu)^{1/2}$ و همچنین تابعی از انرژی فوتون محاسبه و اندازه‌گیری شده که در آن $\alpha=0$ می‌باشد. همان طور که در شکل ۴-۷ مشاهده می‌شود. گاف نواری اپتیکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم افزایش می‌یابد [۸]. در حقیقت با توجه به ثابت بودن توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی مقدار نانو ذرات پلاسمونی مس لایه‌نشانی شده به ازای کربن لایه‌نشانی شده وقتی توان منبع تغذیه جریان مستقیم تغییر می‌کند ثابت می‌باشد. با افزایش میزان کربن در فیلم‌ها و به واسطه آن، مقدار نانو ذرات مس که ماده رسانایی می‌باشد کاهش یافته و گاف نواری اپتیکی فیلم‌ها روند افزایشی می‌یابند که همان طور در بالا گفته شده در نمودار جذب اپتیکی فیلم‌ها در شکل ۴-۴ کاهش مقدار نانو ذرات مس نشان داده شده است. با افزایش توان، گاف نواری اپتیکی از مقدار 0.92eV که برای نمونه W60 بوده است به تدریج افزایش یافته است و برای نمونه‌های W80-W100-W120 مقدار گاف نواری اپتیکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده به ترتیب 1.07 ، 1.28 و 1.50eV بدست

آمده است.

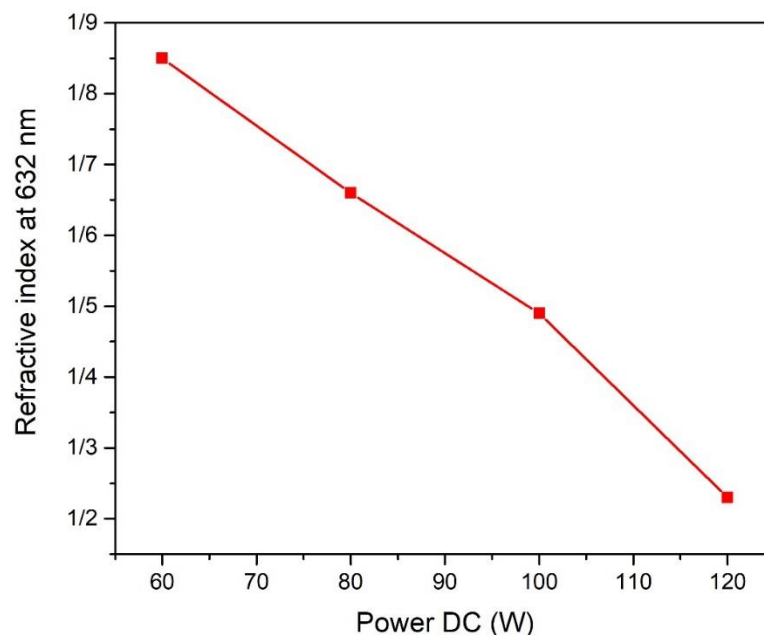


شکل ۴-۷: گاف نواری اپتیکی فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی

۴-۲-۲-۳ بررسی ضریب شکست فیلم‌های لایه‌نشانی شده

ضریب شکست فیلم‌های کربن شبه‌الماسی یکی از پارامترهای مهم برای کاربردهای اپتیکی این نوع از فیلم‌ها می‌باشد [۶۲]. ضریب شکست فیلم‌های لایه‌نشانی شده در این تحقیق بوسیله طیف‌سنجی بیضی-سنجی به دست آمده است. شکل ۴-۸ ضریب شکست فیلم‌های لایه‌نشانی شده بر حسب تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم را در طول موج ۶۳۲nm نشان می‌دهد. ضریب شکست فیلم‌های لایه‌نشانی شده با توجه به افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم روند کاهشی را نشان می‌دهد. در بین پارامترهای اصلی و اساسی که در ضریب شکست فیلم‌های شده موثر می‌باشد، چگالی و ساختار فیلم‌ها بیشترین تاثیر را از

خود نشان می‌دهند [۷۷].



شکل ۴-۸: ضریب شکست فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده بر حسب تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم در طول موج ثابت ۶۳۳ nm

روند کاهشی در ضریب شکست بیان کننده کاهش در چگالی فیلم‌های لایه‌نشانی شده می‌باشد. خواص اپتیکی فیلم‌های کامپوزیتی Cu-DLC بطور مستقیم به ترکیب فاز فیلم بستگی دارد. در حالی که فاز فیلم‌های کربنی با استفاده از نسبت SP^3/SP^2 و مقدار ماده اضافه شده به مخلوط کربن شبه‌الماسی و پارامترهای رسوبی (اندازه، مقدار و ترتیب خوشه‌های SP^2) کنترل می‌شود. همچنین باید به این نکته اشاره کرد که تغییر خواص اپتیکی فیلم‌های کربنی به خواص مکانیکی این نوع از فیلم‌ها وابسته است [۷۸]. وجود پیوندهای SP^3 منجر به ایجاد فیلم‌های DLC متراکم و سخت‌تر می‌شود که ضریب شکست فیلم‌ها را افزایش می‌دهد [۷۷]. در این تحقیق همان‌طور که از آنالیز رامان مشخص شده است I_D/I_G روند افزایشی دارند که سبب کاهش ساختار SP^3 در فیلم‌ها شده و تعداد پیوندهای SP^2 در حال افزایش می‌باشد که منجر به

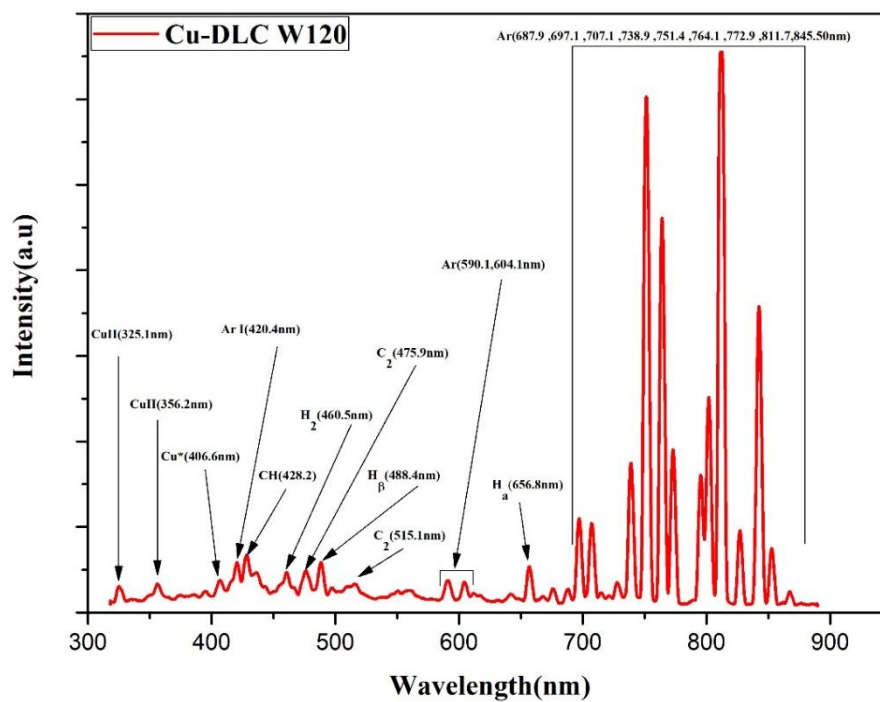
کاهش ضریب شکست فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده است.

۴-۲-۳ آنالیز عناصر فعال در پلاسما

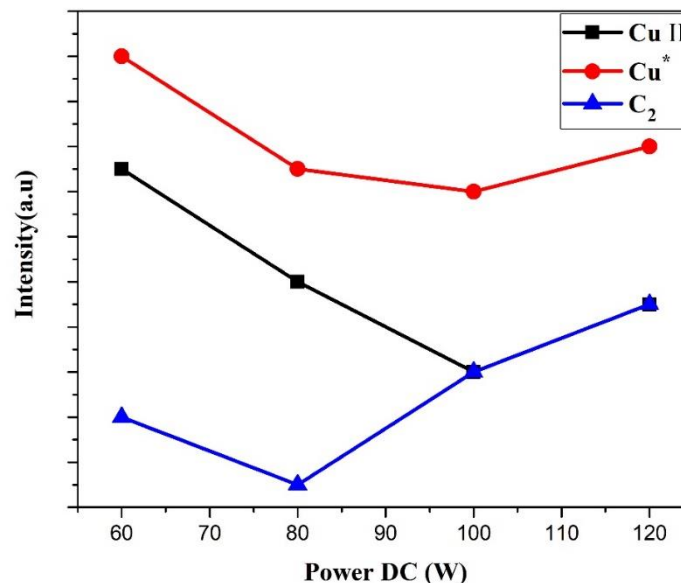
در این تحقیق برای بررسی و آنالیز پلاسما ایجاد شده در فرآیند کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان از روش طیف‌سنجی، طیف گسیل اپتیکی (OES) استفاده شده است که یک روش غیر مخرب و سریع می‌باشد که بررسی اتم‌ها، یون‌ها، گونه‌های برانگیخته و مولکول‌های داخل پلاسما را فراهم می‌کند. با استفاده از این آنالیز به مشخص کردن گونه‌های فعال غالب در پلاسما پرداخته شده است. در شکل ۴-۹ طیف اتمی انتشار یافته از پلاسمای تشکیل شده در توان ۱۲۰ W منبع تغذیه جریان مستقیم و منبع تغذیه فرکانس رادیویی با توان ثابت ۱۰ W همزمان نشان داده شده است. همان طور که مشخص شده گونه‌های فعال مس در طول موج‌های ۳۲۵/۱، ۳۵۶/۱، ۴۰۶/۶ nm مشاهده شده‌اند و گونه‌های هیدروژن در طول موج‌های ۴۶۰/۵، ۴۸۸/۴، ۶۵۶/۸ nm دارای قله‌های مشخصی هستند. گونه‌های فعال کربن قله‌هایی در طول موج‌های ۴۷۵/۹، ۵۱۵/۱ nm را دارا می‌باشند. گونه‌هایی که شامل ترکیب کربن و هیدروژن هستند مانند CH در طول موج ۴۲۸/۲ nm مشاهده شده‌اند. همچنین قله‌های گسترده‌ای از طیف آرگون در نمودار طیف‌سنجی شکل ۴-۹ نشان داده شده است که بیان کننده گونه غالب در محیط پلاسما می‌باشد. نمودار روند تغییرات نمونه‌های اصلی که شامل گونه‌هایی Cu و C می‌باشد در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است.

با توجه به تصویر ۴-۱۰ نمودار تغییرات گونه‌های فعال در آنالیز OES در شرایط کاری متفاوت نشان می‌دهد که با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن منبع تغذیه فرکانس رادیویی شدت قله‌های طیف‌سنجی گسیلی جذبی گونه‌های Cu روند کاهشی و گونه‌های کربنی روند افزایشی دارند، نشان دهنده کاهش غلظت مس در فیلم‌ها می‌باشد که با داده‌های حاصل از بررسی خواص اپتیکی و ساختاری

فیلم‌های لایه‌نشانی شده همخوانی دارد.



شکل ۴-۹: طیف گسیلی جذبی (OES) از پلاسمای ایجاد شده با توان ۱۲۰ W منبع تغذیه جریان مستقیم و ۱۰W منبع تغذیه فرکانس رادیویی



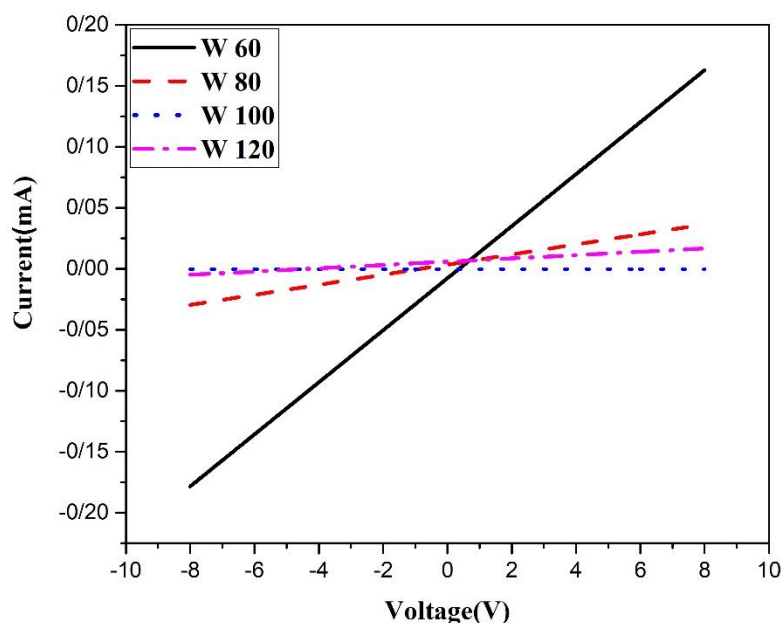
شکل ۴-۱۰: نمودار روند تغییرات گونه‌های اصلی در پلاسمای ایجاد شده با تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن منبع تغذیه فرکانس رادیویی

۴-۲-۴ بررسی خواص الکتریکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده با استفاده از منحنی I-

V

در فیلم‌های DLC مقاومت فیلم‌ها وابسته به نسبت SP^3/SP^2 می‌باشد. اگر مقدار SP^2 افزایش پیدا کند مقدار مقاومت در فیلم‌های DLC کاهش پیدا می‌کند. حال اگر مقداری فلز به فیلم‌های DLC افزوده شود مقاومت نمونه‌ها در حد چند واحد کاهش خواهد یافت [۷۹]. مقاومت نمونه‌ها با استفاده از شیب نمودار I-V به دست آمده است، که با یک ضریب ثابتی $(\pi/Ln2)$ به مقاومت سطحی مرتبط می‌شود [۸۰]. با کاهش مقدار غلظت مس در نمونه‌ها انتظار می‌رود که مقاومت افزایش پیدا کند. مقاومت برای نمونه با بیشترین محتوای نانو ذرات مس در دمای اتاق مقدار $117/65 \times 10^6 \Omega$ می‌باشد و برای نمونه‌های دیگر که غلظت فلز مس در آن‌ها کاهش یافته است مقدار مقاومت بالاتر از واحد گیگا اهم به دست آمده است. مقاومت نمونه‌های لایه‌نشانی شده به دلیل تغییر در غلظت مس، دارای مقادیر متفاوتی می‌باشند. برای بررسی مقاومت در دمای

بالا، نمونه‌ها در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد (۳۹۳ درجه کلوین) قرار داده شده‌اند و سپس منحنی جریان-ولتاژ نمونه‌ها به دست آمده است، که در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۱: نمودار ولتاژ جریان (I-V) برای فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده با تغییر توان

منبع تغذیه جریان مستقیم در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد (۳۹۳ درجه کلوین)

با به دست 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 می‌شوند. مقدار این مقاومت برای نمونه‌های W60 و W80 به ترتیب به میزان $47/05 \times 10^6 \Omega$ و $246/15 \times 10^6 \Omega$ می‌باشد و گرچه برای همه نمونه‌ها، با اعمال دما مقاومت کاهش پیدا می‌کند ولی برای نمونه‌های W100 و W120 مقدار مقاومت همچنان بالا می‌باشد. افزودن مس به فیلم‌های کربن شبه‌الماسی، این نوع از فیلم‌ها را برای کاربردهای فتوولتائیک صنعتی مناسب می‌کند. از دیگر فاکتورها برای افزایش مقاومت این فیلم‌ها کاهش میزان خوشه‌های فلزی مس در فیلم‌ها نیز می‌باشد. [۱۸].

۳-۴ بررسی اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم در توان ثابت منبع

تغذیه فرکانس رادیویی همزمان و اعمال بایاس ثابت به زیر لایه

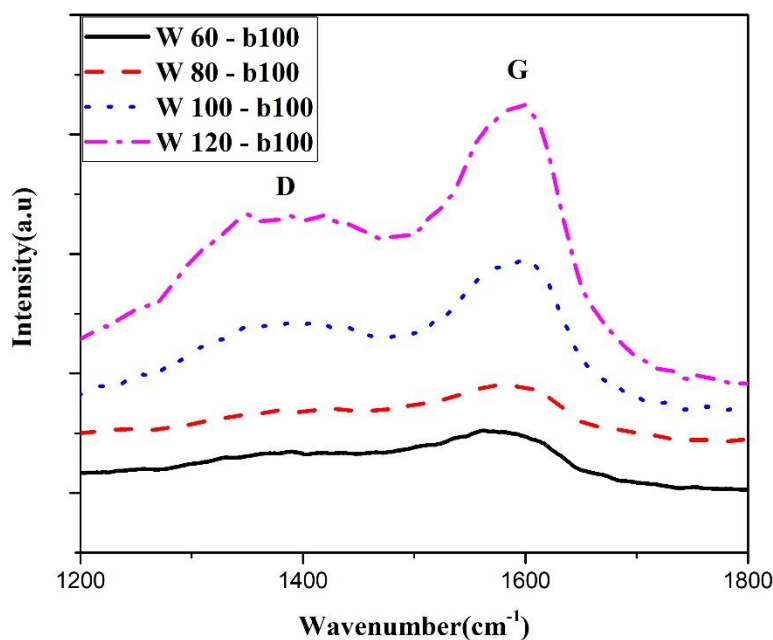
در این بخش به بررسی خواص فیلم‌هایی که در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن منبع تغذیه فرکانس رادیویی و همچنین با اعمال ولتاژ بایاس ثابت به زیرلایه ایجاد شده اند پرداخته می شود. از ولتاژ بایاس برای کنترل انرژی بمباران یونی، اصلاح ساختار، توپوگرافی سطحی و خصوصیات مکانیکی پوشش استفاده می‌شود [۸۱]. برای ایجاد فیلم‌های Cu-DLC توان منبع تغذیه جریان مستقیم ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ W قرار داده شده است در حالی توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی همواره در توان ۱۰ W ثابت می‌باشد. همچنین در این بخش برای ایجاد فیلم‌ها به زیرلایه‌ها ولتاژ بایاس ثابت ۱۰۰V- اعمال شده است. در جدول ۲-۴ پارامترهای مهم به کار رفته برای ایجاد فیلم‌های Cu-DLC در این بخش بیان شده است.

جدول ۲-۴: پارامترهای بکار رفته در فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده با استفاده از تغییر منبع تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن منبع تغذیه فرکانس رادیویی با اثر بایاس ثابت به زیرلایه

نام فیلم	توان DC(Watt)	توان RF(Watt)	ولتاژ بایاس(V)	شار گاز(sccm)	زمان(min)
W60-b100	۶۰	۱۰	-۱۰۰	۳۰	۱۰۵
W80-b100	۸۰	۱۰	-۱۰۰	۳۰	۷۵
W100-b100	۱۰۰	۱۰	-۱۰۰	۳۰	۶۰
W120-b100	۱۲۰	۱۰	-۱۰۰	۳۰	۴۰

۱-۳-۴ آنالیز نمونه‌های لایه‌نشانی شده بوسیله طیف‌سنجی رامان

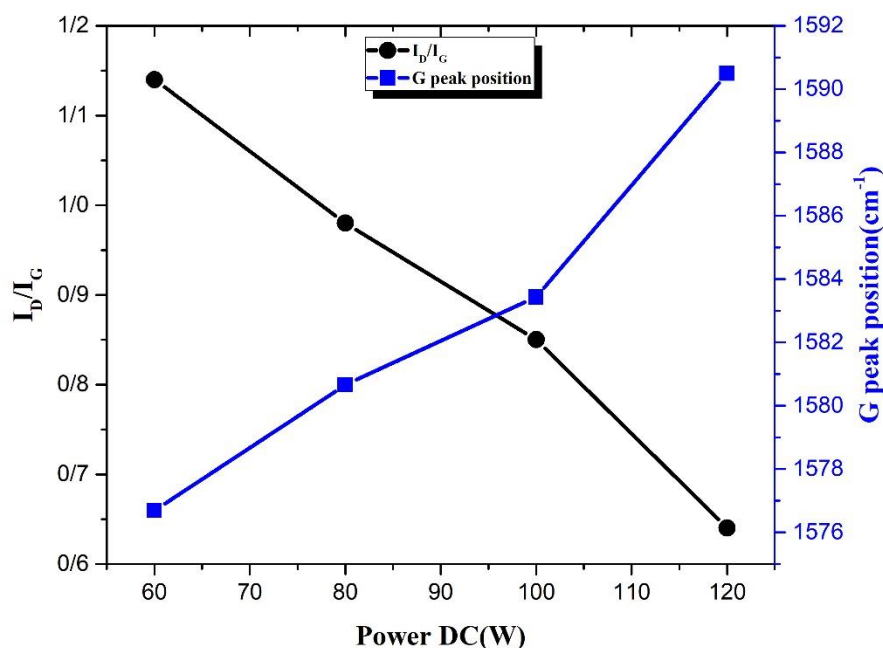
برای بررسی و آنالیز ویژگی ساختاری فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در این بخش از طیف‌سنجی رامان استفاده شده است. نمودار طیف رامان نمونه‌ها که در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم در حضور ولتاژ بایاس ایجاد شده است در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲: طیف رامان فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده با تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم و ثابت نگه داشتن منبع تغذیه فرکانس رادیویی با اثر ولتاژ بایاس ثابت زیرلایه

طیف رامان نمونه‌ها در بازه طول موجی $1200 - 1800 \text{ cm}^{-1}$ اندازه‌گیری شده است. با برآزش کردن طیف رامان فیلم‌های لایه‌نشانی شده در تابع گوسی و مشخص شدن نسبت قله‌های D و G و همچنین موقعیت قله G می‌توان به بررسی نحوه ساختار کربنی فیلم‌ها پرداخت. همان طور که از نمودار شکل ۴-۱۲ مشخص شده است بر خلاف بخش قبل برای نمونه W60 ساختار واضح‌تری از کربن شبه‌الماسی را به نمایش گذاشته است که می‌تواند به علت ایجاد بایاس بر روی بستر زیرلایه باشد. ایجاد بایاس بر روی زیرلایه سبب افزایش انرژی جنبشی ذرات رسیده به زیرلایه خواهد شد و بدین ترتیب ذرات با انرژی بیشتر به داخل زیرلایه

