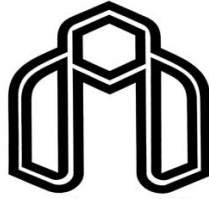


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک اتمی مولکولی

بررسی خواص اپتیکی و ساختاری فیلم‌های کربن شبه الماسی لایه نشانی شده
به روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم

نگارنده: سعید خدادادی نجف آبادی

اساتید راهنما

دکتر مهدی مومنی

دکتر سید ایمان حسینی

بهمن ۱۳۹۵

تقدیم به نگاه عاشقانه‌ی مادرم، که راز مهربانی، عشق و صبر را در زندگی به من

آموخت...

و تقدیم به دستان زحمکش پدرم، که راز تلاش، پشتکار و غیرت را در زندگی به من

آموخت...

خدایا

امروز را ممان قلمم باش

امروز پای سفره‌ی درودهای من باش

می‌دانم که فردا و فردا را ممان لطف و رحمت خود خواهی کرد

همچون گذشته...

سپاس پروردگاری را که به من توفیق داد تا گامی کوچک در جهت توسعه و پیشرفت علم بردارم. این پایان نامه حاصل تلاش قریب به دو سال بنده در زمینه‌ی علم پلاسما و نانو در دانشگاه صنعتی شاهرود است. بر خود لازم می‌دانم که از استاد گرامیم جناب آقای دکتر مومنی که در این دو سال همواره یار و یاور بنده بوده اند تشکر نمایم. تشکر بسیار ویژه می‌نمایم از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر حسینی که در این مدت علاوه بر راهنمایی‌های علمی و مصنوعی، همواره مانند یک برادر بزرگتر در کنارم بودند و باعث شدند که این پایان نامه را به پایان برسانم. اما در پایان لازم است از خانواده‌ی عزیزم که همواره در تمامی مراحل زندگانیم در کنارم بوده و مایه‌ی دلگرمی و آرامش من بوده اند تشکر کنم...

کلید

در این پایانامه به بررسی ساختار، خواص اپتیکی و مورفولوژی سطح لایه‌های نازک کربن شبه الماسی که به روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم لایه نشانی شده‌اند پرداخته شده است. در این پژوهش اثر دو پارامتر توان کندوپاش و شار گاز آرگون بر خواص لایه‌های نازک کربن شبه الماسی مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج نشان می‌دهند که این دو پارامتر تاثیر زیادی بر خواص اپتیکی، ساختاری و مورفولوژی لایه‌های آمورف کربنی دارند. ساختار فیلم‌ها و بررسی تغییرات پیوندهای گرافیتی گونه‌ی sp^2 و الماس گونه‌ی sp^3 با استفاده از طیف سنجی رامان صورت گرفت. مشاهده می‌شود که در شار ثابت ۸ sccm گاز آرگون، با افزایش توان لایه نشانی، پیوندهای sp^3 افزایش می‌یابند. همچنین مشاهده شد که در توان ثابت ۱۰۰ وات، با افزایش شار گاز آرگون، پیوندهای sp^2 افزایش می‌یابند. خواص اپتیکی فیلم‌ها مانند ضریب شکست و ضریب خاموشی با استفاده از روش بیضی سنجی به دست آمده و با استفاده از آن‌ها گاف نواری محاسبه شده است و نتایج نشان می‌دهند که با افزایش پیوندهای گرافیتی sp^2 گاف نواری کاهش می‌یابد. توپوگرافی و زبری سطح فیلم‌ها با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) محاسبه شده است و مشاهده می‌شود که با افزایش پیوندهای گرافیتی sp^2 زبری متوسط سطح افزایش می‌یابد. همچنین با استفاده از طیف سنجی نشر نوری به مطالعه‌ی ترکیبات و رادیکال‌های فعال در پلاسما پرداخته شده و ارتباط میان آن‌ها و ساختار لایه‌ها بررسی شده است.

کلمات کلیدی: کربن‌های شبه الماسی، کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم، گاف نواری، ضریب

شکست

لیست مقالات مستخرج از این پایانامه

۱- حسینی، سید ایمان؛ مومنی، مهدی؛ خدادادی نجف آبادی، سعید، (شهریور ۱۳۹۵)، " بررسی خواص اپتیکی فیلم‌های کربن شبه الماسی لایه نشانی شده به روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم"، کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه شیراز، ۱۰۶۹-۱۰۷۲

فهرست مطالب

۱- فصل اول: معرفی کربن های شبه الماسی، انواع روش های لایه نشانی فیلم های نازک

- ۱-۱ مقدمه..... ۲
- ۲-۱ معرفی کربن های شبه الماسی..... ۲
- ۳-۱ آلوتروپ های کربن..... ۵
- ۱-۳-۱ الماس..... ۵
- ۲-۳-۱ گرافیت..... ۶
- ۳-۳-۱ پیوندهای هیدروکربنی (اتان، استیلن و...)..... ۸
- ۴-۱ تاریخچه..... ۹
- ۵-۱ انواع روش های لایه نشانی..... ۱۳
- ۱-۵-۱ لایه نشانی پرتوی یونی..... ۱۳
- ۲-۵-۱ لایه نشانی به روش قوس کاندی الکتریکی..... ۱۷
- ۳-۵-۱ لایه نشانی لیزر پالسی..... ۱۸
- ۴-۵-۱ لایه نشانی به روش کندوپاش..... ۱۹
- ۱-۴-۵-۱ کندوپاش جریان مستقیم..... ۲۱

- ۲۲.....۱-۴-۵-۲ کندوپاش فرکانس رادیویی
- ۲۳.....۱-۴-۵-۳ کندوپاش مغناطیسی
- ۲۵.....۱-۵-۵-۵ روش رسوب بخار شیمیایی به کمک پلاسما (PECVD)
- ۲۶.....۱-۶-۱ پلاسما
- ۲۶.....۱-۶-۱ معادله‌ی ساها
- ۲۷.....۱-۶-۲ حفاظ دبای
- ۲۸.....۱-۶-۲-۱ طول دبای
- ۲۸.....۱-۶-۳ پارامترهای پلاسما

۲- فصل دوم: مروری بر برخی روش‌های مشخصه‌یابی کربن‌های شبه‌الماسی

- ۳۲.....۱-۲ مقدمه
- ۳۲.....۲-۲ طیف سنجی فرابنفش، مرئی، فروسرخ نزدیک (UV-Vis-NIR)
- ۳۳.....۱-۲-۲ ضریب جذب
- ۳۳.....۲-۲-۲ گاف نواری اپتیکی
- ۳۵.....۳-۲ بیضی سنجی
- ۳۷.....۴-۲ طیف سنجی رامان
- ۳۷.....۱-۴-۲ پراکندگی رایلی

۲-۴-۲ پراکندگی رامان..... ۳۷

۳-۴-۲ آنالیز رامان کربن شبه الماسی..... ۳۹

۵-۲ میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)..... ۴۲

۶-۲ طیف سنجی نشر نوری (OES)..... ۴۳

۳- فصل سوم: جزئیات مراحل و چیدمان آزمایشگاهی با استفاده از دستگاه کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم

۱-۳ مقدمه..... ۴۸

۲-۳ آماده سازی زیرلایه..... ۴۸

۳-۳ دستگاه کندوپاش..... ۴۹

۱-۳-۳ منبع تغذیه..... ۴۹

۲-۳-۳ محفظه‌ی لایه نشانی..... ۵۰

۳-۳-۳ نگهدارنده‌ی زیرلایه..... ۵۰

۴-۳-۳ شاتر..... ۵۰

۵-۳-۳ پمپ خلا روتاری..... ۵۱

۶-۳-۳ پمپ خلا دیفیوژن..... ۵۱

۷-۳-۳ کپسول گاز آرگون..... ۵۱

۸-۳-۳ کنترل کننده‌ی شار جرمی (MFC)..... ۵۲

۹-۳-۳ میکسر..... ۵۲

۱۰-۳-۳ ضخامت سنج ۵۲

۱۱-۳-۳ فشار سنج پیرانی ۵۳

۱۲-۳-۳ فشار سنج کاتد سرد (پنینگ) ۵۳

۱۳-۳-۳ تارگت گرافیتی ۵۳

۴- فصل چهارم: بحث و نتایج مربوط به لایه نشانی کربن های شبه الماسی

۱-۴ مقدمه ۵۶

۲-۴ بررسی اثر توان لایه نشانی ۵۶

۱-۲-۴ نرخ لایه نشانی ۵۶

۲-۲-۴ طیف سنجی رامان ۵۷

۳-۲-۴ طیف سنجی نشر نوری (OES) ۶۲

۴-۲-۴ خواص اپتیکی ۶۵

۱-۴-۲-۴ طیف جذب ۶۵

۲-۴-۲-۴ گاف نواری اپتیکی ۶۶

۳-۴-۲-۴ ضریب شکست ۶۹

۴-۴-۲-۴ ضریب خاموشی ۷۲

۵-۲-۴ زبری و توپوگرافی سطح ۷۳

۳-۴ بررسی اثر شار گاز آرگون ۷۶

- ۷۶.....۱-۳-۴ آهنگ لایه نشانی
- ۷۸.....۲-۳-۴ آنالیز رامان
- ۸۲.....۳-۳-۴ طیف سنجی نشر نوری
- ۸۵.....۴-۳-۴ خواص اپتیکی
- ۸۵.....۱-۴-۳-۴ ضریب جذب
- ۸۶.....۲-۴-۳-۴ گاف نواری اپتیکی
- ۸۸.....۳-۴-۳-۴ ضریب شکست
- ۸۹.....۴-۴-۳-۴ ضریب خاموشی
- ۹۰.....۵-۳-۴ زبری و توپوگرافی سطح

فصل پنجم: جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادات برای پژوهش های آینده

- ۹۴.....۱-۵ نتیجه گیری
- ۹۴.....۱-۱-۵ اثر توان لایه نشانی
- ۹۴.....۱-۱-۱-۵ طیف سنجی رامان
- ۹۴.....۲-۱-۱-۵ طیف سنجی نشر نوری
- ۹۴.....۳-۱-۱-۵ خواص اپتیکی
- ۹۵.....۴-۱-۱-۵ زبری و توپوگرافی سطح
- ۹۵.....۲-۱-۵ اثر شار گاز آرگون

- ۹۵.....۱-۲-۱-۵ طیف سنجی رامان.....
- ۹۵.....۲-۲-۱-۵ طیف سنجی نشر نوری.....
- ۹۶.....۳-۲-۱-۵ خواص اپتیکی.....
- ۹۶.....۴-۲-۱-۵ زبری و توپوگرافی سطح.....
- ۹۶.....۲-۵ پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده.....
- ۹۸.....مراجع.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: نمودار فازهای مختلف آمورف‌های کربنی..... ۴
- شکل ۲-۱: یک یاخته‌ی یکه از شبکه‌ی الماس..... ۵
- شکل ۳-۱: ادغام اوربیتال‌های s و p و ایجاد چهار پیوند sp^3 ۶
- شکل ۴-۱: پیوندهای چهاروجهی sp^3 در الماس..... ۶
- شکل ۵-۱: پیوندهای کووالانسی تشکیل دهنده‌ی گرافیت..... ۷
- شکل ۶-۱: ساختار لایه لایه گرافیت..... ۷
- شکل ۷-۱: سه پیوند sp^2 (از نوع سیگما) و پیوند ناشی از همپوشانی دو اوربیتال p (از نوع پی)..... ۸
- شکل ۸-۱: پیوندهای کووالانسی استیلن..... ۸
- شکل ۹-۱: الف) ترکیب اوربیتالی sp^3 ، ب) ترکیب اوربیتالی sp^2 ، پ) ترکیب اوربیتالی sp..... ۹