و همچنین درون ساختارهای فیلم کربنی نفوذ کرده و تشکیل ساختار محکم شبه‌الماسی را ایجاد خواهند نمود. شکل ۴-۱۳ نسبت شدت قله D به قله G (I_D/I_G) و همچنین موقعیت قله G فیلم‌های Cu-DLC را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۳: نمودار I_D/I_G و موقعیت پیک G فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن منبع تغذیه فرکانس رادیویی با اعمال ولتاژ بایاس به زیرلایه مقدار I_D/I_G با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم که به ماده هدف کربن متصل است از ۱/۱۴ برای توان ۶۰ W تا به مقدار ۰/۶۴ برای توان ۱۲۰ W می‌رسد که روند کاهشی داشته است، در حالی که موقعیت قله G در این فیلم‌ها از 1576.69 cm^{-1} در توان ۶۰ W تا به مقدار 1590.49 cm^{-1} در توان ۱۲۰ W می‌رسد که روند افزایشی را به خود گرفته است. نسبت I_D/I_G بیان کننده محتوای SP^3/SP^2 در فیلم‌های لایه‌نشانی شده می‌باشد [۷۱]. ایجاد روند کاهشی I_D/I_G برای فیلم‌های لایه‌نشانی شده بیان کننده افزایش ساختار SP^3 در فیلم‌ها می‌باشد [۸۲]. این نوع روند برای I_D/I_G و موقعیت قله G نشان دهنده تغییر حالت فیلم‌های ساخته شده از (a-c) یعنی حالت آمورف کربنی ساده به حالت (ta-c) یعنی حالت کربن آمورف چهار وجهی می‌باشد

که میزان غلظت محتوای SP^3 بین صفر تا ۱۰۰٪ در فیلم‌ها می‌تواند متغیر باشد [۷۰]. یعنی فیلم‌های ساخته شده می‌توانند به بیش‌ترین محتوای SP^3 رسیده و به حالت شبه‌الماسی بسیار نزدیک باشد. از آنجایی که خواص مکانیکی فیلم‌های DLC توسط محتوای SP^3 مشخص می‌شوند پس افزایش محتوای SP^3 بیان‌کننده ایجاد فیلم‌های سخت‌تر می‌باشد. همچنین محتوای الکتریکی و اپتیکی فیلم‌ها با استفاده از محتوای SP^2 مشخص می‌شود پس انتظار می‌رود که خواص الکتریکی و اپتیکی مثل مقاومت و گاف نواری فیلم‌ها با افزایش محتوای SP^3 در فیلم‌های Cu-DLC روندی افزایشی داشته باشند. با مقایسه آنالیز رامان نمونه‌های لایه‌نشانی شده در این بخش با بخش قبل تغییر بسزایی در ساختار فیلم‌های ساخته شده در این بخش قابل مشاهده می‌باشد. این تغییر ساختار با توجه به عدم تغییر در توان‌های منبع تغذیه جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان فقط به دلیل ایجاد ولتاژ بایاس در زیرلایه می‌تواند باشد. ولتاژ بایاس، بر روی زیرلایه در واقع یک پتانسیل منفی اعمال می‌کند و سبب دفع الکترون‌های اولیه موجود در محفظه و همچنین الکترون ثانویه پس از کندوپاش در نزدیک زیرلایه به سمت ماده هدف می‌شود که پلاسمایی فعال‌تر را ایجاد خواهد کرد. انرژی ذرات (یون‌ها) که به سمت هدف حرکت می‌کنند بیش‌تر شده و سبب کندوپاش سریع‌تر و پراثرتری از سطح ماده هدف می‌گردد و ذرات جدا شده با انرژی بیشتری به سمت زیرلایه حرکت کرده و بر روی بستر زیرلایه نفوذ می‌کنند. از طرف دیگر هم این ولتاژ بایاس سبب جذب بارهای ناهمنام (یون‌های سنگین (Ar^+)) می‌شود و به علت سنگینی قادر به جذب یون‌های دورتر نمی‌باشند و فقط یون‌های نزدیک را جذب کرده و سبب شتاب یون‌ها به زیرلایه و سبب اعمال نیرو به بستر زیرلایه شده و ذرات که بر روی بستر حضور دارند به راحتی به داخل بستر نفوذ می‌کنند. همچنین سبب نفوذ کربن به داخل ساختارهای کربن آمورف شده و کربن‌های چهار وجهی یا DLC را ایجاد می‌کنند. روند تاثیرگذاری بایاس در این فیلم‌ها در مقایسه با بخش قبل کاملاً مشهود و آشکار می‌باشد بطوری که I_D/I_G از مقدار ۱/۸۹ در بخش قبل به مقدار بسیار پایین ۰/۶۴ برای توان ۱۲۰ W منبع تغذیه جریان مستقیم در این بخش می‌رسد که نشان

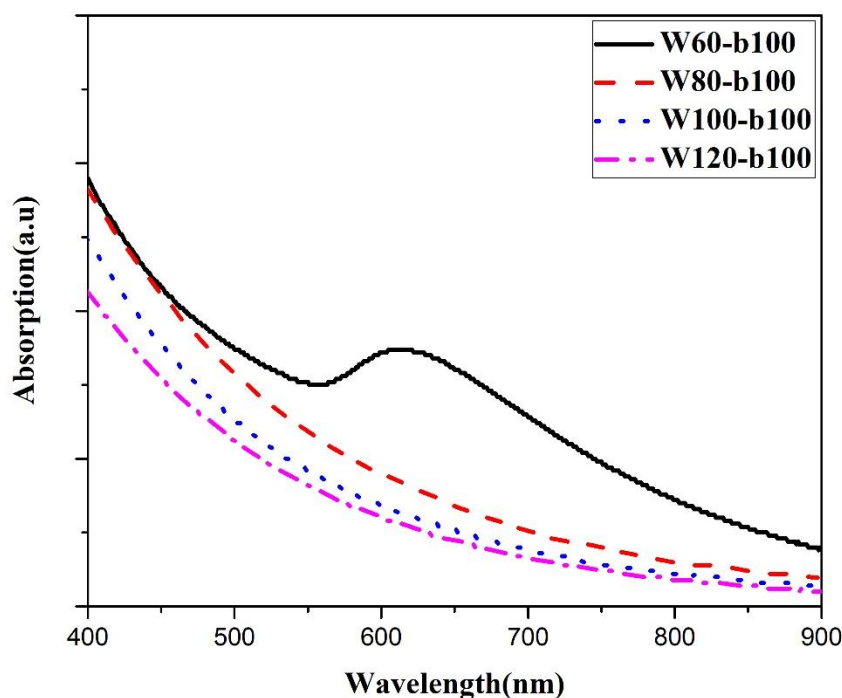
دهنده افزایش آشکار محتوای SP^3/SP^2 در فیلم‌های لایه‌نشانی شده می‌باشد که در اثر اعمال ولتاژ بایاس به زیرلایه ایجاد شده است. علاوه بر این انرژی یون یا در واقع ولتاژ بایاس خود به عنوان یک پارامتر بسیار مهم در خصوصیات ساختاری و مکانیکی فیلم‌های نازک کربن آمورف می‌باشد که در اینجا به وضوح قابل مشاهده می‌باشد [۸۳].

۴-۳-۲ بررسی خواص اپتیکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده

۴-۳-۲-۱ طیف جذب

برای بررسی خواص اپتیکی فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن منبع تغذیه فرکانس رادیویی با اثر بایاس زیرلایه از طیف سنجی مرئی-فرابنفش استفاده شده است که طیف جذب فیلم‌های لایه‌نشانی شده در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است. در بررسی طیف جذب فیلم‌ها، قله پلاسمونی در طول موج ۶۱۲nm برای طیف نمونه W60-b100 نشان داده شده است که به علت حضور محسوس نانو ذرات مس در این نمونه از فیلم می‌باشد. با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم که برای تولید فیلم‌های بعدی به اندازه ۲۰ W افزایش می‌یابد و تا ۱۲۰ W ادامه دارد هیچ قله پلاسمونی مشخص و واضحی مشاهده نشده است. در حالی که در بخش قبل علاوه بر حضور قله پلاسمونی در توان ۶۰ W منبع تغذیه جریان مستقیم قله پلاسمونی نسبتاً قوی برای توان ۸۰ W منبع تغذیه مشاهده شده بود. باتوجه به اعمال ولتاژ بایاس ثابت ۱۰۰V- قله پلاسمونی مشخص برای توان‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ W منبع تغذیه جریان مستقیم مشاهده نشده است. علت عدم حضور این قله در این توان‌ها کاهش بسیار زیاد نانو ذرات مس در فیلم‌های لایه‌نشانی شده با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم می‌باشد. زیرا با توجه به ثابت بودن منبع تغذیه فرکانس رادیویی در همه نمونه‌ها تولید شده مقدار و انرژی نانو ذرات مس لایه‌نشانی شده بر روی بستر فیلم‌ها همواره ثابت بوده است در حالی که با افزایش توان منبع

تغذیه جریان مستقیم مقدار و همچنین انرژی ذرات کربن کندوپاش شده و رسوب شده بر روی فیلم‌ها افزایش یافته و سبب کاهش نانو ذرات مس در فیلم‌ها، شده است. می‌توان نتیجه گرفت حضور ولتاژ بایاس زیرلایه سبب افزایش محتوای ماتریس کربن نسبت به نانو ذرات مس در فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده می‌شود.



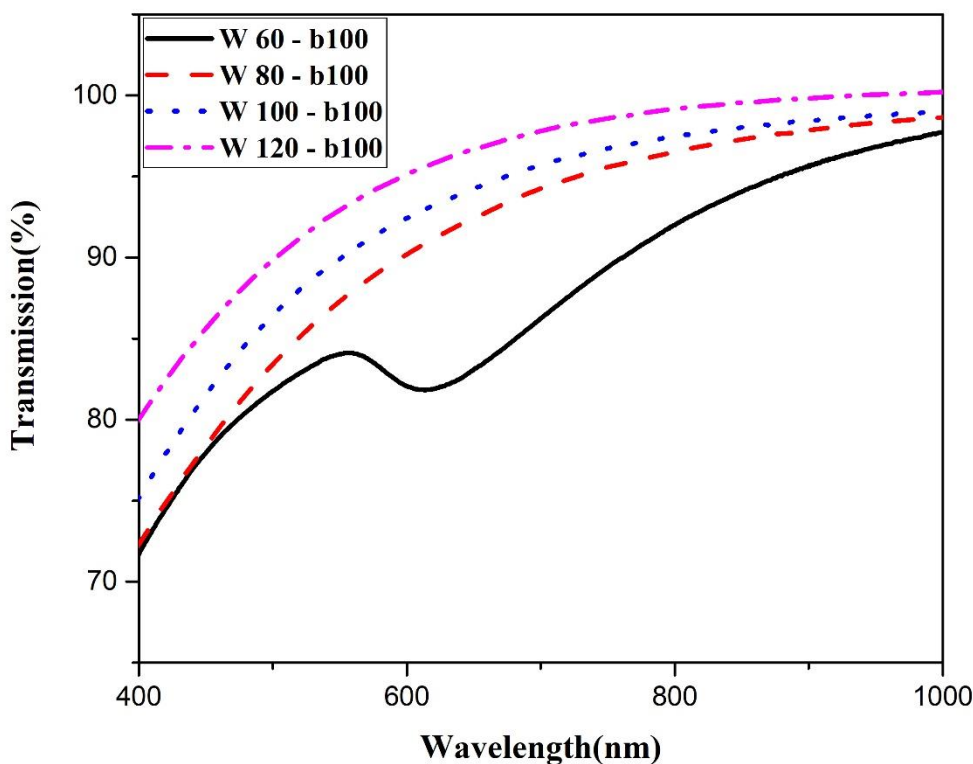
شکل ۴-۱۴: نمودار طیف جذب فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم و فرکانس رادیویی ثابت و همزمان با ولتاژ بایاس زیرلایه ثابت

۲-۲-۳-۴ گاف نواری

E₀₄ ۱-۲-۲-۳-۴

برای محاسبه گاف نواری E₀₄ در ابتدا لازم است که ضریب جذب فیلم‌های لایه‌نشانی شده محاسبه گردد. ضریب جذب فیلم‌های لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن منبع تغذیه رادیو فرکانس با اثر بایاس ثابت ۱۰۰V- با استفاده از معادله ۴-۱ و پارامترهای طیف عبور و

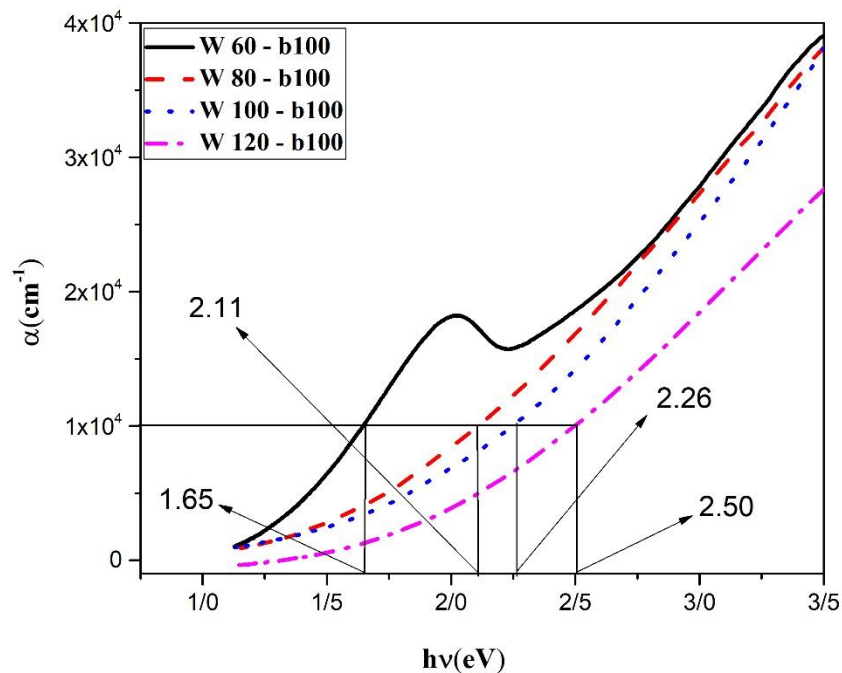
ضخامت فیلم‌ها به دست آمده است که طیف عبور نمونه‌ها در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۵: طیف عبور حاصل از فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم در حضور ولتاژ بایاس ثابت

همان طور که مشاهده می‌شود طیف عبور نمونه‌ها با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم روند افزایشی را نشان می‌دهد. برای محاسبه ضریب جذب فیلم‌های لایه‌نشانی شده از طیف عبور استفاده شده است که ضریب جذب نمونه‌های لایه‌نشانی شده در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. گاف نواری E_{04} مقدار انرژی است که ضریب جذب فیلم‌ها در آن 10^4 cm^{-1} می‌باشد. نمودار ضریب جذب فیلم‌ها نشان می‌دهد که مقدار گاف نواری E_{04} با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم افزایش می‌یابد. گاف نواری E_{04} به ترتیب برای توان‌های ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ W مقادیرهای ۱/۶۵، ۲/۱۱، ۲/۱۸ و ۲/۵۰ را نیز دارد که روند افزایشی را نشان داده است. مقدار و اندازه خوشه‌های SP^2 گرافیتی عامل تعیین کننده‌ای برای مشخص

کردن گاف نواری در فیلم‌های DLC می‌باشد [۷۷]. از آنجایی که محتوای SP^2 با مقدار E_{04} رابطه عکس دارند [۷۶] پس با افزایش مقدار E_{04} در فیلم‌ها با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم مقدار SP^2 کاهش پیدا کرده است و به نسبت آن پیوندهای SP^3 افزایش خواهد یافت که این نتیجه با آنالیز رامان که افزایش نسبت SP^3/SP^2 در فیلم‌ها را نشان می‌دهد همخوانی دارد.

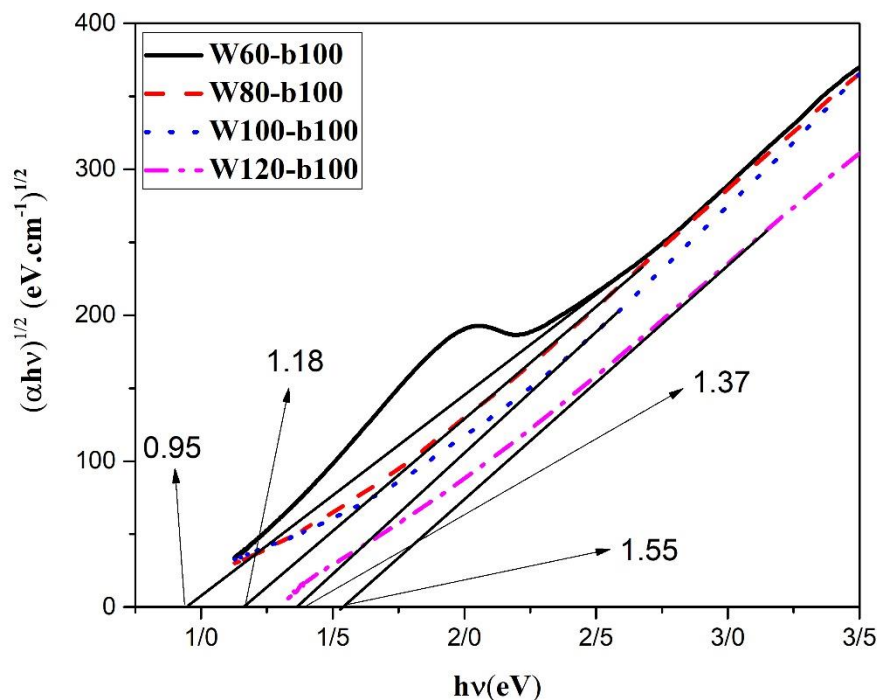


شکل ۴-۱۶: نمودار ضریب جذب فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی با اثر ولتاژ بایاس زیرلایه

E_g ۲-۲-۲-۳-۴

در این بخش از معادله ۲-۴ (معادله تاک) که در آن از ضریب جذب (α) بدست آمده از بخش قبل برای محاسبه گاف نواری E_g فیلم‌ها استفاده شده است. گاف نواری اپتیکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم که با استفاده از روش برون‌یابی از قسمت خطی $(\alpha hv)^{1/2}$ به دست آمده

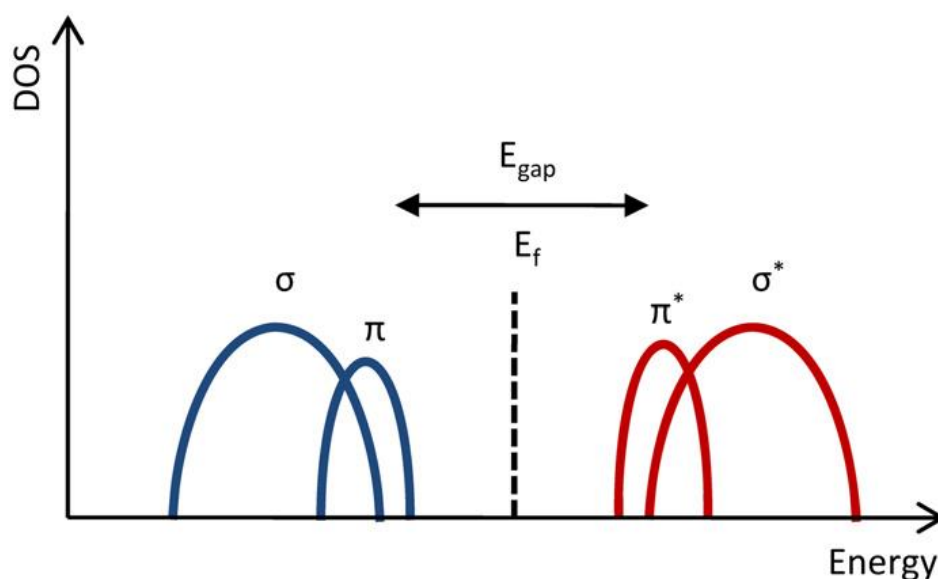
است در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۷: گاف نواری اپتیکی فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی با حضور ولتاژ بایاس ثابت

گاف نواری فیلم‌های لایه‌نشانی شده در اثر افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم از ۶۰ تا ۱۲۰ W روند افزایشی را نشان می‌دهد که مقدار این گاف به ترتیب 0.83 eV ، 1.09 eV ، 1.21 eV و 1.49 eV می‌باشد. همان طور که از آنالیز طیف‌سنجی رامان مشخص شده است. با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم مقدار خوشه‌های SP^3 در فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده روند افزایشی دارد و متعاقباً میزان خوشه‌های SP^2 روند کاهشی را نشان می‌دهد. اندازه و مقدار خوشه‌های SP^2 فاکتور مهم و اساسی برای بررسی گاف نواری اپتیکی در فیلم‌های DLC می‌باشد [۷۷]. SP^3 فقط شامل پیوند σ بوده در حالی که SP^2 هر دو پیوندهای π و σ را در خود جای داده است. این پیوندها رفتار متفاوتی نسبت به هم دارند به طوری که می‌توان آن‌ها را در برخی اوقات جداگانه تلقی کرد. در قله‌بندی فیلم‌های DLC در ساختار SP^3 هر اتم

کربن چهار پیوند σ (کوالانسی) قوی با اتم‌های کربن مجاور می‌سازد. این پیوندها یک شکاف گسترده بین حالت اشغال شده نوار ظرفیت (σ) و حالت خالی نوار رسانش (σ^*) ایجاد می‌کنند. درحالی که ساختار مثلثی شبه گرافیتی SP^2 شامل سه پیوند قوی σ و یک پیوند ضعیف π با شکاف نواری ضعیف بین حالت اشغال شده نوار ظرفیت (π) و حالت خالی نوار رسانش (π^*) ایجاد می‌کند. رابرتسون مدل ساده‌ای از این چگالی حالت‌ها^۱ را در فیلم‌های DLC پیکربندی کرده است. این پیکربندی به صورت تجربی با آزمایش اندازه‌گیری طیف-سنجی الکترون فرابنفش در جای دیگر نیز تأیید شده است که این قله‌بندی حالت‌های π و σ در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۸: تصویر شماتیکی چگالی حالت‌ها (DOS) در فیلم‌های DLC براساس مدل رابرتسون [۸۹].

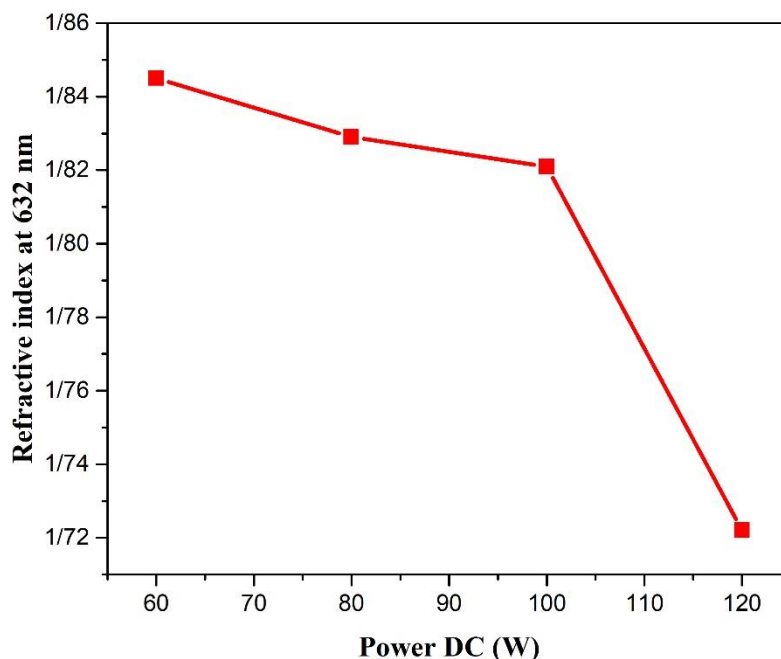
همان طور که در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده شکاف بین حالت $\pi-\pi^*$ خیلی کمتر از شکاف بین حالت $\sigma-\sigma^*$ نیز می‌باشد. از این رو حالت $\pi-\pi^*$ گاف نواری اپتیکی غالب را در فیلم‌های DLC ایجاد می‌کند.

^۱Density of states

این بدان معنا است که الکترون‌های آزاد در پیوندهای π می‌توانند انرژی فوتون را جذب کنند و به سمت سطح انرژی بالاتر حرکت کنند. بدین ترتیب هرچه میزان خوشه‌های SP^2 بیشتر تشکیل شده باشد فوتون-های بیشتری در شکاف باند نواری جذب می‌شوند و انرژی گذار و گاف نواری اپتیکی جفت پیوندهای $\pi-\pi^*$ در فیلم‌های DLC کاهش می‌یابد. بنابراین با کنترل میزان خوشه‌های کربنی SP^2 در فیلم‌های DLC با استفاده از شرایط لایه‌نشانی مانند افزایش توان منبع تغذیه‌ها، اعمال ولتاژ بایاس و ... می‌توان فیلم‌هایی با خواص اپتیکی بهینه شده و کاربردی ایجاد کرد [۶۳، ۸۱، ۸۸]. با توجه به افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم که میزان خوشه‌های SP^2 روند کاهشی داشته است میزان گاف نواری اپتیکی در این بخش با این روند کاهشی نیز همخوانی دارد. در بخش قبل میزان افزایش گاف نواری اپتیکی فیلم‌ها به علت کاهش غلظت نانو ذرات مس در فیلم‌ها بوده است در حالی که در این بخش با اعمال ولتاژ بایاس میزان ساختار SP^3 کربن در فیلم‌ها افزایش یافته است و میزان نانو خوشه‌ها با توجه به نمودار طیف جذب به شدت کاهش پیدا کرده است. در واقع پیوندهای غالب در فیلم‌ها ساختار SP^3 می‌باشد و متعاقباً با افزایش میزان خوشه‌های SP^3 میزان خوشه‌های SP^2 کاهش پیدا خواهد کرد و با کاهش SP^2 گاف نواری فیلم‌های Cu-DLC روند افزایشی خواهد یافت. در واقع افزایش میزان SP^3 تعیین کننده مقدار افزایش گاف نواری بوده است.

۳-۲-۳-۴ بررسی ضریب شکست فیلم‌های لایه‌نشانی شده

همان طور که در بررسی ضریب شکست فیلم‌ها در قسمت قبل گفته شد ضریب شکست یکی از پارامتر-های اصلی برای بررسی خواص و کاربردهای اپتیکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده می‌باشد. ضریب شکست فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده که با تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی در بایاس ثابت در شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۹: نمودار تغییرات ضریب شکست فیلم‌های Cu-DLC در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن توان فرکانس رادیویی در حضور ولتاژ بایاس در طول موج ۶۳۲ nm

همان طور که در شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم ضریب شکست فیلم‌ها روند کاهشی داشته‌اند. یکی از عوامل اساسی در تعیین ضریب شکست فیلم‌ها بررسی چگالی و زیر ساختار در آن‌ها می‌باشد [۷۷]. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزایش چگالی سبب ایجاد یک روند افزایشی در ضریب شکست فیلم‌ها می‌شود. با توجه به بالاتر بودن چگالی الماس (3.513 g/cm^3) نسبت به گرافیت (2.267 g/cm^3) افزایش محتوای SP^3/SP^2 نشان دهنده حالت الماس گونه در فیلم‌های DLC می‌باشد و سبب افزایش چگالی این نوع از فیلم‌ها می‌شود. پس با توجه به نتایج آنالیز رامان با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم نسبت I_D/I_G روند افزایشی را نشان داده است که سبب افزایش خوشه‌های SP^3 در فیلم‌ها شده است. بنابراین این روند افزایشی در SP^3 باید سبب افزایش در چگالی و همچنین ضریب

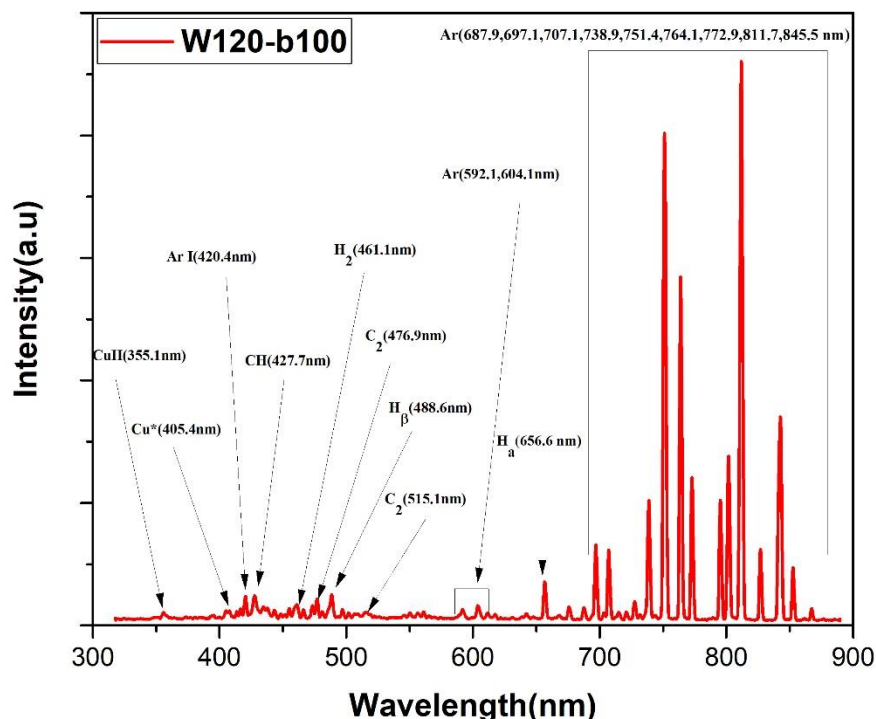
شکست فیلم‌های لایه‌نشانی شوند. در حالی که این با نتایج حاصل از طیف‌سنجی بیضی‌سنجی به دست آمده در شکل ۴-۱۹ متناقض می‌باشد. این تناقض به علت حضور اتم هیدروژن در محیط فعال پلاسمایی که در بخش بعد توضیح داده خواهد شد می‌باشد که به طبع در فیلم‌های لایه‌نشانی شده حضور خواهند داشت. کاهش روند ضریب شکست در فیلم‌ها که با افزایش SP^3/SP^2 همراه است نشان می‌دهد این افزایش SP^3/SP^2 به علت افزایش پیوندهای C-H نسبت به پیوندهای C-C نیز می‌باشد. ایجاد پیوندهای C-H در فیلم‌ها سبب کاهش در چگالی شده که کاهش ضریب شکست را نیز به همراه دارد. علاوه بر این طیف عبور با ضریب شکست رابطه عکس دارد یعنی با افزایش میزان عبور فیلم‌ها ضریب شکست کاهش پیدا خواهد کرد [۸۵] که در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است. یکی دیگر از پارامترهایی که بر روی ضریب شکست موثر است و بطور عکس با آن ارتباط دارد گاف نواری فیلم‌ها می‌باشد که خود به ریز ساختارها در فیلم‌ها مرتبط می‌شود [۸۶] که این ارتباط به وسیله معادله ۴-۳ بیان شده است.

$$n_0^4 E_g = 108 eV \quad 4-3$$

با توجه به افزایش گاف نواری فیلم‌های لایه‌نشانی شده میزان ضریب شکست فیلم‌ها نیز به ترتیب از ۱/۸۴۵ تا به مقدار ۱/۷۷۲ برای توان ۱۲۰ W جریان مستقیم کاهش یافته است. با توجه به اینکه مقدار گاف نواری اپتیکی فیلم‌ها نیز به وسیله نسبت SP^3/SP^2 کنترل می‌شود و با افزایش آن گاف نواری افزایش می‌یابد در حالی که ضریب شکست کاهش خواهد یافت در واقع می‌توانیم نتیجه بگیریم که افزایش ضریب شکست فیلم‌ها تا حدی به افزایش میزان حالت $\pi-\pi^*$ در فیلم‌ها مرتبط می‌باشد. پس بر اساس این رهیافت و همچنین رهیافت بیان شده در مورد چگالی می‌توان نتیجه گرفت که نسبت SP^3/SP^2 در تعیین ضریب شکست فیلم‌های Cu-DLC پارامتر اصلی و اساسی می‌باشد.

۴-۳-۳ آنالیز عناصر فعال در پلاسما

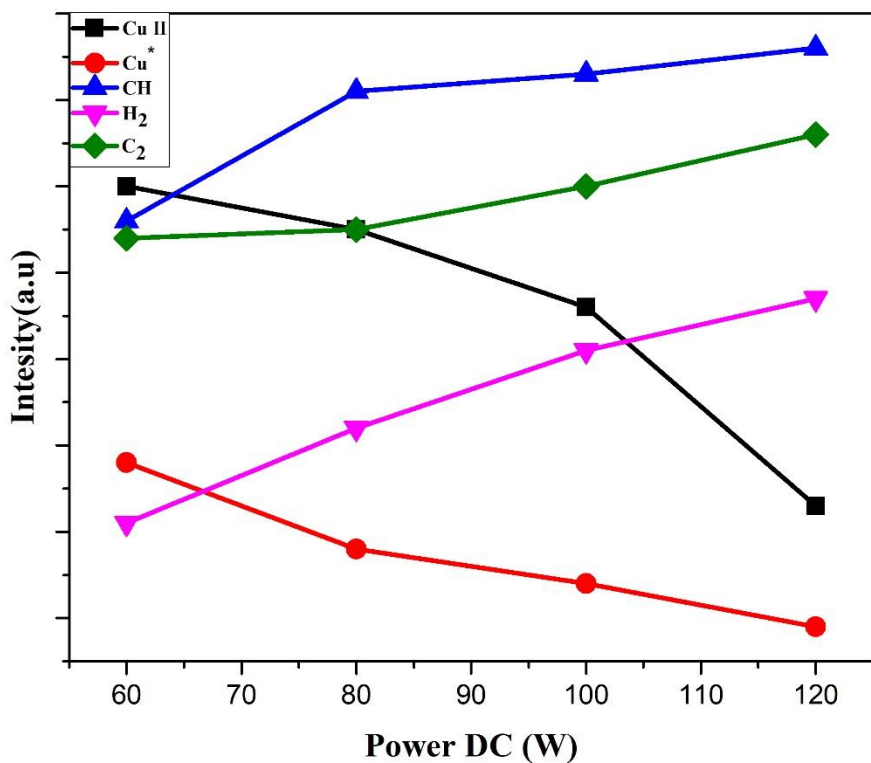
طیف‌سنجی گسیل ایتیکی (OES) پلاسما به عنوان یک ابزار کارآمد برای تشخیص پلاسما و همچنین برای نظارت بر گونه‌های شیمیایی موجود در فرآیندهای پلاسما مورد استفاده برای رسوب فیلم‌های نازک شناخته شده است. رابطه بین شدت نسبی خطوط انتشار تابعی پیچیده از فشار، درجه حرارت، نسبت ترکیب مخلوط گاز و همچنین شرایط کندوپاش، هندسه و واکنش‌پذیری هدف است [۸۷]. از آنجایی که تغییر توان منبع تغذیه و ولتاژ بایاس دو پارامتر موثر در تولید فیلم‌های DLC هستند. پس با بررسی طیفی پلاسمای ایجاد شده با حضور و تغییر این دو پارامتر اطلاعات مهمی در مورد ساختار فیلم‌های Cu-DLC مشخص خواهد شد. طیف سنجی انتشار ایتیکی (OES) حاصل از پلاسما تشکیل شده برای ایجاد فیلم Cu-DLC با توان ۱۲۰ W منبع تغذیه جریان مستقیم و ۱۰ W منبع فرکانس رادیویی در حضور ولتاژ بایاس ۱۰۰ V- در شکل ۴-۲۰ نشان داده شده است. آنالیز طیف‌سنجی ایتیکی از محیط پلاسما در این شرایط رسوبی که گونه‌های فعال شیمیایی حاضر در این فرآیند را نشان می‌دهد شامل (۳۵۵/۹ nm) CuII، (۴۰۵/۴ nm) Cu^{*}، (۴۲۰/۴ nm) ArI، (۴۲۷/۷ nm) CH، (۴۶۱/۱ nm) H₂، (۴۷۶/۹ nm) C₂، (۴۸۸/۶ nm) H_β، (۵۱۵/۱ nm) C₂، (۶۰۴/۱ nm و ۵۹۲/۱ nm) Ar، (۶۵۶/۶ nm) H_α و همچنین قله‌های تیزی که بعد از طول موج ۶۸۴/۳ nm و تا ۸۴۵/۵ nm ادامه دارند مربوط به Ar (آرگون) می‌باشد. روند تغییرات گونه‌های اصلی و تاثیر گذار بر روی فیلم‌های Cu-DLC در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۰: طیف‌سنجی اپتیکی پلاسما ایجاد شده در توان ۱۲۰ W منبع تغذیه جریان مستقیم و ۱۰ W منبع تغذیه فرکانس رادیویی همزمان در حضور ولتاژ بایاس ۱۰۰ V-

همان طور که در نمودار تغییرات نشان داده شده با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم که ماده هدف گرافیت به آن متصل بوده است، سبب افزایش گونه‌های کربنی در محیط پلاسما شده است که این افزایش همچنین سبب نشت بیشتر گونه‌های کربنی به داخل فیلم‌های لایه‌نشانی شده خواهد شد. این موضوع کاملاً با آنالیز رامان که افزایش گونه‌های کربنی را در فیلم نشان می‌دهد همخوانی دارد. همچنین در نمودار روند افزایشی برای نمونه‌های H_2 و CH بیشتر از گونه‌های کربن می‌باشد که در واقع بیان‌کننده افزایش محتوای هیدروژن در فیلم‌ها می‌باشد. افزایش گونه‌های هیدروژن‌دار در محیط پلاسما سبب افزایش پیوندهای $C-H$ در فیلم‌ها نسبت به پیوندهای $C-C$ می‌شود. افزایش پیوندهای هیدروژن با کربن $C-H$ سبب کاهش چگالی فیلم نسبت به پیوند بدون هیدروژن $C-C$ شده که سبب کاهش ضریب شکست فیلم‌ها خواهد شد. اعمال ولتاژ بر روی زیرلایه سبب افزایش انرژی جنبشی ذرات شده و ذرات یونیزه شده با انرژی بیشتر

به سطح ماده هدف برخورد خواهند کرد و اتم‌ها و مولکول‌ها با جذب انرژی بالاتر با سطح انرژی بیشتری به سطح زیرلایه خواهند رسید و سبب نفوذ بیشتر در فیلم‌ها خواهند شد و ساختار DLC بیشتری در فیلم‌ها تشکیل خواهند داد که در حالت بدون بایاس به علت کم بودن سطح انرژی ذرات این نفوذ کمتر بوده است و این مطلب با آنالیز رامان همخوانی دارد. از آنجایی که آلودگی‌های موجود در محفظه سبب وجود گونه‌های هیدروژن در پلاسما و فیلم‌ها می‌باشد پس اعمال ولتاژ بایاس و افزایش انرژی جنبشی ذرات سبب افزایش این گونه‌ها در محیط پلاسما خواهد شد که با افزایش توان روند افزایشی خواهند داشت در حالی که در حالت بدون بایاس روند نزولی داشته‌اند.



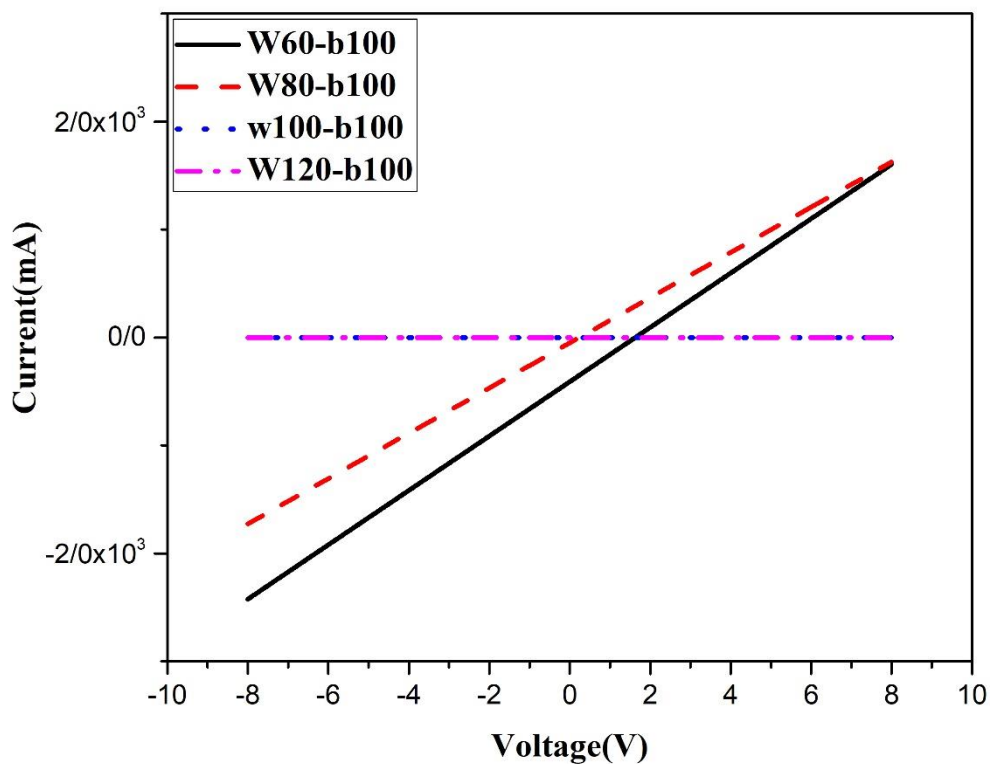
شکل ۴-۲۱: نمودار تغییرات گونه‌های اصلی در پلاسمای ایجاد شده با تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن منبع تغذیه فرکانس رادیویی با حضور ولتاژ بایاس

۴-۳-۴ بررسی خواص الکتریکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده با استفاده از منحنی I-

V

یکی از روش‌های اندازه‌گیری مقاومت سطحی تعیین مشخصه جریان-ولتاژ نمونه‌ها می‌باشد. فیلم‌های DLC مقاومت الکتریکی بالایی که طیف وسیعی از مقادیر بین $10^2 - 10^6 \Omega \text{ cm}$ را شامل می‌شوند دارا می‌باشند و بسته به شرایط رسوبی خاص فیلم تولید شده بین این مقادیر تغییر می‌کنند. مقاومت الکتریکی فیلم‌های کربن شبه‌الماسی با افزودن ناخالصی فلزی به میزان زیادی کاهش پیدا می‌کند. ولی با این حال نیز بازده افزودن ناخالصی برای کاهش مقاومت الکتریکی این نوع از فیلم‌ها بسیار پایین می‌باشد، و هیچ مستندی مبتنی بر اتصالات p-n در فیلم‌ها نیز پیدا نشده است. ولی برخی از محققان ارتباط بین افزودن ناخالصی فلزی و کاهش مقاومت را به گرافیتی شدن فیلم ناشی از این ناخالصی می‌دانند [۸۸]. با بررسی نمودار جریان-ولتاژ در دمای اتاق برای فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم و فرکانس رادیویی در حضور ولتاژ بایاس 100 V - مشخص شد که تنها مقاومت نمونه W60 b100 در مرتبه مگا اهم ($530 \times 10^6 \Omega$) بوده است و با افزایش توان منبع تغذیه جریان مستقیم به علت افزایش محتوای SP^3 در فیلم‌ها که با آنالیز رامان مشخص شده است مقاومت نمونه‌ها نیز افزایش یافته است. انتظار می‌رود که به علت حضور ولتاژ بایاس مقاومت نمونه‌ها نسبت به حالت بدون بایاس به علت کاهش غلظت مس و همچنین کاهش محتوای ترازهای $\text{SP}^2 \pi - \pi^*$ در فیلم‌ها بیشتر شود که این امر با داده‌های به دست آمده از نمودار جریان-ولتاژ همخوانی دارد. در نیم‌رساناها افزایش دما سبب افزایش چگالی حامل‌های بار در آن‌ها خواهد شد و به همین خاطر دما یک عامل موثر در مقاومت نمونه‌ها می‌باشد. در شکل ۴-۲۲ نمودار جریان-ولتاژ نمونه‌های لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن منبع تغذیه فرکانس رادیویی در حضور ولتاژ بایاس در دمای 393°C درجه کلون نشان داده شده

است.



شکل ۴-۲۲: نمودار ولتاژ جریان (I-V) برای فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده با تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم و ثابت بودن منبع فرکانس رادیویی در حضور ولتاژ بایاس در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد (۳۹۳ درجه کلوین)

با اعمال دما به فیلم‌ها مقاومت آن‌ها به طور محسوسی کاهش پیدا کردند به طوری که برای نمونه W60-b100 به مقدار ۴ KΩ رسیده و برای نمونه W80-b100 این مقدار با افزایش بسیار جزئی به مقدار تقریبی ۵ KΩ نیز رسیده است. همچنین مقاومت نمونه‌های W100-b100 و W120-b100 در واحد مگا اهم نیز بوده است. از آنجایی که خواص فیزیکی فیلم‌های آمورف کربنی بسیار به شرایط رسوبی آن‌ها وابسته است این کاهش شدید مقاومت با اعمال دما در حالت بایاس و بدون بایاس می‌تواند به دلیل تغییر ایجاد شده در شرایط رسوبی فیلم‌ها بوده باشد.

۴-۴ بررسی اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه در روش کندوپاش مغناطیسی

جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان

در این بخش فیلم‌های Cu-DLC که در اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه ایجاد شده‌اند مورد بررسی قرار

گرفته است. پارامترهای مهم بکار رفته در فرآیند لایه‌نشانی در جدول ۳-۴ نشان داده شده است.