- شکل ۱-۱۰: دستگاه لایه نشانی پرتوی یونی..... ۱۱
- شکل ۱-۱۱: دستگاه لایه نشانی DC..... ۱۲
- شکل ۱-۱۲: دستگاه لایه نشانی RF..... ۱۲
- شکل ۱-۱۳: ساختار توری مولد پرتوی یونی..... ۱۶
- شکل ۱-۱۴: یک دستگاه پرتوی یونی..... ۱۶
- شکل ۱-۱۵: تصویر شماتیک از دستگاه PLD..... ۱۸
- شکل ۱-۱۶: نمودار رابطه‌ی پاشن برای شکستگی گاز..... ۲۰
- شکل ۱-۱۷: بمباران تارگت توسط یون‌های آرگون..... ۲۱
- شکل ۱-۱۸: نمایی از دستگاه کندوپاش جریان مستقیم..... ۲۲
- شکل ۱-۱۹: دستگاه کندوپاش RF..... ۲۳
- شکل ۱-۲۰: نمایی از پیکربندی کندوپاش مغناطیسی تعادلی و غیر تعادلی..... ۲۴
- شکل ۱-۲۱: کره‌ی دمای..... ۲۷
- شکل ۲-۱: جذب، بازتاب و عبور از یک لایه..... ۳۳
- شکل ۲-۲: گاف اپتیکی مستقیم و غیر مستقیم..... ۳۴
- شکل ۲-۳: بازتاب‌های متوالی از سطح یک فیلم و زیر لایه..... ۳۵
- شکل ۲-۴: پراکندگی رامان..... ۳۹
- شکل ۲-۵ (الف) مد تنفسی در حلقه‌ی آروماتیک، (ب) مد کششی در زنجیره..... ۴۰
- شکل ۲-۶ مقایسه‌ی میان انواع طیف رامان کربن..... ۴۱

- شکل ۲-۷ یک طرح الگو وار از نمودار طیف رامان کربن غیر بلوری و اثر عوامل مختلف بر تغییر مکان و شدت پیک‌های D و G..... ۴۲
- شکل ۲-۸: مدل بور برای اتم، جذب و نشر فوتون..... ۴۴
- شکل ۲-۹: نمودار ترازهای انرژی در اتم و یون..... ۴۵
- شکل ۲-۱۰: فتوکاتد، داینود و آند در یک فتومولتی پلیمر..... ۴۶
- شکل ۳-۱: سامانه‌ی کندوپاش مورد استفاده..... ۴۹
- شکل ۳-۲: نمای داخلی محفظه‌ی لایه نشانی..... ۵۰
- شکل ۳-۳: دستگاه کنترل کننده‌ی شار جرمی..... ۵۲
- شکل ۳-۴: دستگاه میکسر..... ۵۳
- شکل ۳-۵: اتصال فشار سنج‌ها به محفظه..... ۵۴
- شکل ۴-۱: نمودار آهنگ لایه نشانی بر حسب توان..... ۵۷
- شکل ۴-۲: طیف رامان نمونه‌ی ۶۰ وات..... ۵۸
- شکل ۴-۳: طیف رامان نمونه‌ی ۸۰ وات..... ۵۸
- شکل ۴-۴: نمودار طیف رامان نمونه‌ی ۱۰۰ وات..... ۵۹
- شکل ۴-۵: نمودار طیف رامان نمونه‌ی ۱۲۰ وات..... ۵۹
- شکل ۴-۶: طیف رامان در توان‌های مختلف..... ۶۰
- شکل ۴-۷: نمودار تغییرات I_D/I_G بر حسب توان..... ۶۱
- شکل ۴-۸: تغییرات مکان پیک G بر حسب توان..... ۶۱

- شکل ۴-۹: طیف نشر نوری پلاسما در توان ۶۰ وات..... ۶۳
- شکل ۴-۱۰: طیف نشر نوری پلاسما در توان ۸۰ وات..... ۶۳
- شکل ۴-۱۱: طیف نشر نوری پلاسما در توان ۱۰۰ وات..... ۶۴
- شکل ۴-۱۲: طیف نشر نوری پلاسما در توان ۱۲۰ وات..... ۶۴
- شکل ۴-۱۳: تغییرات شدت طیف برخی از عناصر و پیوندها در پلاسما با توان..... ۶۵
- شکل ۴-۱۴: ضریب جذب بر حسب طول موج برای توان‌های مختلف..... ۶۶
- شکل ۴-۱۵: انرژی E₀₄ برای توان‌های مختلف..... ۶۷
- شکل ۴-۱۶: نمودار تاک برای محاسبه‌ی گاف نواری غیر مستقیم برای توان‌های مختلف..... ۶۸
- شکل ۴-۱۷: چگالی ترازها در فیلم‌های DLC بر اساس مدل رابرتسون..... ۶۹
- شکل ۴-۱۸: طیف ضریب شکست برای توان‌های مختلف..... ۷۰
- شکل ۴-۱۹: ارتباط میان ضریب شکست و گاف نواری..... ۷۲
- شکل ۴-۲۰: نمودار طیف ضریب خاموشی فیلم‌ها در توان‌های مختلف..... ۷۳
- شکل ۴-۲۱: (الف) توپوگرافی سطح ۶۰ وات، (ب) توپوگرافی سطح ۸۰ وات..... ۷۴
- شکل ۴-۲۱: (ج) توپوگرافی سطح ۱۰۰ وات، (د) توپوگرافی سطح ۱۲۰ وات..... ۷۵
- شکل ۴-۲۲: زبری متوسط فیلم‌ها بر حسب توان..... ۷۵
- شکل ۴-۲۳: (a) انرژی ذرات فرودی از انرژی جابجایی اتم‌های سطح کمتر است و بر روی سطح پخش شده و با افزایش خوشه‌های sp² زبری سطح افزایش می‌یابد. (b) انرژی ذرات فرودی بیشتر از انرژی جابجایی سطح است و اتم‌ها به داخل سطح نفوذ کرده و مورفولوژی سطح تغییر زیادی نمی‌کند..... ۷۶