جدول ۳-۴: پارامترهای بکار رفته در فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه

نام فیلم	ولتاژ بایاس (V)	توان RF (W)	توان DC (W)	شار گاز (sccm)	زمان (min)
W100-b50	-۵۰	۱۰	۱۰۰	۳۰	۶۰
W100-b100	-۱۰۰	۱۰	۱۰۰	۳۰	۶۰
W100-b150	-۱۵۰	۱۰	۱۰۰	۳۰	۶۰
W100-b200	-۲۰۰	۱۰	۱۰۰	۳۰	۶۰

فرآیند لایه‌نشانی فیلم‌های Cu-DLC بطور همزمان و در مدت ۶۰ دقیقه در توان ۱۰۰W منبع تغذیه

جریان مستقیم و ۱۰W منبع تغذیه فرکانس رادیویی و با تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه صورت گرفت. خواص

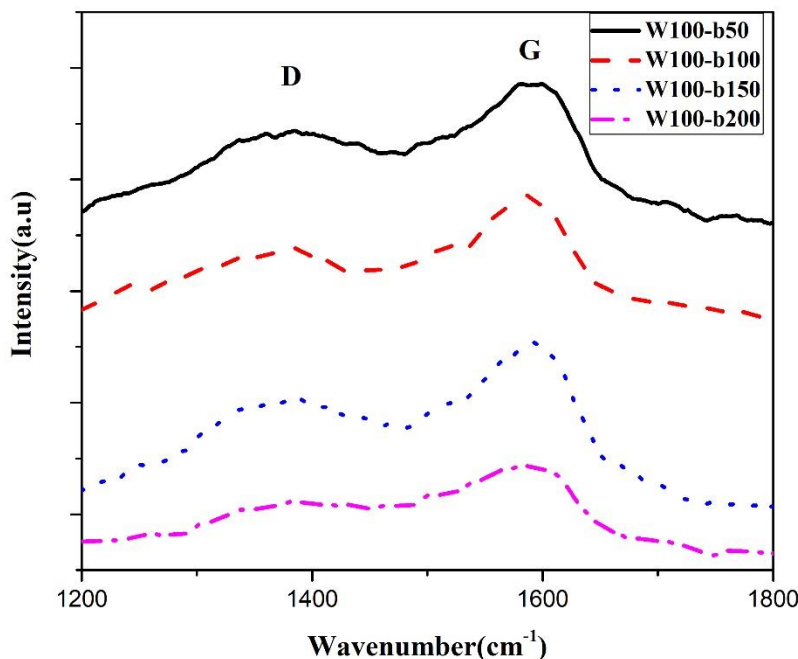
ساختاری، اپتیکی و الکتریکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده در اثر تغییر ولتاژهای بایاس که به ترتیب V -۲۰۰،

، -۱۵۰، -۱۰۰ و -۵۰ بوده است مورد بررسی قرار گرفتند.

۴-۴-۱ آنالیز نمونه‌های لایه‌نشانی شده بوسیله طیف‌سنجی رامان

طیف‌سنجی رامان نمونه‌های Cu-DLC که در اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه ایجاد شده اند در شکل ۴-۴-

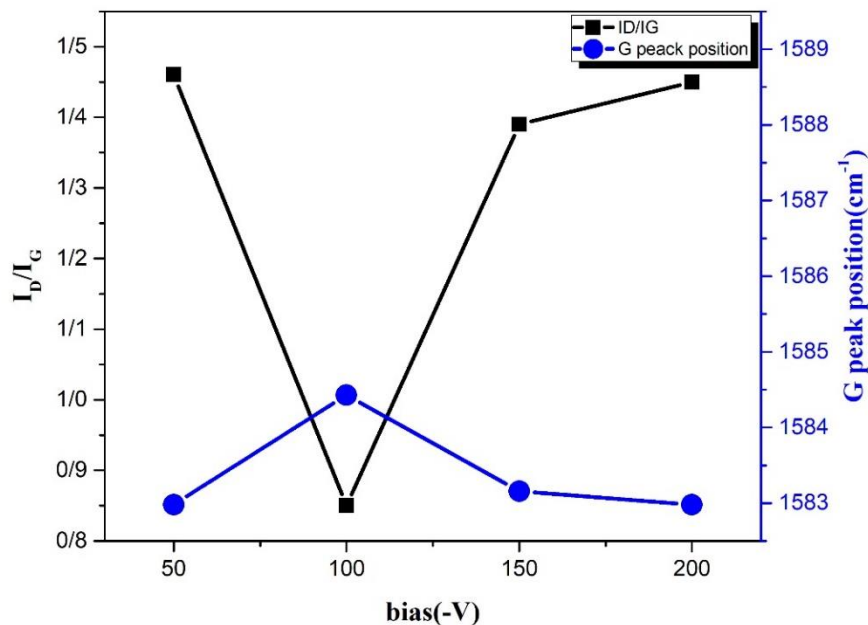
۲۳ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۳: طیف‌سنجی رامان فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه با ثابت بودن توان‌های جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان

طیف رامان نمونه‌های لایه‌نشانی شده که در عدد موج بین $900-1800 \text{ cm}^{-1}$ در شکل ۴-۲۳ نشان داده شده است برای بررسی ساختاری این نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا هر یک از نمودارهای طیفی به دست آمده از نمونه‌ها به وسیله چند برازش گوسی به دو قله سازنده آن‌ها یعنی G قله و D قله تجزیه می‌شوند. با محاسبه سطح زیر قله‌ها نسبت I_D/I_G نمونه‌ها که نشان دهنده نسبت پیوندهای SP^3/SP^2 در ساختار فیلم‌ها می‌باشد مشخص می‌شود. روند تغییرات موقعیت قله G و نسبت I_D/I_G در شکل ۴-۲۴ نشان داده شده است. تغییرات نسبت I_D/I_G و همچنین موقعیت قله G برای فیلم‌های لایه‌نشانی شده با افزایش

ولتاژ بایاس اعمال شده روند ثابت و متقارنی را نشان نمی‌دهد. از بین پارامترهای تاثیر گذار بروی ایجاد فیلم‌های DLC، ولتاژ بایاس تاثیر بسزایی بر انرژی یون و درجه یونیزاسیون و همچنین بر استوکیومتری اتمی و ساختار کریستالی پوشش‌های رسوبی دارد.



شکل ۴-۲۴: موقعیت قله G و همچنین نسبت I_D/I_G در فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه با ثابت بودن توان‌های جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان

تحقیقات نشان داد که ولتاژ بایاس نه تنها بر میزان رسوب، چگالی، مورفولوژی سطح و ناهمواری بلکه بر ریزساختارها نیز تأثیر می‌گذارد. اعمال ولتاژ بایاس در واقع سبب می‌شود تا الکترون‌های بین محیط پلاسمایی و بستر زیرلایه، از سمت زیرلایه دفع شوند و به سمت محیط پلاسمایی حرکت کنند و این حرکت باعث می‌شود تا الکترون‌های بیشتری در میدان مغناطیسی به دام افتاده و سبب افزایش برخورد و یونیزاسیون خواهد شد و محیط پلازما را فعال‌تر خواهند نمود. این افزایش انرژی جنبشی ذرات سبب می‌شود تا هدف بیشتر بمباران شده و کندوپاش افزایش یافته و ذرات و مولکول‌های بیشتر و با انرژی بیشتری بر روی زیرلایه قرار گیرند [۸۹]. با افزایش ولتاژ بایاس از ۵۰V- تا ۱۰۰V- همان طور که گفته

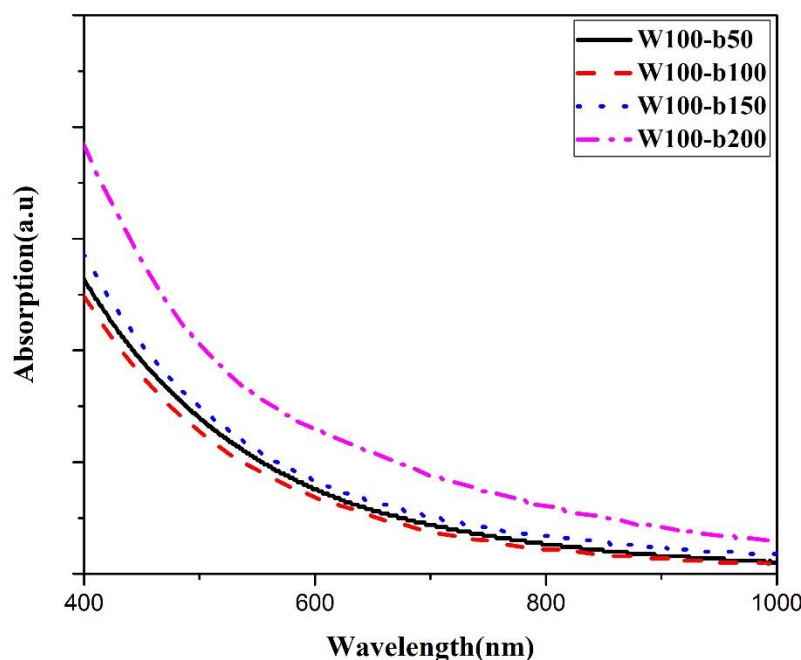
شد سبب افزایش یونیزاسیون شده و منجر می‌شود تا اتم و مولکول‌های رسیده به سطح فیلم، به علت پُر انرژی بودن به داخل ساختار فیلم نفوذ کرده و سبب ایجاد فیلم Cu-DLC با ترکیب ساختاری SP^3 بالاتری شده و سبب کاهش I_D/I_G می‌شود. افزایش بیشتر ولتاژ بایاس از $100V$ تا به $200V$ سبب افزایش بسیار زیاد انرژی جنبشی ذرات شده و ذرات با انرژی بیشتر به سطح زیرلایه می‌رسند و سبب تخریب زیرلایه شده و محتوای فیلم‌ها از ساختار الماس گونه (SP^3) به سمت گرافیت شدن (SP^2) میل خواهد کرد که سبب روند افزایشی برای نسبت I_D/I_G برای ولتاژهای بالاتر از $100V$ خواهد شد. نسبت پیوند SP^3/SP^2 در فیلم‌های لایه‌نشانی شده به شدت تحت تأثیر ولتاژ بایاس اعمال شده به زیرلایه نمی‌باشند. زیرا در فرآیند رسوب فیلم، برخورد یون‌های پُر انرژی با گونه‌های رادیکال سبب افزایش ولتاژ شده و افزایش حرارت در بستر فیلم را به همراه خواهد داشت. این افزایش دما در بستر باعث گرافیت شدن فیلم‌ها می‌شود. استفاده از ولتاژ بایاس پایین بر روی بستر ممکن است اثر گرما را تضعیف کند، که منجر به گرافیتی (SP^2) شدن بسیار کمتر فیلم‌ها در فرآیند رشد می‌شود. سطح تحرک گونه‌های وارد شده به سطح فیلم ممکن است تحت تأثیر دمای بستر، بمباران یون، قدرت چگالی تخلیه، فشار گاز و غیره باشد. با افزایش ولتاژ بایاس زیرلایه، چگالی پلاسما و انرژی یون افزایش می‌یابد و به همین دلیل تحرک در سطح در حال رشد ممکن است افزایش یابد، و سطح رو به رشد را نرم‌تر کند یعنی در واقع نسبت I_D/I_G افزایش پیدا کند. روند رسوب فیلم‌های DLC در واقع تعادل حکاکی و رسوب است که عمدتاً به چگالی پلاسما و انرژی یون بستگی دارد [۸۹].

۲-۴-۴ بررسی خواص اپتیکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده

۱-۲-۴-۴ طیف جذب

طیف جذب فیلم‌های Cu-DLC که در اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه، لایه‌نشانی شده‌اند در شکل ۲۵-۴

نشان داده شده است.



شکل ۲۵-۴: طیف جذب فیلم‌های Cu-DLC در اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه و ثابت بودن

توان‌های جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان

طیف جذب نمونه‌های لایه‌نشانی شده در اثر تغییر بایاس زیرلایه روند نامتقارنی را همانند طیف سنجی

رامان نشان می‌دهد. بدین صورت که طیف جذب نمونه‌ها در ابتدا با افزایش ولتاژ از $-50V$ تا $-100V$

کاهش یافته است. سپس با افزایش ولتاژ از $-100V$ تا $-200V$ روندی عکس با نمونه‌های قبلی داشته و

طیف جذب نمونه‌ها افزایش یافته است. این روند تغییرات طیف جذب با طیف‌سنجی رامان نمونه‌ها همخوانی

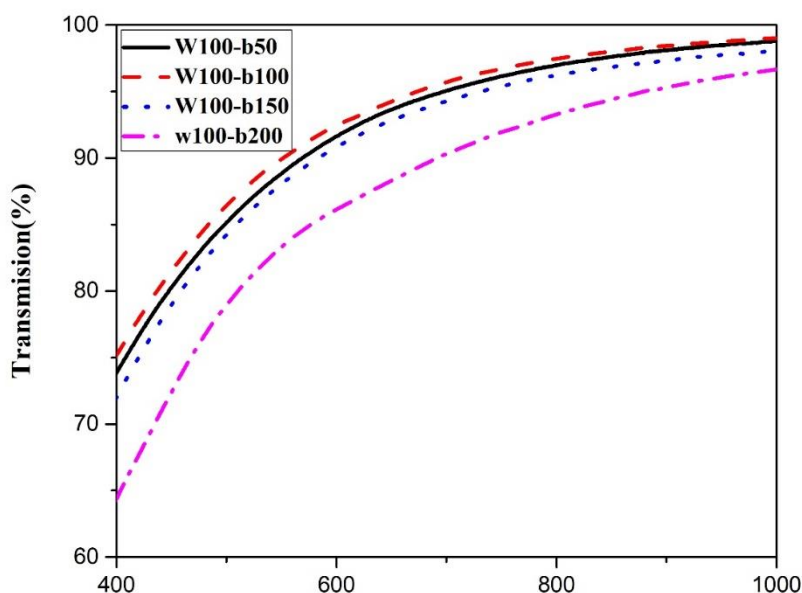
دارد. همچنین یک قله بسیار پهن و ضعیفی برای نمونه W100-b200 در طول موج $600-700\text{ nm}$ مشاهده

شده که نشان از حضور قله پلاسمونی نانو ذرات مس می‌باشد. در واقع در این نمونه محتوای نانو ذرات مس افزایش یافته است. حضور این قله برای این نمونه بیان کننده این مطلب می‌باشد که با افزایش ولتاژ بایاس انرژی ذرات و گونه‌های فعال محیط پلاسما افزایش چشمگیری می‌یابند و با توجه به بیشتر بودن توان گرافیت ذرات کنده شده از سطح آن با انرژی بیشتری به سطح فیلم رسیده و نفوذ خواهند کرد و از آنجایی که توان متصل به ماده هدف مس کمتر بوده کندوپاش از آن نیز کمتر و انرژی پایین‌تری خواهد داشت و به همین دلیل ذرات مس تنها بر روی سطح فیلم خواهد ماند. در واقع حضور گونه‌های پر انرژی کربن مانع از نفوذ ذرات مس به داخل فیلم خواهند شد و سبب حضور این قله بسیار پهن در این طیف طول موجی شده است.

۲-۲-۴-۴ گاف نواری

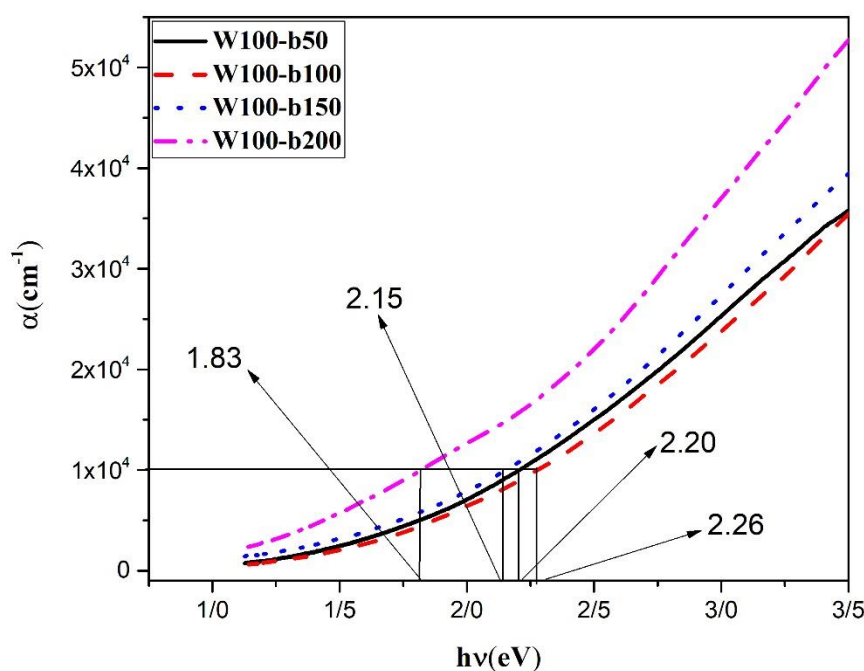
E₀₄ ۱-۲-۲-۴-۴

برای محاسبه گاف E₀₄ ابتدا طیف عبور نمونه‌ها که در شکل ۲۶-۴ نشان داده شده است مشخص گردید.



شکل ۲۶-۴: طیف عبور فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر بایاس زیرلایه و ثابت بودن توان‌های جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان

طیف عبور نمونه‌های لایه‌نشانی شده همانند طیف جذب روندی نامتقارن دارد که ابتدا روند افزایشی و کاهشی را با افزایش ولتاژ بایاس نشان می‌دهد. حال با محاسبه ضریب جذب نمونه‌ها با استفاده از معادله ۲-۴ به بررسی گاف E_{04} خواهیم پرداخت. از آنجایی که E_{04} مقدار انرژی است که ضریب جذب فیلم‌ها در آن 10^4 cm^{-1} می‌باشد مقدار این گاف به دست خواهد آمد. ضریب جذب نمونه‌های لایه‌نشانی شده در شکل ۲۷-۴ نشان داده شده است.



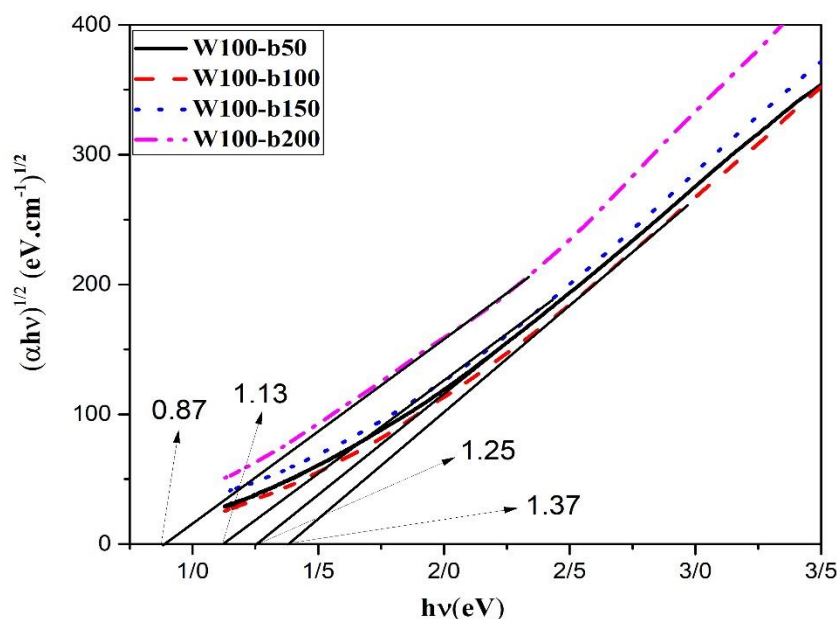
شکل ۲۷-۴: ضریب جذب فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان بایاس زیرلایه و ثابت بودن توان‌های جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان

ضریب جذب نمونه‌ها با افزایش ولتاژ بایاس از 50 V تا 100 V - افزایش یافته است که این سبب افزایش گاف اپتیکی E_{04} شده است. با افزایش ولتاژ از 100 V تا به 200 V - گاف اپتیکی E_{04} روندی کاهشی یافته است. از آنجایی که محتوای SP^2 و مقدار گاف نواری E_{04} رابطه عکسی دارند پس انتظار می‌رود که با این افزایش ولتاژ بایاس محتوای SP^2 در نمونه‌ها به صورت نامتقارن و بطور عکس با E_{04} تغییر نماید. پس با توجه به روند افزایشی E_{04} برای تغییر ولتاژ از 50 V تا به 100 V - پس انتظار می‌رود که محتوای SP^2

کاهش پیدا کند که این نیز با طیف‌سنجی رامان نمونه‌ها در این تغییرات ولتاژ بایاس همخوانی دارد یعنی نسبت I_D/I_G روند کاهشی داشته که نشان از افزایش محتوای SP^3 نسبت به SP^2 در این تغییرات دارد. با افزایش ولتاژ برای بیشتر از $100V$ - مقدار گاف نواری E_{04} روند کاهشی داشته که نشان از افزایش محتوای SP^2 در فیلم‌ها دارد و با آنالیز رامان برای این نمونه‌ها همخوانی دارد.

Eg ۲-۲-۲-۴-۴

برای محاسبه گاف نواری همانند قسمت قبل از ضریب جذب و معادله تاک استفاده شده است. گاف نواری اپتیکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده در اثر تغییر ولتاژ بایاس که با استفاده از روش برون‌یابی از قسمت خطی $(\alpha h\nu)^{1/2}$ به دست آمده است در شکل ۲۸-۴ نشان داده شده است.



شکل ۲۸-۴: گاف نواری فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه و توان‌های

ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان

گاف نواری فیلم‌های لایه‌نشانی شده با افزایش ولتاژ از $50V$ - تا $100V$ - به ترتیب از مقدار $1/25eV$ تا

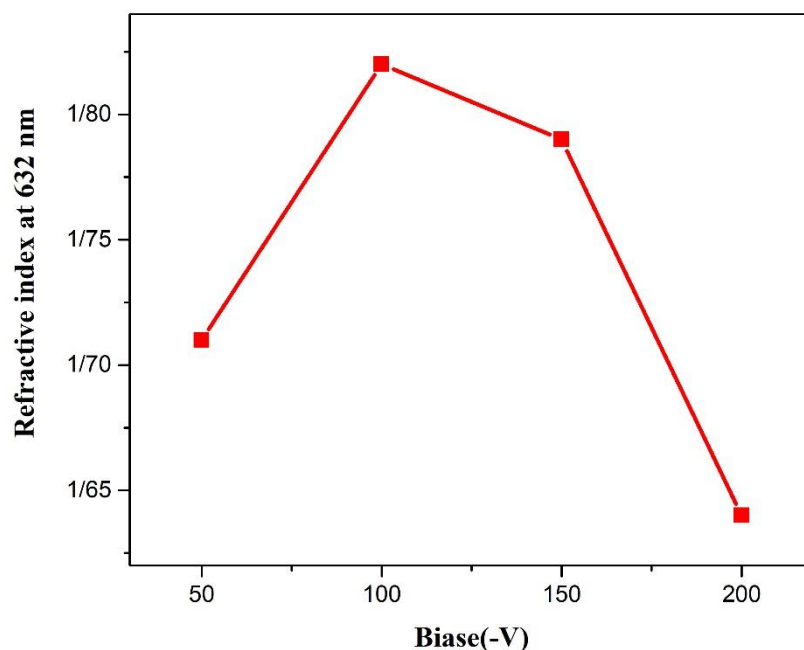
$1/37eV$ افزایش یافته است. در حالی که این روند با افزایش ولتاژ بالاتر از $100V$ - معکوس شده است یعنی

گاف نواری نمونه‌ها به ترتیب با افزایش ولتاژ بایاس به مقدار $1/13eV$ و $0/87eV$ کاهش یافته است. این

روند تغییرات گاف نواری نمونه‌ها نشان می‌دهد که در ابتدا با افزایش ولتاژ بایاس از $-50V$ تا $-100V$ محتوای SP^2 نمونه‌ها که مرتبط با خواص الکتریکی فیلم‌ها بوده و همچنین گاف نواری کوتاه‌تر $\pi-\pi^*$ را ایجاد می‌کنند، کاهش یافته است. این نیز به خاطر اعمال ولتاژ بایاس زیرلایه بوده که سبب ایجاد فیلم‌های مستحکم DLC شده که ساختار SP^3 در آن افزایش یافته است. اما برای نمونه‌هایی که با ولتاژ بالاتر از $-100V$ لایه‌نشانی شده‌اند ساختار SP^2 و یا همان باند $\pi-\pi^*$ در اثر افزایش ولتاژ بایاس زیرلایه نیز افزایش یافته است و سبب کاهش گاف نواری فیلم‌ها شده است.

۳-۴-۴ بررسی ضریب شکست فیلم‌های لایه‌نشانی شده

روند تغییرات ضریب شکست فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده، با تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه که با استفاده از روش طیف‌سنجی بیضی‌سنجی محاسبه شده است در شکل ۴-۲۹ نشان داده شده است.



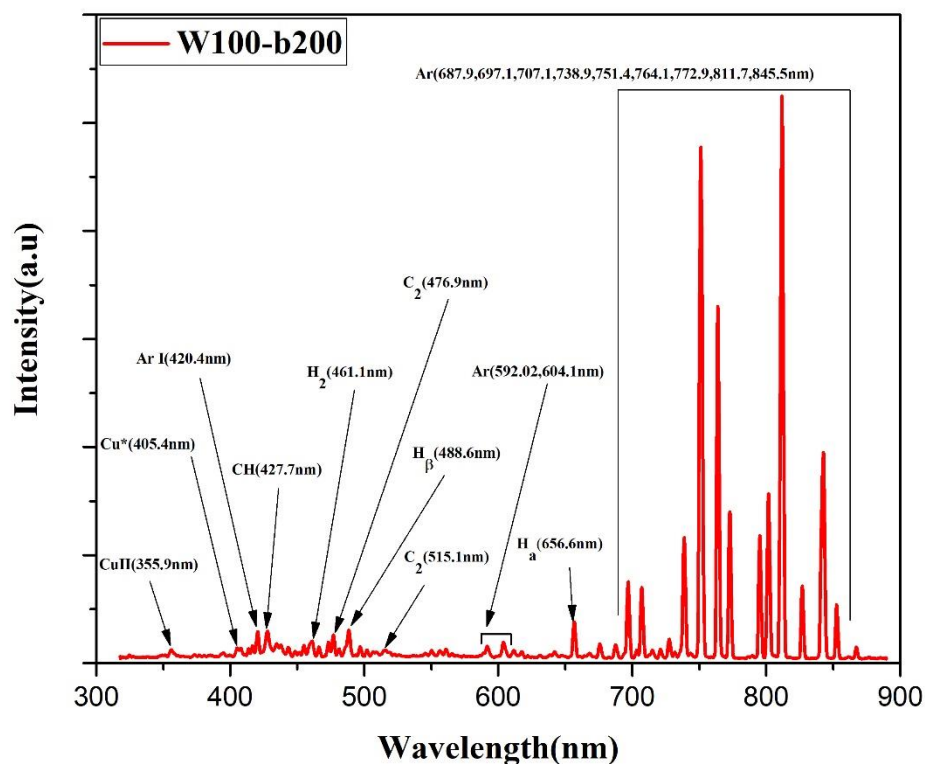
شکل ۴-۲۹: ضریب شکست فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده با تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه و ثابت بودن توان‌های جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان

همان طور که در شکل ۴-۲۹ مشخص شده است روند تغییرات ضریب شکست فیلم‌های لایه‌نشانی شده با تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه همسو نمی‌باشد. در ولتاژ $50V$ - تا به $100V$ - مقدار ضریب شکست فیلم‌ها از $1/71$ به مقدار $1/84$ افزایش یافته است. از آنجایی که ضریب شکست فیلم‌ها به چگالی مرتبط می‌باشد و با افزایش چگالی ضریب شکست افزایش پیدا خواهد کرد. با افزایش ولتاژ بایاس تا به $100V$ - محتوای SP^3/SP^2 در فیلم‌ها افزایش یافته است که سبب افزایش چگالی و سختی فیلم‌ها شده است که این افزایش سبب افزایش در ضریب شکست شده است. با افزایش بیشتر ولتاژ زیرلایه از $100V$ - تا به $200V$ - ضریب شکست روند عکسی نسبت به قبل پیدا کرده است. این تغییر روند به دلیل افزایش ولتاژ بایاس زیرلایه بوده، که سبب افزایش انرژی ذرات و گرم شدن فیلم شده است. این افزایش ولتاژ به نحوی بوده که سبب شده فیلم‌ها به سمت گرافیتی شدن (SP^2) میل کنند و نسبت SP^3/SP^2 در فیلم‌ها کاهش یابد و به همین دلیل چگالی فیلم نیز کاهش یافته است و این کاهش چگالی روند ضریب شکست فیلم‌ها را هم کاهش خواهد کرد.

۴-۴-۴ آنالیز عناصر فعال در پلاسما

برای بررسی پلاسمای ایجاد شده از لحاظ گونه‌های فعال موجود در آن از آنالیز OES استفاده شده است که آنالیزی غیرمخرب می‌باشد. آنالیز OES از فیلم‌های Cu-DLC که در اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه، لایه‌نشانی شده‌اند، انجام شده است. شکل ۴-۳۰ آنالیز OES از فیلم Cu-DLC ایجاد شده در ولتاژ بایاس $200V$ - زیرلایه را نشان می‌دهد. گونه‌های فعال شناسایی شده توسط آنالیز OES در محیط پلاسما شامل $CH(427/7nm)$ ، $ArI(420/4nm)$ ، $Cu^*(405/4nm)$ ، $CuII(355/9nm)$ ، $CuII(328/8nm)$ ، $H_2(461/1nm)$ ، $C_2(476/9nm)$ ، $H_\beta(488/6nm)$ ، $C_2(515/1nm)$ ، $Ar(592/1 و 604/1nm)$ ، $CH(456/6nm)$ ، H_α همچنین قله‌های تیزی که بعد از طول موج $684/9nm$ تا $845/5nm$ ادامه دارند مربوط به Ar (آرگون)

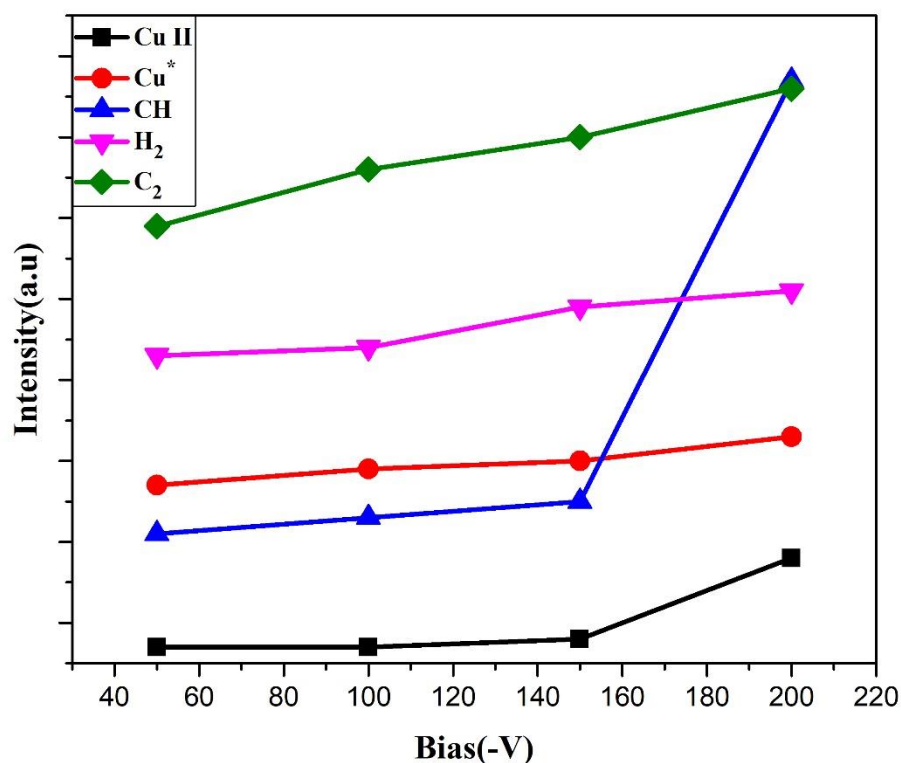
می باشند.



شکل ۴-۳: طیف سنجی انتشار اپتیکی برای فیلم های Cu-DLC لایه نشانی شده با ولتاژ بایاس ثابت ۲۰۰ V- و توان های ثابت جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان

تغییرات این گونه ها که با افزایش ولتاژ بایاس زیر لایه تغییر می کنند در شکل ۴-۳۱ نشان داده شده است. افزایش ولتاژ بایاس زیر لایه سبب افزایش انرژی جنبشی گونه ها شده و انرژی بمباران یونی افزایش خواهد یافت. از این رو نرخ یونیزاسیون را به شدت افزایش می دهد. افزایش نرخ یونیزاسیون سبب افزایش شدت انتشار گونه ها شده است که این روند افزایشی در شدت انتشار با تغییر ولتاژ بایاس از ۵۰ V- تا ۲۰۰ V- که در شکل ۴-۳۱ نشان داده شده است کاملاً مشهود می باشد. این افزایش در شدت انتشار اتمی گونه ها به دلیل افزایش مقدار الکترون هایی می باشد که به خاطر اعمال ولتاژ بایاس از طرف زیر لایه به سمت محیط فعال پلاسمایی سوق داده شد و این افزایش الکترون ها سبب افزایش برخوردها و افزایش انرژی جنبشی

گونه‌ها شده است.



شکل ۴-۳۱: تغییرات گونه‌های فعال موجود در محیط پلاسما در اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه و ثابت بودن توان‌ها منبع تغذیه جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان

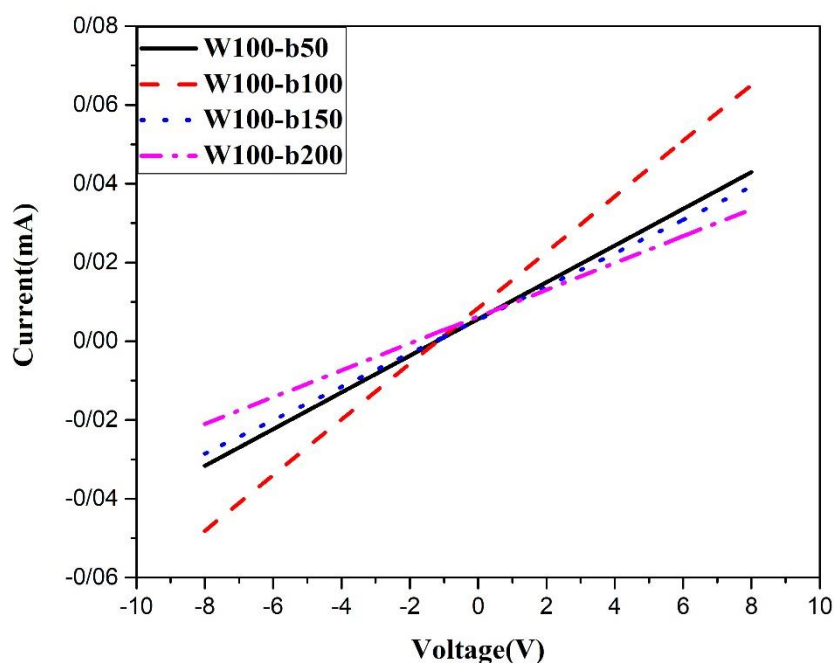
با افزایش انرژی رسوب که در اینجا ولتاژ بایاس سبب افزایش انرژی رسوب شده است، هیدروژن کمتری در ساختار a-C:H پیوند می‌خورد که به دلیل دفع هیدروژن و هیدروکربن از ساختار فیلم‌ها می‌باشد [۹۰]. در واقع با افزایش ولتاژ بایاس انرژی ذرات افزایش یافته و با انرژی بالاتری به سطح زیرلایه خواهند رسید و این افزایش انرژی سبب افزایش دمای زیرلایه خواهد شد. با افزایش دما در زیرلایه پیوندهای هیدروژنی در فیلم کاهش خواهد یافت. در واقع دما سبب کاهش ساختار C-H در فیلم‌ها خواهد شد هرچند که گونه‌های اتمی هیدروژن در محیط فعال پلاسما حضور دارند ولی در تشکیل فیلم دخالت ندارند و فیلم‌های بدون هیدروژن را تشکیل خواهند داد. به همین دلیل با افزایش ولتاژ بایاس از ۵۰V تا ۱۰۰V - گرچه مقدار

هیدروژن و هیدروکربن در محیط پلاسما افزایش یافته است ولی در ساختار فیلم‌ها نفوذ نکرده که سبب افزایش چگالی و همچنین ضریب شکست فیلم‌ها شده است که با آنالیز ضریب شکست کاملاً همخوانی دارد.

۴-۵ بررسی خواص الکتریکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده با استفاده از منحنی I-

V

برای بررسی خواص الکتریکی نمونه‌ها از منحنی جریان-ولتاژ استفاده شده است که می‌توان رسانندگی (مقاومت) نمونه‌ها را مشخص نمود. نمودار جریان-ولتاژ فیلم‌های Cu-DLC در اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه در توان‌های ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان در دمای ۳۹۳ درجه کلوین در شکل ۴-۳۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۲: نمودار جریان-ولتاژ فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه و توان‌های ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم و فرکانس رادیویی همزمان در دمای ۳۹۳ K

مقاومت فیلم‌های Cu-DLC که در اثر تغییر ولتاژ بایاس لایه‌نشانی شده است با استفاده از محاسبه شیب منحنی جریان ولتاژ به دست آمده است. مقاومت نمونه‌ها در دمای اتاق در مرتبه $G.\Omega$ بوده که واحد بسیار بالایی برای فیلم‌ها لایه‌نشانی شده می‌باشد. پس از اعمال دما به فیلم‌ها تا حدود $393^\circ C$ درجه کلون مقاومت نمونه‌ها تقریباً به یک اندازه کاهش یافته و در مرتبه $M.\Omega$ قرار گرفته است. مقاومت نمونه‌ها پس از اعمال دما به آن نسبت به هم تغییرات محسوسی نداشته و در محدوده بسیار نزدیک به هم و بین $160 M\Omega - 260 M\Omega$ قرار گرفته است. از آنجایی که خصوصیات فیلم‌های کربن آمورف وابسته به روش‌های تهیه آن‌ها می‌باشد پس می‌توان نتیجه گرفت که اعمال ولتاژ بایاس به زیرلایه تغییر محسوسی بر روی مقاومت نمونه‌ها ایجاد نخواهد کرد.

۴-۵ بررسی اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی در توان ثابت منبع

تغذیه جریان مستقیم همزمان با اعمال ولتاژ بایاس ثابت به زیرلایه

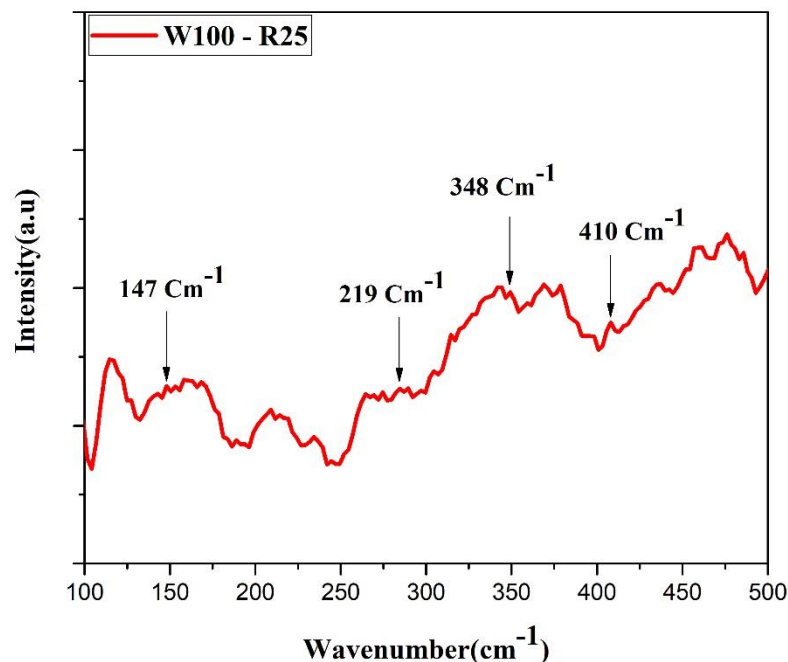
در این بخش از تحقیق به بررسی اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی که به ماده هدف مس متصل است، پرداخته خواهد شود. در جدول ۴-۴ پارامترهای مهم و اساسی برای ایجاد فیلم‌های Cu-DLC گزارش شده است. برای ایجاد فیلم‌های Cu-DLC توان جریان مستقیم و ولتاژ بایاس زیرلایه همواره به طور ثابت به ترتیب مقادیر $100W$ و $100V$ خواهد بود در حالی که منبع تغذیه فرکانس رادیویی نیز به ترتیب در توان‌های $25W$ ، $20W$ ، $15W$ و $10W$ تغییر داده خواهد شد. حال خواص ساختاری، الکتریکی و اپتیکی فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جدول ۴-۴: پارامترهای استفاده شده برای ایجاد فیلم‌های Cu-DLC در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم

نام فیلم	توان RF (W)	توان DC (W)	ولتاژ بایاس (V)	شار گاز (sccm)	زمان (min)
W100-R10	۱۰	۱۰۰	-۱۰۰	۳۰	۶۰
W100-R15	۱۵	۱۰۰	-۱۰۰	۳۰	۶۰
W100-R20	۲۰	۱۰۰	-۱۰۰	۳۰	۶۰
W100-R25	۲۵	۱۰۰	-۱۰۰	۳۰	۶۰

۴-۵-۱ آنالیز نمونه‌های لایه‌نشانی شده بوسیله طیف‌سنجی رامان

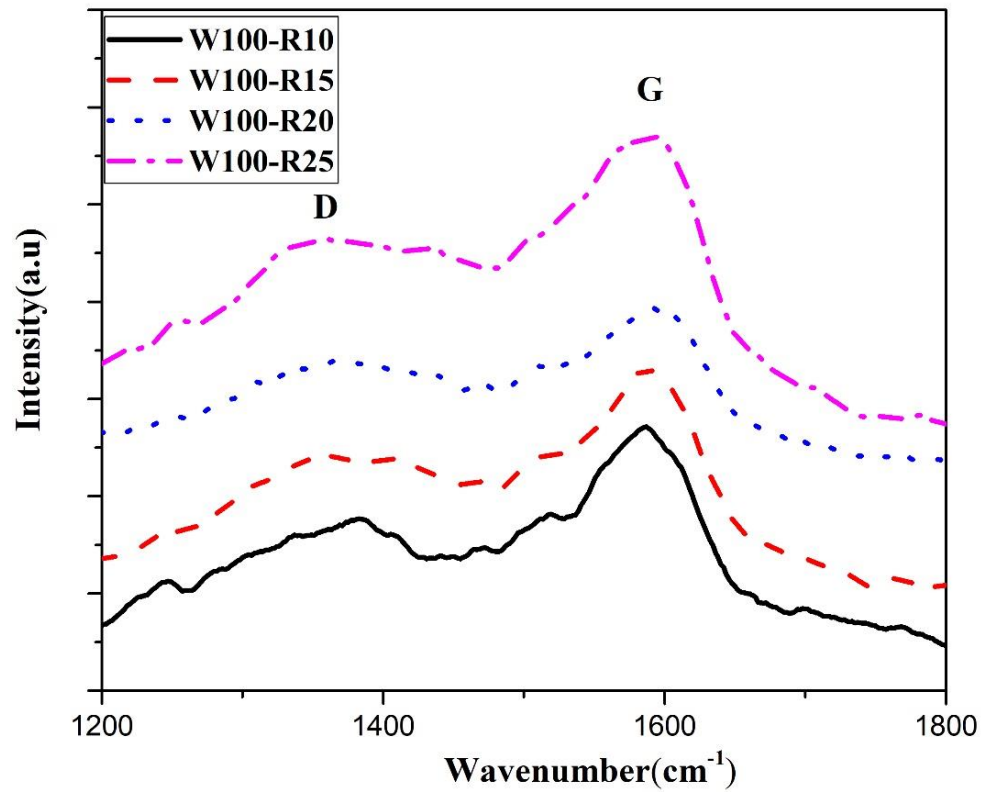
برای بررسی خواص ساختاری فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی از آنالیز رامان استفاده شده است. بررسی طیف رامان بدست آمده از فیلم‌های لایه‌نشانی شده در بازه $100-500 \text{ cm}^{-1}$ در شکل ۴-۳۳ نشان می‌دهد که برای نمونه W100-R25 قله بسیار ضعیفی در $147, 219, 348$ و 410 cm^{-1} مشاهده شده است که مربوط به پراکندگی اکسید مس می‌باشد که بر اساس اندازه ذرات مس محل قله می‌تواند کمی جابجا شود [۹۱]. طیف‌های رامان به دست آمده از نمونه‌ها در بازه $1200-1800 \text{ cm}^{-1}$ در شکل ۴-۳۴ نشان داده شده است. با برازش کردن طیف رامان نمونه‌های لایه‌نشانی شده با تابع گوسی طیف بدست آمده از هر فیلم که به دو قله G و D تجزیه می‌شود. نسبت قله D به G (I_D/I_G) و همچنین موقعیت قله G خواص ساختاری فیلم‌های آمورف کربنی را مشخص می‌کند.



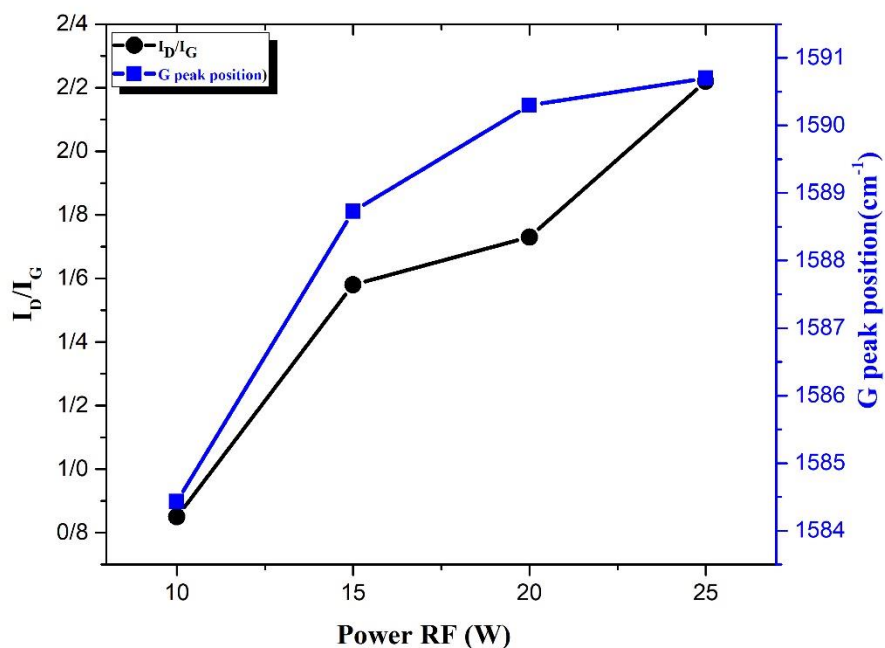
شکل ۴-۳: طیف رامان نمونه W100-R25 در بازه $500-100 \text{ cm}^{-1}$

نسبت I_D/I_G و همچنین موقعیت قله G در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی در شکل ۴-۳۵ نشان داده شده است. نسبت I_D/I_G و همچنین موقعیت قله G در اثر افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و عدم تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم و ولتاژ بایاس زیرلایه، روند افزایشی داشته است. طبق الگو رابرتسون این روند افزایشی برای قله G و نسبت I_D/I_G بیان می‌کند که فیلم‌ها در حال گذار از حالت آمورف کربنی (a-c) به حالت نانو گرافیتی (nc-graphite) می‌باشد. در این گذار حلقه‌های آروماتیک در فیلم‌ها افزایش خواهند یافت که سبب افزایش محتوای SP^2 نسبت به SP^3 خواهد شد. از افزایش محتوای SP^2 انتظار می‌رود که گاف نواری و همچنین مقاومت فیلم‌ها روند کاهشی داشته باشند. افزایش میزان ساختار SP^2 در فیلم‌ها می‌تواند به دلیل افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و غلظت نانو ذرات مس در ساختار فیلم‌ها باشد. با توجه به ثابت بودن توان منبع تغذیه جریان مستقیم این افزایش غلظت نانو ذرات

مس مانع از ایجاد ساختار SP^3 -C در فیلم‌های Cu-DLC شده است.



شکل ۴-۳۴: طیف رامان فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و ثابت بودن توان منبع تغذیه جریان مستقیم و با اعمال ولتاژ بایاس ثابت به زیرلایه

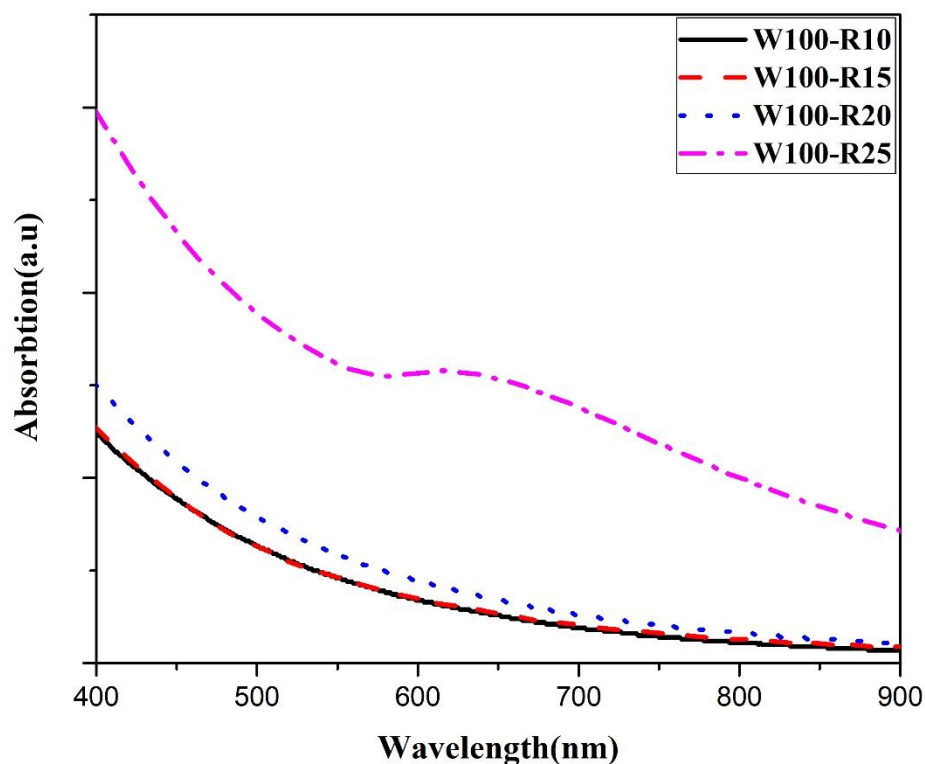


شکل ۴-۳۵: نسبت I_D/I_G و همچنین موقعیت قله G در فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و توان ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم با اعمال ولتاژ بایاس

۴-۵-۲ بررسی خواص اپتیکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده

۴-۵-۲-۱ طیف جذب

طیف جذب فیلم‌های Cu-DLC که در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و توان ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم و در حضور ولتاژ بایاس زیرلایه ایجاد شده اند در شکل ۴-۳۶ نشان داده شده است.



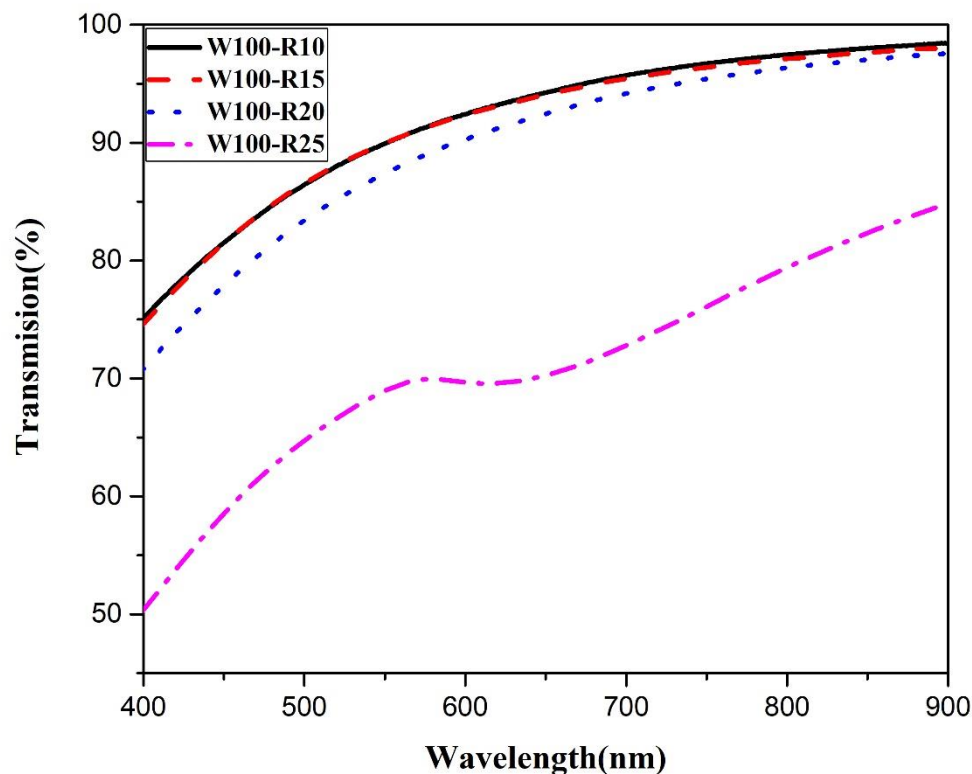
شکل ۴-۳۶: طیف جذب فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و توان ثابت جریان مستقیم همزمان در حضور ولتاژ بایاس ثابت زیرلایه

طیف جذب نمونه‌ها با افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی محتوای نانو ذرات مس در فیلم‌های لایه‌نشانی شده افزایش یافته است به نحوی که قله‌های پلاسמוنی برای نمونه W100-R25 بطور پیوسته در طول موج ۶۰۰-۷۰۰ nm کاملاً مشخص می‌باشد. اما برای نمونه‌ها دیگر قله پلاسمونی مشخص نمایان نشده است زیرا نسبت توان منبع تغذیه جریان مستقیم به فرکانس رادیویی به صورتی بوده است که محتوای کربن لایه‌نشانی شده نانو ذرات مس را در فیلم‌ها پوشانده و مانع از پراکندگی مشخص آن در طیف جذب خواهد شد.

۴-۵-۲-۲ گاف نواری

E₀₄ ۴-۵-۲-۱

برای محاسبه گاف نواری E₀₄ در فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده با تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی از طیف عبور فیلم‌ها استفاده شده است. طیف عبور فیلم‌های لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی در شکل ۴-۳۷ نشان داده شده است.

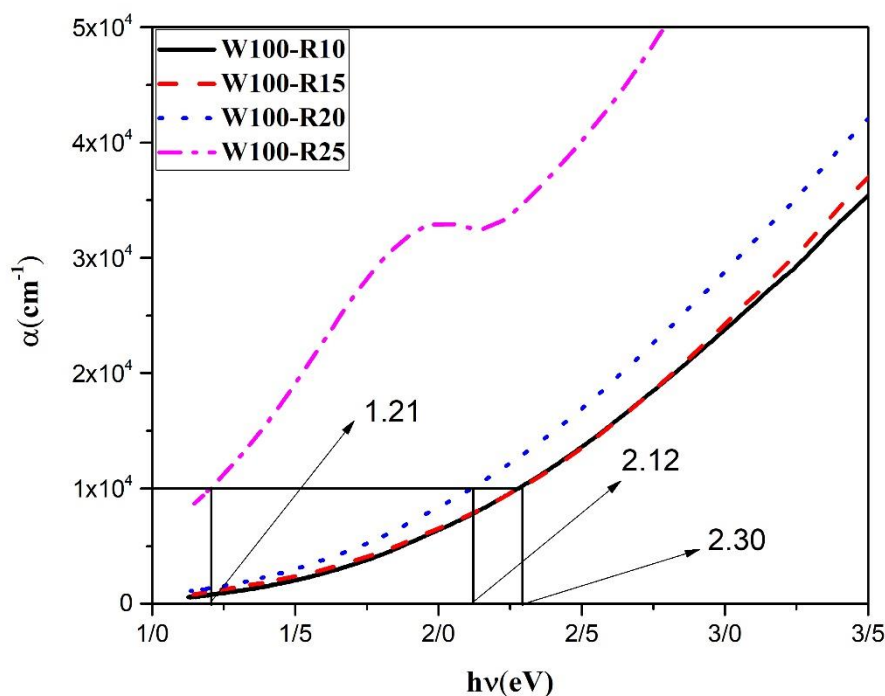


شکل ۴-۳۷: طیف عبور فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و توان ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم همزمان با اعمال ولتاژ بایاس ثابت زیرلایه

ضریب جذب فیلم‌های لایه‌نشانی شده با استفاده از معادله ۴-۱ به دست آمده است. ضریب جذب فیلم‌ها

در شکل ۴-۳۸ نشان داده شده است که با استفاده از آن می‌توان مقدار گاف نواری E₀₄ فیلم‌های لایه‌نشانی

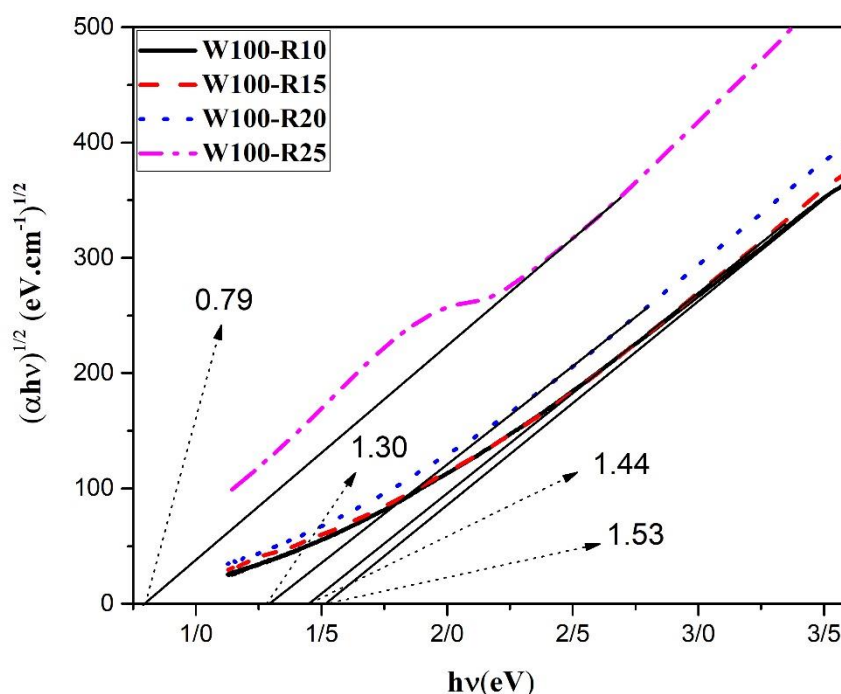
شده را محاسبه کرد.



شکل ۴-۳۸: ضریب جذب فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و توان ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم همزمان در حضور ولتاژ بایاس زیرلایه

در گاف نواری E₀₄ نمونه‌ها در اثر افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی از ۱۰ تا ۱۵W تغییر محسوسی مشاهده نشده است زیرا با توجه به اینکه توان منبع تغذیه جریان مستقیم ثابت بوده و کربن همواره در تمام فیلم‌ها به یک میزان بر روی بستر لایه‌نشانی می‌شود پس با افزایش توان ماده هدف مس میزان این نانو ذرات بسیار کم افزایش یافته و مانع از تغییر محسوسی در گاف E₀₄ برای نمونه W15 نسبت به نمونه W10 شده است. اما این روند با افزایش توان از ۱۵ تا ۲۵ W کاهش بیشتری داشته است. ایجاد این روند کاهشی در فیلم‌ها می‌تواند به دلیل افزایش بیشتر نانو ذرات مس در فیلم‌ها باشد که سبب افزایش محتوای SP² در فیلم‌ها شده و ساختار DLC را تخریب کرده و گاف اپتیکی E₀₄ را کاهش داده است.

گاف نواری اپتیکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی که با استفاده از روش برون‌یابی از قسمت خطی $(\alpha h\nu)^{1/2}$ (معادله تاک) به دست آمده است در شکل ۴-۳۹ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۹: گاف نواری فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و ثابت بودن منبع تغذیه جریان مستقیم همزمان در حضور ولتاژ بایاس زیرلایه

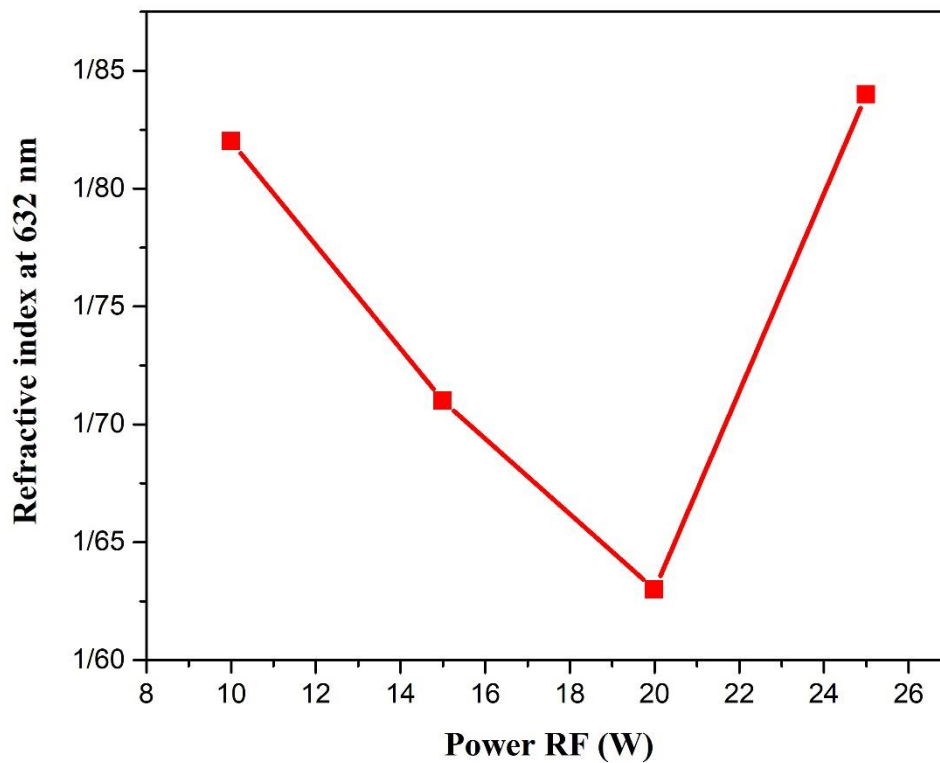
همان طور که در شکل ۴-۳۹ نشان داده شده است روند تغییرات گاف نواری فیلم‌ها در اثر افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی به صورت متقارن می‌باشد. گاف نواری فیلم‌های لایه‌نشانی شده با افزایش توان از ۱۰ تا ۱۵ W برای منبع تغذیه فرکانس رادیویی از ۱/۵۳eV تا مقدار ۱/۴۴eV کاهش یافته و همچنین این روند با افزایش توان از ۲۰ تا ۲۵ W از ۱/۳۰eV تا به مقدار ۰/۷۹eV کاهش یافته است. این روند کاهشی برای گاف نواری در فیلم‌ها به دلیل افزایش نانو ذرات مس بوده است که سبب افزایش پیوندها $\pi-\pi^*$ و

همچنین کاهش ساختار SP^3 در فیلم‌ها شده است.

۴-۵-۳ بررسی ضریب شکست فیلم‌های لایه‌نشانی شده

برای بررسی ضریب شکست فیلم‌های لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم که یکی از پارامترهای مهم در بررسی خواص اپتیکی فیلم‌های DLC می‌باشد از روش بیضی‌سنجی استفاده شده است. نمودار ضریب شکست بر حسب تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی در شکل ۴-۴۰ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۴-۴۰ نشان داده شده است ضریب شکست فیلم‌های لایه‌نشانی شده با افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی به صورت متقارن کاهش نمی‌یابد. با افزایش توان از ۱۰ تا ۲۰ W ضریب شکست فیلم‌ها به ترتیب از $1/82$ به $1/71$ و $1/63$ کاهش یافته است. زیرا با افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی مقدار نانو ذرات مس افزایش یافته و این افزایش سبب شده است که محتوای SP^3 کربن کاهش پیدا کند و فیلم‌ها به سمت گرافیتی شدن میل نمایند و چگالی فیلم‌ها کاهش پیدا کند. با کاهش چگالی فیلم‌ها ضریب شکست آن‌ها کاهش خواهد یافت. اما برای نمونه W100-R25 ضریب شکست با افزایش توان به یکباره روند عکسی با حالت‌ها قبل داشته و افزایش یافته است. این افزایش به دلیل افزایش بسیار زیاد نانو ذرات مس در فیلم‌ها بوده است. این افزایش سبب شده است که بیشتر حجم فیلم را نانو ذرات مس تشکیل دهند و از آنجایی که چگالی نانو ذرات مس بیشتر از گرافیت بوده پس چگالی فیلم‌ها افزایش خواهد یافت که سبب افزایش در ضریب شکست فیلم خواهد شد که این افزایش محتوای نانو ذرات مس در نمونه W25 در طیف سنجی مرئی فرابنفش از این کاملاً مشهود می‌باشد، زیرا فقط در این نمونه نسبت به نمونه‌های دیگر پراکندگی مشخصی از نانو ذره مس مشخص شده که در واقع می‌توان بر چگالی

فیلم تاثیر بسزایی داشته باشد.

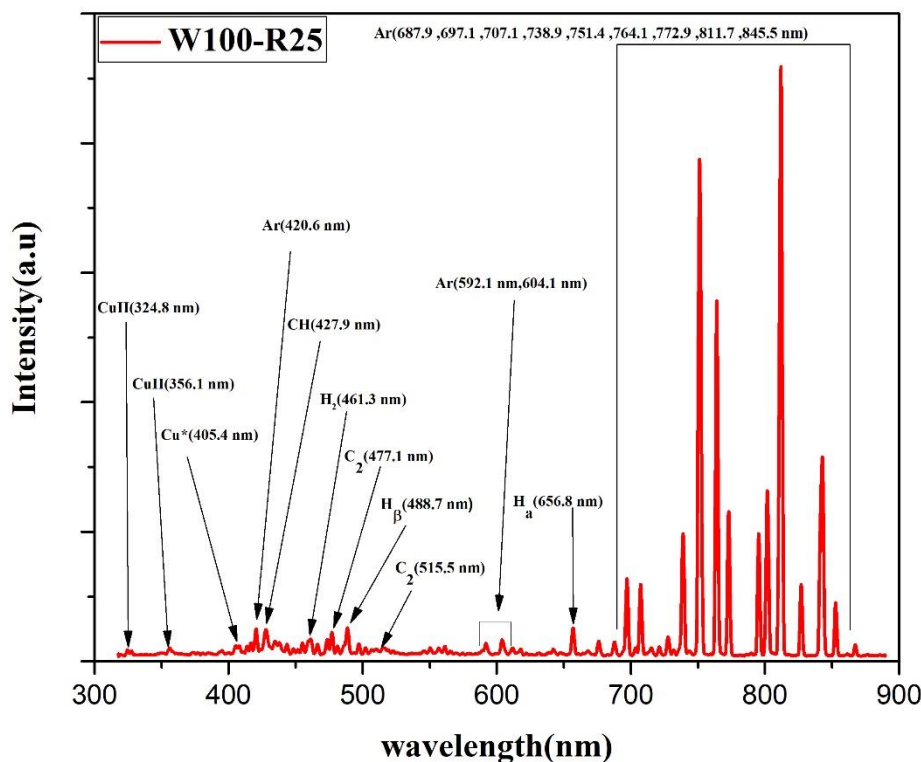


شکل ۴-۴۰: ضریب شکست فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و توان ثابت جریان مستقیم در حضور ولتاژ بایاس زیرلایه

۴-۵-۴ آنالیز عناصر فعال در پلاسما

شکل ۴-۴۱ طیف گسیل ایتیکی از محیط پلاسما که برای لایه‌نشانی نمونه W100-R25 استفاده شده

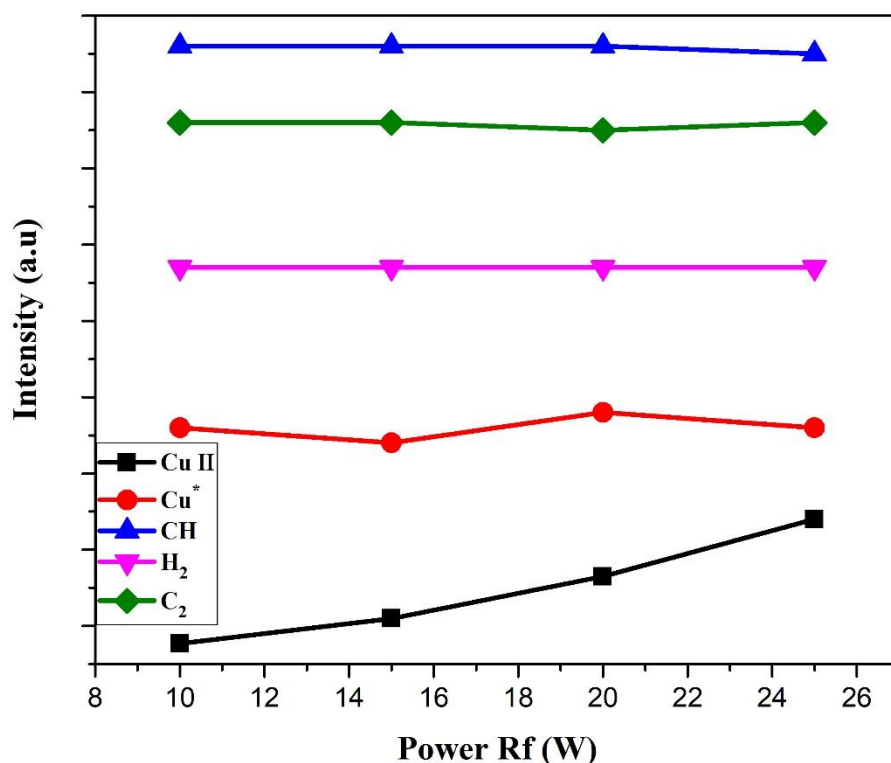
است را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱: طیف‌سنجی اپتیکی پلاسما ایجاد شده در توان ۲۵W منبع تغذیه فرکانس رادیویی و ۱۰۰ W منبع تغذیه جریان مستقیم همزمان در حضور ولتاژ بایاس ۱۰۰ V -

گونه‌های غالب در محیط پلاسما در توان ۲۵W منبع تغذیه فرکانس رادیویی و ۱۰۰W منبع تغذیه جریان مستقیم در حضور ولتاژ بایاس ثابت ۱۰۰V - شامل CuII (۳۲۴/۸nm)، CuII (۳۵۶/۱nm)، Cu^* (۴۰۵/۴nm)، ArI (۴۲۰/۶nm)، CH (۴۲۷/۹nm)، H_2 (۴۶۱/۳nm)، C_2 (۴۷۷/۱nm)، H_β (۴۸۸/۷nm)، C_2 (۵۱۵/۵nm)، Ar (۵۹۲/۱ و ۶۰۴/۱nm)، H_α (۶۵۶/۸nm). همچنین قله‌های تیزی که بعد از طول موج ۶۸۴/۹nm و تا ۸۴۵/۵nm ادامه دارند مربوط به Ar می‌باشند. نسبت گونه‌های فعال در محیط پلاسما در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. همان طور که انتظار می‌رود گونه‌های فعال مس در محیط پلاسما با افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی افزایش یافته است و این افزایش توان نیز سبب افزایش میزان نانو ذرات مس در فیلم‌های لایه‌نشانی شده می‌شود که با نتایج

بدست آمده از آنالیزهای قبلی مطابقت دارد. میزان گونه‌های کربنی در محیط پلاسما با افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی تغییراتی ایجاد نمی‌شود زیرا توان منبع تغذیه جریان مستقیم همواره ثابت و همچنین نسبت به منبع فرکانس رادیویی بسیار بالاتر بوده و افزایش توان منبع فرکانس رادیویی و به طبع آن افزایش گونه‌های مس خللی در مقدار گونه‌های کربنی در محیط پلاسما ایجاد نمی‌کنند ولی با توجه به افزایش نانو ذرات مس در فیلم‌های لایه‌نشانی شده سبب کاهش محتوای SP^3 در فیلم‌ها خواهد شد.



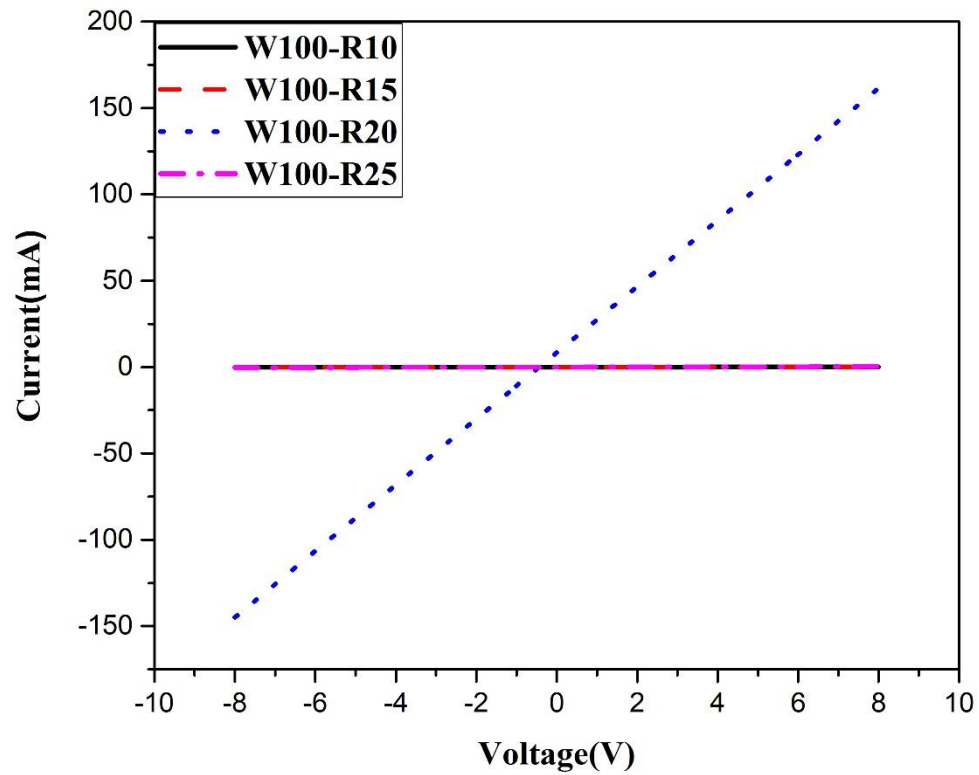
شکل ۴-۲: شدت گونه‌های فعال در محیط پلاسما در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و توان ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم همزمان در حضور ولتاژ بایاس ثابت.

۴-۵-۵ بررسی خواص الکتریکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده با استفاده از منحنی I-

V

مقاومت نمونه‌های لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی از شیب منحنی جریان-ولتاژ به دست آمده است. مقدار مقاومت نمونه‌ها در دو حالت دمای اتاق و دمای ۳۹۳ درجه کلین بررسی شده است. در دمای اتاق با افزایش توان منبع فرکانس رادیویی از ۱۰ تا ۱۵W تغییر محسوسی در مقاومت ایجاد نشده است و در حدود $3/3 - 3/2 \text{ G}\Omega$ بوده است. با افزایش توان از ۱۵ تا ۲۰W مقدار مقاومت به یکباره افت شدیدی داشته است و به مقدار $0/2 \text{ G}\Omega$ رسیده که به خاطر افزایش میزان نانو ذرات مس در نمونه‌ها و همچنین افزایش ساختار SP^2 بوده است. اما با افزایش توان از ۲۰ به ۲۵W مقاومت دوباره افزایشی شده و به مقدار $3/3 \text{ G}\Omega$ می‌رسد. زیرا با افزایش توان تا ۲۵W مقدار نانو ذرات مس در نمونه‌ها و سطح فیلم بسیار بیشتر شده است. به طوری که پراکندگی مشخص از خود در طیف جذب نشان داده است. این افزایش مقاومت می‌تواند به دلیل اکسیداسیون ناخواسته نانو ذرات مس بر روی سطح فیلم‌ها بوده باشد که در حین انجام فرآیند لایه‌نشانی و بررسی مقاومت نمونه ایجاد شده است. همان طور که در بررسی ساختاری نمونه‌ها بیان شده است قله‌های اکسید مس در طیف سنجی رامان نمونه W100-R25 مشاهده شده است. با اعمال دما و افزایش حامل‌های بار در فیلم‌ها مقاومت نمونه معمولاً افزایش خواهد یافت. نمودار جریان-ولتاژ فیلم-های لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی در شکل ۴-۴۳ نشان داده شده است. با اعمال دما به نمونه‌ها مقاومت کاهش می‌یابد. نمونه‌هایی که با توان ۱۰ و ۱۵W منبع تغذیه فرکانس رادیویی لایه‌نشانی شده اند مقدار مقاومت در آن‌ها با اعمال دما به ترتیب به میزان $150 \text{ M}\Omega$ و $180 \text{ M}\Omega$ رسیده است که روند کاهشی نسبت به دمای اتاق داشته است. مقاومت برای نمونه W100-R20 به مقدار بسیار کم $85/2 \text{ K}\Omega$ رسیده است. با افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی به ۲۵W مقاومت نمونه با اعمال دما نیز همچون مقاومت در دمای اتاق به خاطر اکسیداسیون ناخواسته نانو ذرات مس بر روی سطح فیلم افزایش

یافته است و به مقدار $25/39 \text{ M}\Omega$ رسیده است.



شکل ۴-۴۳: نمودار جریان-ولتاژ فیلم‌های Cu-DLC لایه‌نشانی شده در اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی و توان ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم در حضور ولتاژ بایاس زیرلایه ثابت

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر تغییر چهار نوع پارامتر که شامل تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم با حضور و عدم حضور ولتاژ بایاس زیرلایه، تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه و همچنین تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی می‌باشد بر روی خواص ساختاری، اپتیکی و الکتریکی فیلم‌های کربن آمورف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده در این بررسی بطور خلاصه به شرح زیر می‌باشد.

۵-۱-۱ اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم بدون ولتاژ بایاس زیرلایه

آنالیز ساختاری: برای بررسی خواص ساختاری از آنالیز رامان استفاده شده است. با افزایش توان نسبت I_D/I_G و همچنین موقعیت قله G افزایش یافته است. با افزایش I_D/I_G نسبت SP^3/SP^2 کاهش یافت و اندازه نانو ذرات گرافیتی در حال کاهش هستند ولی حلقه‌های آروماتیک خود را حفظ می‌کنند که نشان دهنده گذار فیلم‌ها از حالت گرافیتی به حالت نانو کریستال گرافیتی می‌باشد.

خواص اپتیکی: بررسی خواص اپتیکی فیلم‌های لایه‌نشانی شده نشان می‌دهد که با افزایش توان گاف اپتیکی E_{04} و گاف نواری E_g روند افزایشی دارند در حالی که با افزایش محتوای SP^2 باید این روند کاهشی باشد. این تناقض در روند گاف‌ها به دلیل کاهش نانو ذرات مس در ساختار فیلم‌ها می‌باشد.

ضریب شکست: با افزایش توان ضریب شکست فیلم‌ها نیز روند کاهشی دارند. ضریب شکست فیلم‌ها به چگالی آن‌ها مرتبط می‌شود. افزایش نسبت I_D/I_G سبب کاهش چگالی فیلم‌ها شده است که به خاطر افزایش محتوای SP^2 در ساختار فیلم‌ها می‌باشد.

طیف سنجی گسیل اپتیکی: طیف‌سنجی اپتیکی از محیط پلاسما نشان می‌دهد که با افزایش توان گونه‌های فعال کربن افزایش یافته است. اما در حالی که گونه‌های مس نسبت به گونه‌های کربنی کاهش

یافته اند.

مقاومت: مقاومت نمونه‌ها از شیب نمودار جریان-ولتاژ در دو حالت دمای اتاق و دمای ۳۹۳ درجه کلوین به دست آمده است. مقاومت نمونه‌ها در دمای اتاق با افزایش توان افزایش یافته است در حالی که محتوای SP^2 در فیلم‌ها افزایش یافته است. این افزایش مقاومت به دلیل کاهش نانو ذرات مس که جز فلزات و در دسته مواد رسانا قرار دارد، بوده است. این روند تغییرات در مقاومت با اعمال دما به نمونه‌ها نیز حفظ شده است. افزایش دما به نمونه‌ها سبب افزایش حامل‌های بار در آن‌ها شده است. به همین علت میزان مقاومت نمونه‌ها در دمای ۳۹۳ درجه کلوین نسبت به حالت دما اتاق کاهش یافته است ولی همان روند افزایشی خود را به علت کاهش نانو ذرات مس حفظ کرده است.

۵-۱-۲ اثر تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم در حضور ولتاژ بایاس زیرلایه

آنالیز ساختاری: در بررسی طیف رامان نمونه‌ها در اثر افزایش توان مشخص شده است که نسبت I_D/I_G کاهش و موقعیت قله G نیز افزایش یافته است. این روند I_D/I_G و موقعیت قله G در اثر تغییر توان نشان می‌دهد که فیلم‌های ساخته شده در حال گذار از حالت $a-c$ به حالت $ta-c$ می‌باشند. در این حالت نیز محتوای SP^3 کربن نسبت به SP^2 در فیلم‌ها با افزایش توان نیز افزایش یافته است. زیرا با اعمال ولتاژ بایاس به زیرلایه یونیزاسیون و انرژی جنبشی ذرات افزایش یافته است. با افزایش انرژی جنبشی ذرات نرخ کندوپاش از سطح ماده هدف و همچنین انرژی ذرات و مولکول‌های رسیده به فیلم‌ها بیشتر شده و سبب نفوذ بیشتر ذرات به درون فیلم‌ها خواهد شده و به همین دلیل محتوای SP^3 نیز افزایش می‌یابد.

خواص اپتیکی: گاف نواری E_{04} و گاف اپتیکی E_g فیلم‌ها با افزایش توان نیز افزایش یافته است. زیرا با

افزایش توان محتوای SP^2 در فیلم‌ها کاهش خواهد یافت. SP^3 فقط شامل پیوند σ بوده در حالی که SP^2 هردو پیوندهای π و σ را در خود جای داده است. شکاف بین حالت $\pi-\pi^*$ خیلی کمتر از شکاف بین حالت

$\sigma^* - \sigma$ نیز می باشد. از این رو حالت $\pi - \pi^*$ گاف نواری اپتیکی غالب را در فیلم‌های DLC ایجاد می کند. پس با کاهش محتوای SP^2 در فیلم‌ها میزان حالت $\pi - \pi^*$ کاهش یافته و سبب افزایش گاف‌های E_g و E_{04} در فیلم‌ها شده است.

ضریب شکست: با توجه به افزایش محتوای SP^3 در ساختار فیلم‌ها به دلیل افزایش توان، انتظار می رود ضریب شکست نیز با توجه به افزایش چگالی افزایش یابد، ولی ضریب شکست روند کاهشی دارد. این روند کاهشی به خاطر افزایش محتوای هیدروژن و پیوندهای هیدروکربنی در فیلم‌ها بوده است. افزایش هیدروژن و پیوندهای هیدروکربنی چگالی فیلم‌ها را کاهش داده است و سبب ایجاد روند کاهشی در ضریب شکست شده است.

طیف سنجی گسیل اپتیکی: طیف‌سنجی اپتیکی از محیط پلاسما نشان می دهد که با افزایش توان و همچنین حضور ولتاژ بایاس زیرلایه انرژی جنبشی و انتشار اپتیکی گونه‌های کربنی افزایش یافته است. همچنین گونه‌های هیدروژن و هیدروکربنی نیز افزایش یافته است. در حالی که گونه‌ها مس در پلاسما روند کاهشی داشته است. این روند افزایشی هیدروژن و پیوندهای هیدروکربن در محیط پلاسمایی سبب افزایش آن در ساختار فیلم‌ها شده است.

مقاومت: از نمودار جریان-ولتاژ برای محاسبه مقاومت نمونه‌ها در دو حالت دمای اتاق و دمای ۳۲۹ درجه کلون استفاده شده است. در بررسی مقاومت نمونه‌ها در دمای اتاق مقاومت نمونه‌ها با افزایش توان افزایش یافته است که این تغییر به علت افزایش محتوای SP^3 در نمونه‌ها می باشد. مقاومت نمونه‌ها نیز در دمای ۳۹۳ درجه کلون به علت افزایش حامل‌های بار نسبت به حالت دمای اتاق کاهش یافته است ولی همان روند افزایشی با افزایش توان منبع تغذیه در نمونه‌ها نیز حفظ شده است.

۵-۱-۳ اثر تغییر ولتاژ بایاس زیرلایه در توان‌های ثابت منبع تغذیه جریان مستقیم

و فرکانس رادیویی همزمان

آنالیز ساختاری: طیف رامان بدست آمده از نمونه‌ها در اثر افزایش ولتاژ بایاس زیرلایه روند ثابتی را نشان نمی‌دهد. نسبت I_D/I_G در فیلم‌ها با افزایش ولتاژ از ۵۰- تا به ۱۰۰V- روند کاهشی داشته است که نشان دهنده افزایش محتوای SP^3 نسبت به SP^2 در فیلم‌ها به علت افزایش انرژی جنبشی و نفوذ بیشتر گونه‌های کربنی به داخل فیلم‌ها می‌باشد. با افزایش ولتاژ بایاس نمونه‌ها برای ولتاژهای بالاتر ۱۰۰V- نسبت I_D/I_G روند افزایشی داشته است که نشان دهنده کاهش محتوای SP^3 در ساختار فیلم‌ها می‌باشد. زیرا با افزایش ولتاژ بایاس تا به ۲۰۰V- انرژی ذرات رسیده به فیلم‌ها بسیار افزایش یافته و سبب گرم شدن فیلم‌ها خواهد شد. ایجاد حرارت در فیلم‌ها سبب گرافیتی شدن آن‌ها و افزایش محتوای SP^2 خواهد شد.

خواص اپتیکی: گاف نواری فیلم‌ها در اثر افزایش ولتاژ بایاس روند ثابتی نداشته. با افزایش ولتاژ بایاس از ۵۰- تا به ۱۰۰V- گاف نواری روندی افزایشی داشته که بدلیل افزایش SP^3 در فیلم‌ها بوده است. اما با افزایش ولتاژ تا ۲۰۰V- به دلیل گرافیتی شدن فیلم‌ها روند تغییرات گاف نواری عکس شده و کاهش یافته است.

ضریب شکست: ضریب شکست نمونه‌ها با افزایش ولتاژ بایاس از ۵۰- تا به ۱۰۰V- بدلیل افزایش محتوای SP^3 در فیلم‌ها و افزایش چگالی روندی افزایشی داشته است ولی اما با افزایش ولتاژ از ۱۰۰- تا به ۲۰۰V- با افزایش محتوای SP^2 و کاهش چگالی فیلم‌ها روند کاهشی دارد.

طیف سنجی گسیل اپتیکی: افزایش ولتاژ بایاس زیرلایه سبب افزایش انرژی جنبشی گونه‌های موجود در پلاسما شده است. میزان گونه‌های هیدروژن در محیط پلاسما افزایش یافته است. در حالی که پیوندهای

هیدروکربنی در فیلم‌ها افزایش نیافته است زیرا با افزایش انرژی جنبشی گونه‌ها که سبب افزایش دمای فیلم‌ها شده است مانع از ایجاد پیوندهای هیدروکربنی در فیلم‌ها خواهد شد.

مقاومت: مقاومت نمونه‌های که در دو حالت دمای اتاق و دمای ۳۹۳ درجه کلون مورد بررسی قرار گرفته است. در دما اتاق مقاومت نمونه‌ها در واحد $G\Omega$ بوده است. با اعمال دما ۳۹۳ درجه کلون مقاومت‌ها تا واحد $M\Omega$ کاهش یافته است. با توجه به اینکه خواص فیلم‌های آمورف کربنی به شدت به روش‌های لایه-نشانی بستگی دارد. تغییر ولتاژ بایاس تاثیر زیادی بر روی مقاومت نمونه‌ها نشان نداده است.

۵-۱-۴ اثر تغییر توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی در حضور ولتاژ بایاس زیرلایه

آنالیز ساختاری: در بررسی طیف رامان از فیلم‌های لایه‌نشانی شده در اثر افزایش توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی مشخص شده است که افزایش نانو ذرات مس سبب تخریب پیوندهای SP^3 شده است. همچنین افزایش توان سبب شده تا نسبت I_D/I_G نیز افزایش یابند. همچنین موقعیت قله G نیز روند افزایشی داشته است که این حالت نشان دهنده گذار فیلم‌ها از حالت $a-c$ به $nc-g$ می‌باشند.

خواص اپتیکی: با افزایش توان مقدار گاف نواری E_{04} و گاف اپتیکی E_g در فیلم‌ها کاهش یافته است. زیرا افزایش توان سبب افزایش نانو ذرات در فیلم‌ها شده که محتوای SP^3 را کاهش و همچنین محتوای SP^2 را نیز افزایش داده است. سبب کاهش گاف‌ها در فیلم‌ها شده است.

ضریب شکست: ضریب شکست فیلم‌ها با افزایش توان روند ثابتی ندارند. زیرا با افزایش توان میزان نانو ذرات مس در حالت افزایش بوده و سبب افزایش SP^2 در فیلم‌ها شده و چگالی را کاهش داده که سبب کاهش ضریب شکست فیلم‌ها شده است. اما با افزایش توان از ۲۰ به ۲۵W ضریب شکست روند افزایشی داشته است. زیرا میزان نانو ذرات مس موجود در فیلم بیش از اندازه افزایش یافته است و از آنجایی که

میزان چگالی نانو ذرات مس بیشتر از گرافیت می باشد چگالی کل فیلم را افزایش داده که سبب افزایش ضریب شکست فیلم در این توان شده است.

طیف سنجی گسیل اپتیکی: طیف های بدست آمده از محیط پلاسما نشان می دهد که با افزایش توان میزان گونه های مس افزایش یافته است در حالی که گونه های کربنی تغییراتی نداشته است. زیرا میزان توان کربن نسبت به مس بسیار بالا بوده و افزایش توان مس تاثیری بر مقدار این گونه ها نداشته است. افزایش میزان گونه های مس نشان دهنده افزایش آنها در ساختار فیلم ها می باشد.

مقاومت: مقاومت نمونه های لایه نشانی شده با افزایش توان که در دو حالت دمای اتاق و دمای ۳۹۳ درجه کلون بررسی شد. در دمای اتاق با افزایش توان برای نمونه ها مقاومت نمونه ها کاهش یافته است ولی برای توان ۲۵W مقاومت افزایش یافته است که بدلیل اکسیداسیون نانو ذرات مس موجود در سطح بوده است. با افزایش دما مقاومت از واحد $G\Omega$ به حدود $M\Omega$ کاهش یافته است ولی همان روند دمای اتاق را حفظ کرده است.

در نتیجه تغییر توان منبع تغذیه جریان مستقیم در حضور ولتاژ بایاس به علت اینکه خواص اپتیکی بهتری نسبت به روش های دیگر لایه نشانی از خود نشان داده است روشی مناسب تری برای ایجاد لایه های Cu-DLC می باشد.

۲-۵ پیشنهاد برای پژوهش های آینده

باتوجه به مطالعات و کارهای آزمایشگاهی انجام شده در این پایان نامه، جهت ادامه تحقیقات و مطالعات تکمیلی در آینده که در این پایان نامه میسر نشد در این بخش به عنوان پیشنهادات ارائه می شود.

- استفاده از گازهای هیدروکربن بجای ماده هدف گرافیت (در این تحقیق از تارگت گرافیت

استفاده شده است.)

- تغییر فاصله زیرلایه تا ماده هدف (فاصله تارگت تا زیر لایه در این تحقیق همواره ۶۰mm بوده است)
- تغییر فشار کاری (فشار کاری استفاده شده در این تحقیق همواره 4×10^{-2} torr می باشد)
- استفاده از سیستم کندوپاش مغناطیسی فرکانسی توان بالا (1 HIPMS) در این تحقیق از سیستم کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم و رادیو فرکانسی همزمان استفاده شده است.)

¹High-power impulse magnetron sputtering

- [1] C. Donnet and A. Erdemir, *Tribology of Diamond-Like Carbon : Fundamentals and Applications*. Springer, 2008.
- [2] R. H. Baughman, A. A. Zakhidov, and W. A. De Heer, "Carbon nanotubes - The route toward applications," *Science*, vol. 297, no. 5582. American Association for the Advancement of Science, pp. 787–792, 2002.
- [3] W. Krätschmer, L. D. Lamb, K. Fostiropoulos, and D. R. Huffman, "Solid C60: a new form of carbon," *Nature*, vol. 347, no. 6291, p. 354, 1990.
- [4] R. B. Heimann, S. E. Evsyukov, and Y. Koga, "Carbon allotropes: A suggested classification scheme based on valence orbital hybridization," *Carbon*, vol. 35, no. 10–11. Elsevier Ltd, pp. 1654–1658, 1997.
- [5] J. Robertson, "Diamond-like amorphous carbon," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 37, no. 4–6, pp. 129–281, 2002.
- [6] J. C. Angus and C. C. Hayman, "Low-pressure, metastable growth of diamond and 'diamondlike' phases," *Science (80-.)*, vol. 241, no. 4868, pp. 913–921, 1988.
- [7] A. A. Voevodin and M. S. Donley, "Preparation of amorphous diamond-like carbon by pulsed laser deposition: A critical review," *Surface and Coatings Technology*, vol. 82, no. 3. Elsevier, pp. 199–213, 1996.
- [8] S. Khamseh *et al.*, "Magnetron-sputtered copper/diamond-like carbon composite thin films with super anti-corrosion properties," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 333, pp. 148–157, 2018.
- [9] Y.-Y. Chang, D.-Y. Wang, C.-H. Chang, and W. Wu, "Tribological analysis of nano-composite diamond-like carbon films deposited by unbalanced magnetron sputtering," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 184, no. 2–3, pp. 349–355, 2004.
- [10] S. Majeed, K. Siraj, S. Naseem, ... M. K.-M. R., and undefined 2017, "Structural and optical properties of gold-incorporated diamond-like carbon thin films deposited by RF magnetron sputtering," *Mater. Res. Express*, vol. 4, pp. 1–13, 2017.
- [11] N. Dwivedi *et al.*, "Investigation of properties of Cu containing DLC films produced by PECVD process," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 73, no. 2, pp. 308–316, 2012.
- [12] N. D. Baydoğan, "Evaluation of optical properties of the amorphous carbon film on fused silica," *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, vol. 107, no. 1, pp.

70–77, 2004.

- [13] Meškinis, A. Vasiliauskas, M. Andrulevičius, A. Jurkevičiūtė, D. Peckus, and S. Tamulevičius, “Diamond like carbon films with embedded Cu nanoclusters deposited by reactive high power impulse magnetron sputtering: Pulse length effects,” *Thin Solid Films*, vol. 673, pp. 2019.
- [14] L. Sun, X. Zuo, P. Guo, X. Li, P. Ke, and A. Wang, “Role of deposition temperature on the mechanical and tribological properties of Cu and Cr co-doped diamond-like carbon films,” *Thin Solid Films*, vol. 678, pp. 16–25, 2019.
- [15] M. Grischke, K. Bewilogua, K. Trojan, and H. Dimigen, “Application-oriented modifications of deposition processes for diamond-like-carbon-based coatings,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 74–75, no. PART 2, pp. 739–745, 1995.
- [16] K. Bewilogua, C. V. Cooper, C. Specht, J. Schröder, R. Wittorf, and M. Grischke, “Effect of target material on deposition and properties of metal-containing DLC (Me-DLC) coatings,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 127, no. 2–3, pp. 223–231, 2000.
- [17] S. Majeed *et al.*, “Structural and optical properties of gold-incorporated diamond-like carbon thin films deposited by RF magnetron sputtering,” *Mater. Res. Express*, vol. 4, no. 7, p. 076403, 2017.
- [18] A. A. Ahmad, “Optical and electrical properties of synthesized reactive rf sputter deposited boron-rich and boron-doped diamond-like carbon thin films,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 28, no. 2, pp. 1695–1705, 2017.
- [19] S. Flege, R. Hatada, A. Hanauer, W. Ensinger, T. Morimura, and K. Baba, “Preparation of Metal-Containing Diamond-Like Carbon Films by Magnetron Sputtering and Plasma Source Ion Implantation and Their Properties,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1, no. 1, p. 8.2000
- [20] M. Kahn *et al.*, “Structural and mechanical properties of diamond-like carbon films deposited by an anode layer source,” *Thin Solid Films*, vol. 517, no. 24, pp. 6502–6507, 2009.
- [21] R. Paul, R. Bhar, and A. K. Pal, “Field emission properties of composite nano-Au/DLC films prepared by CVD technique,” *Mater. Res. Bull.*, vol. 45, no. 5, pp. 576–583, 2010.
- [22] A. Jurkevičiūtė *et al.*, “Structure and density profile of diamond-like carbon films containing copper: Study by X-ray reflectivity, transmission electron microscopy, and spectroscopic ellipsometry,” *Thin Solid Films*, vol. 630, pp. 48–58, 2017.
- [23] P. Guo, X. Li, L. Sun, R. Chen, P. Ke, and A. Wang, “Stress reduction mechanism of diamond-like carbon films incorporated with different Cu contents,” *Thin Solid Films*, vol. 640, pp. 45–51, 2017.
- [24] D. Lide, “Handbook of Chemistry and Physics, 86th edn. CRC,” 2005.

- [25] S. Tamulevičius, Š. Meškinis, T. Tamulevičius, and H. G. Rubahn, "Diamond like carbon nanocomposites with embedded metallic nanoparticles," *Reports Prog. Phys.*, vol. 81, no. 2, p. 024501, 2018.
- [26] B. Zhou *et al.*, "Structure and optical properties of Cu-DLC composite films deposited by cathode arc with double-excitation source," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 69, pp. 191–197, 2016.
- [27] B. C. Yeldose and B. Ramamoorthy, "Characterization of DC magnetron sputtered diamond-like carbon (DLC) nano coating," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 38, no. 7–8, pp. 705–717, 2008.
- [28] I. G. Brown, "Cathodic arc deposition of films," *Annu. Rev. Mater. Sci.*, vol. 28, no. 1, pp. 243–269, 1998.
- [29] H. Randhawa, "Cathodic arc plasma deposition technology," *Thin Solid Films*, vol. 167, no. 1–2, pp. 175–186, 1988.
- [30] S. Anders, A. Anders, M. R. Dickinson, R. A. MacGill, and I. G. Brown, "S-shaped magnetic macroparticle filter for cathodic arc deposition," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 25, no. 4, pp. 670–674, 1997.
- [31] S. Xu *et al.*, "Mechanical properties and Raman spectra of tetrahedral amorphous carbon films with high sp³ fraction deposited using a filtered cathodic arc," *Philos. Mag. B*, vol. 76, no. 3, pp. 351–361, 1997.
- [32] N. K. Cuong, M. Tahara, N. Yamauchi, and T. Sone, "Diamond-like carbon films deposited on polymers by plasma-enhanced chemical vapor deposition," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 174–175, pp. 1024–1028, 2003.
- [33] N. K. Cuong, M. Tahara, N. Yamauchi, and T. Sone, "Diamond-like carbon films deposited on polymers by plasma-enhanced chemical vapor deposition," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 174, pp. 1024–1028, 2003.
- [34] L. H. Chou, "Hydrogenated amorphous carbon films prepared by plasma-enhanced chemical-vapor deposition," *J. Appl. Phys.*, vol. 72, no. 5, pp. 2027–2035, 1992.
- [35] K. C. Park, J. H. Moon, J. Jang, and M. H. Oh, "Deposition of hydrogen-free diamond-like carbon film by plasma enhanced chemical vapor deposition," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, no. 25, pp. 3594–3595, 1996.
- [36] K. C. Park, J. H. Moon, J. Jang, and M. H. Oh, "Deposition of hydrogen-free diamond-like carbon film by plasma enhanced chemical vapor deposition," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, no. 25, pp. 3594–3595, 1996.
- [37] S. Aisenberg and R. Chabot, "Ion-beam deposition of thin films of diamondlike carbon," *J. Appl. Phys.*, vol. 42, no. 7, pp. 2953–2958, 1971.
- [38] A. Erdemir, M. Switala, R. Wei, and P. Wilbur, "A tribological investigation of the

- graphite-to-diamond-like behavior of amorphous carbon films ion beam deposited on ceramic substrates,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 50, no. 1, pp. 17–23, 1991.
- [39] F. Qian, V. Craciun, R. K. Singh, S. D. Dutta, and P. P. Pronko, “High intensity femtosecond laser deposition of diamond-like carbon thin films,” *J. Appl. Phys.*, vol. 86, no. 4, pp. 2281–2290, 1999.
 - [40] 166,018 JS Chapin - US Patent 4 and undefined 1979, “Sputtering process and apparatus,” *Google Patents*.
 - [41] M. Ohring, *Materials science of thin films*. 2001.
 - [42] J. Vossen, W. Kern, and W. Kern, *Thin film processes II*. 1991.
 - [43] J. Xu, H. Fan, W. Liu, and L. Hang, “Large-area uniform hydrogen-free diamond-like carbon films prepared by unbalanced magnetron sputtering for infrared anti-reflection coatings,” 2007.
 - [44] J. Robertson, “Electronic and atomic structure of diamond-like carbon,” *Semiconductor Science and Technology*, vol. 18, no. 3. 2003.
 - [45] S. Zhang, X. Bui, Y. F.-S. and coatings technology, and undefined 2003, “Magnetron sputtered hard aC coatings of very high toughness,” *Elsevier*.
 - [46] G. N. Drummond and R. A. Scholl, “Enhanced reactive DC sputtering system.” *Google Patents*, 1998.
 - [47] P. Kelly, R. A.- Vacuum, and undefined 2000, “Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications,” *Elsevier*.
 - [48] K. Bewilogua, R. Wittorf, H. Thomsen, M. W.-T. S. Films, and undefined 2004, “DLC based coatings prepared by reactive dc magnetron sputtering,” *Elsevier*.
 - [49] J. R. Roth, “Industrial plasma engineering,” *Inst. Phys. Publ.*, vol. 1, pp. 366–367, 1995.
 - [50] C. R. Lin, D. H. Wei, C. K. Chang, and W. H. Liao, “Optical properties of Diamond-like Carbon films for antireflection coating by RF magnetron sputtering method,” in *Physics Procedia*, , vol. 18, pp. 46–50, 2011
 - [51] J. R. Roberts, “Optical-Emission Spectroscopy on the Gaseous Electronics Conference Rf Reference Cell,” *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 100, no. 4, p. 353, 1995.
 - [52] S. Iordanova and I. Koleva, “Optical emission spectroscopy diagnostics of inductively-driven plasmas in argon gas at low pressures,” *Spectrochim. Acta - Part B At. Spectrosc.*, vol. 62, no. 4, pp. 344–356,. 2007.
 - [53] M. M. Larijani, F. Le Normand, and O. Crégut, “An optical emission spectroscopy study of the plasma generated in the DC HF CVD nucleation of diamond,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 253, no. 8, pp. 4051–4059, 2007.

- [54] J. Cazes, *Analytical instrumentation handbook*. 2004.
- [55] PerkinElmer, *Concepts, Instrumentation and Techniques in Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*. .
- [56] E. Smith and G. Dent, *Modern Raman spectroscopy: a practical approach*. 2005.
- [57] Aroca. R, *Surface-Enhanced Vibrational Spectroscopy*,wiley, 2006..
- [58] W. Demtröder, *Laser spectroscopy*. 2008.
- [59] Lawrence H. Daly, Norman B. colthup, and Stephen E. Wiberely, *Introduction to infrared and Raman spectroscopy*. 2012.
- [60] A. C. Ferrari and J. Robertson, “Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond,” *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 362, no. 1824, pp. 2477–2512, 2004.
- [61] A. Ferrari and J. Robertson, “Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 61, no. 20, pp. 14095–14107, 2000.
- [62] B. Zhou *et al.*, “Structure and optical properties of Cu-DLC composite films deposited by cathode arc with double-excitation source,” *Diam. Relat. Mater.*, vol. 69, pp. 191–197, 2016.
- [63] Y. S. Park, H. S. Myung, J. G. Han, and B. Hong, “The electrical and structural properties of the hydrogenated amorphous carbon films grown by close field unbalanced magnetron sputtering,” in *Thin Solid Films*, vol. 482, no. 1–2, pp. 275–279, 2005
- [64] H. Fujiwara, *Spectroscopic ellipsometry: principles and applications*. 2007.
- [65] J. N. Hilfiker *et al.*, “Survey of methods to characterize thin absorbing films with Spectroscopic Ellipsometry,” *Thin Solid Films*, vol. 516, no. 22, pp. 7979–7989, 2008.
- [66] E. Mohagheghpour, M. Rajabi, R. Gholamipour, M. M. Larijani, and S. Sheibani, “Correlation study of structural, optical and electrical properties of amorphous carbon thin films prepared by ion beam sputtering deposition technique,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 360, pp. 52–58, 2016.
- [67] F. H. Abd El-Kader, M. A. Moharram, M. G. Khafagia, and F. Mamdouh, “Influence of the nitrogen content on the optical properties of CN x films,” *Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 97, pp. 1115–1119, 2012.
- [68] N. Sangiorgi, L. Aversa, R. Tatti, R. Verucchi, and A. Sanson, “Spectrophotometric method for optical band gap and electronic transitions determination of semiconductor materials,” *Opt. Mater. (Amst).*, vol. 64, pp. 18–25, 2017.
- [69] M. Pandey, D. Bhattacharyya, D. S. Patil, K. Ramachandran, N. Venkatramani, and A.

- K. Dua, "Structural and optical properties of diamond like carbon films," *J. Alloys Compd.*, vol. 386, no. 1–2, pp. 296–302, 2005.
- [70] J. Robertson, "Diamond-like amorphous carbon," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 37, no. 4–6, pp. 129–281, 2002.
- [71] Y. M. Foong, A. T. T. Koh, S. R. Lim, D. H. C. Chua, and H. Y. Ng, "Properties of laser fabricated nanostructured Cu/diamond-like carbon composite," *J. Mater. Res.*, vol. 26, no. 21, pp. 2761–2771, 2011.
- [72] J. Q. Liu, L. J. Li, B. Wei, F. Wen, H. T. Cao, and Y. T. Pei, "Effect of sputtering pressure on the surface topography, structure, wettability and tribological performance of DLC films coated on rubber by magnetron sputtering," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 365, pp. 33–40, 2019.
- [73] S. Tamulevičius, Š. Meškinis, T. Tamulevičius, and H.-G. Rubahn, "Diamond like carbon nanocomposites with embedded metallic nanoparticles," *Reports Prog. Phys.*, vol. 81, no. 2, p. 024501, 2018.
- [74] Ö. D. Coşkun and T. Zerrin, "Optical, structural and bonding properties of diamond-like amorphous carbon films deposited by DC magnetron sputtering," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 56, pp. 29–35, 2015.
- [75] F. H. Abd El-Kader, M. A. Moharram, M. G. Khafagia, and F. Mamdouh, "Influence of the nitrogen content on the optical properties of CN x films," *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 97, pp. 1115–1119, 2012.
- [76] C. Oppedisano and A. Tagliaferro, "Relationship between sp² carbon content and E04 optical gap in amorphous carbon-based materials," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 75, no. 23, pp. 3650–3652, 1999.
- [77] S. K. Najaf Abadi, S. I. Hosseini, M. Momeni, and H. Khaksaran, "Studying the effects of plasma produced species on the optical characteristics and bonding structure of diamond-like carbon films deposited by direct current unbalanced magnetron sputtering," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 229, pp. 348–354, 2019.
- [78] M. Pandey, D. Bhattacharyya, D. S. Patil, K. Ramachandran, and N. Venkatramani, "Diamond-like carbon coatings: AFM and ellipsometric studies," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 182, no. 1, pp. 24–34, 2004.
- [79] M. I. Khan and Mudassar Sabir, "350 KeV Cu²⁺ ions induced modification in structural, morphological and electrical properties of Au doped DLC thin films," *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 10, pp. 1–17, 2019.
- [80] M. I. Khan *et al.*, "Structural, Morphological, electrical and optical properties of Cu doped DLC thin films," *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 12, pp. 1–13, 2019.
- [81] W. Dai, H. Zheng, G. Wu, and A. Wang, "Effect of bias voltage on growth property of Cr-DLC film prepared by linear ion beam deposition technique," *Vacuum*, vol. 85,

no. 2, pp. 231–235, 2010.

- [82] L. Liu, T. Wang, J. Huang, Z. He, Y. Yi, and K. Du, “Diamond-like carbon thin films with high density and low internal stress deposited by coupling DC/RF magnetron sputtering,” *Diam. Relat. Mater.*, vol. 70, pp. 151–158, 2016.
- [83] N. Dwivedi, S. Kumar, and H. K. Malik, “Role of base pressure on the structural and nano-mechanical properties of metal/diamond-like carbon bilayers,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 274, pp. 282–287, 2013.
- [84] P. Mahtani, K. R. Leong, I. Xiao, A. Chutinan, N. P. Kherani, and S. Zukotynski, “Diamond-like carbon based low-emissive coatings,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 7, pp. 1630–1637, 2011.
- [85] L. G. Jacobsohn and F. L. Freire, “Influence of the plasma pressure on the microstructure and on the optical and mechanical properties of amorphous carbon films deposited by direct current magnetron sputtering,” *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, vol. 17, no. 5, pp. 2841–2849, 1999.
- [86] P. Safaie, A. Eshaghi, and S. R. Bakhshi, “Optical properties of oxygen doped diamond-like carbon thin films,” *J. Alloys Compd.*, vol. 672, pp. 426–432, 2016.
- [87] N. A. Sánchez, C. Rincón, G. Zambrano, H. Galindo, and P. Prieto, “Characterization of diamond-like carbon (DLC) thin films prepared by r.f. magnetron sputtering,” *Thin Solid Films*, vol. 373, no. 1–2, pp. 247–250, 2000.
- [88] A. Grill, “Electrical and optical properties of diamond-like carbon,” *Thin Solid Films*, vol. 355, pp. 189–193, 1999.
- [89] L. Wang, L. Li, and X. Kuang, “Effect of substrate bias on microstructure and mechanical properties of WC-DLC coatings deposited by HiPIMS,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 352, pp. 33–41, 2018.
- [90] X. M. Tang, J. Weber, S. N. Mikhailov, C. Müller, W. Hänni, and H. E. Hintermann, “Structure stability of hydrogenated amorphous carbon film during thermal annealing,” *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 185, no. 1–2, pp. 145–150, 1995.
- [91] A. Sahai, N. Goswami, S. D. Kaushik, and S. Tripathi, “Cu/Cu₂O/CuO nanoparticles: Novel synthesis by exploding wire technique and extensive characterization,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 390, pp. 974–983, 2016.
- [92] R. Alipour, S. Meshkani, and M. Ghoranneviss, “Specialized investigations on physical and morphological features of TiC thin films synthesized by PECVD method,” *EPJ Appl. Phys.*, vol. 71, no. 1, p. 10302, 2015.

Abstract

In this research, the structural, optical, and electrical properties of diamond-like carbon thin films that are continuously layered by direct current and radiofrequency magnetron sputtering have been investigated. In this research, the effect of two parameters of change of power and voltage of substrate bias for the properties of diamond-like carbon thin films if exposed and the results show that these two parameters have a significant effect on the properties of diamond-like carbon films. The results of the fabrication analysis, which is shown by Raman analysis, do not change with increasing direct current strength in SP^2 material, but the application of bias voltage under its force is below the direct amplification power of SP^3 light. Increasing the radio frequency power has increased the structure of SP^2 while the bias voltage shows a steady trend for such that it can not exist. Good optical films compared to SP^3 / SP^2 in structural films are examined at each stage. The failure of the films, which is badly obtained by elliptical measurement, is greater than the SP^3 / SP^2 ratio to the amount of hydrogen and hydrocarbon bonds in the structure of the associated films. The resistance of laminated films is due to the use of a unique current-voltage (I-V) current that increases the copper nanoparticles in the films and also continues the oxidation of these nanoparticles on the surface of the films for its application rate. Optical emission spectroscopy (OES) analysis is used for use in the plasma generated for layering as well as other types active in the layering process to make the required films.

Keywords: Diamond-like carbon, DC and simultaneous radio frequency power supply, Non-carbide impurities, Bias voltage



Shahrood University of Technology

Faculty of Physics and Nuclear Engineering

M.Sc. Thesis in plasma of Physics

Investigation of optical and structural properties carbon amorphous films with doped non Carbide by magnetron sputtering

By:

Alireza Mikhchin

Supervisor:

Dr. Seyed Iman Hosseini

October 2020