- شکل ۴-۲۴: نرخ لایه نشانی برای شارهای مختلف..... ۷۷
- شکل ۴-۲۵: نمودار طیف رامان ۴ sccm..... ۷۸
- شکل ۴-۲۶: نمودار طیف رامان ۸ sccm..... ۷۹
- شکل ۴-۲۷: نمودار طیف رامان ۱۲ sccm..... ۷۹
- شکل ۴-۲۸: نمودار طیف رامان ۱۶ sccm..... ۸۰
- شکل ۴-۲۹: طیف رامان در شارهای مختلف..... ۸۰
- شکل ۴-۳۰: شدت نسبی I_D/I_G ، افزایش این شدت نشان دهنده‌ی کاهش مقادیر sp^3 است..... ۸۱
- شکل ۴-۳۱: تغییرات پیک G در شارهای مختلف..... ۸۱
- شکل ۴-۳۲: طیف نشر نوری پلاسما در شار ۴ sccm..... ۸۳
- شکل ۴-۳۳: طیف نشر نوری پلاسما در شار ۸ sccm..... ۸۳
- شکل ۴-۳۴: طیف نشر نوری پلاسما در شار ۱۲ sccm..... ۸۴
- شکل ۴-۳۵: طیف نشر نوری پلاسما در شار ۱۶ sccm..... ۸۴
- شکل ۴-۳۶: شدت نسبی برخی پیوندهای هیدروژن دار، مشاهده می‌شود که با افزایش شار گاز آرگون شدت نسبی پیوندهای هیدروژن دار کاهش می‌یابد. این موضوع می‌تواند باعث کاهش پیوندهای CH در فیلم‌ها گردد..... ۸۵
- شکل ۴-۳۷: ضریب جذب اپتیکی فیلم‌ها در شارهای مختلف..... ۸۶
- شکل ۴-۳۸: گاف نواری E_{04} در شارهای مختلف..... ۸۷
- شکل ۴-۳۹: نمودار تاک برای محاسبه‌ی گاف نواری غیر مستقیم در شار گاز آرگون مختلف..... ۸۷

شکل ۴-۴۰: طیف ضریب شکست فیلم‌ها در شارهای مختلف..... ۸۸

شکل ۴-۴۱: ارتباط میان ضریب شکست و گاف نواری..... ۸۹

شکل ۴-۴۲: طیف ضریب خاموشی فیلم‌ها در شارهای مختلف..... ۹۰

شکل ۴-۴۳: الف) توپوگرافی سطح ۴ sccm، ب) توپوگرافی سطح ۸ sccm..... ۹۱

شکل ۴-۴۳: ج) توپوگرافی سطح ۱۲ sccm، د) توپوگرافی سطح ۱۶ sccm..... ۹۲

شکل ۴-۴۴: نمودار زبری متوسط سطح بر حسب شار گاز آرگون..... ۹۲

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱: مقایسه ویژگی‌های آلوتروپ‌های مختلف کربن..... ۴

جدول ۴-۱: توان، ضخامت، زمان و شار هر آزمایش در پارامتر توان..... ۵۷

جدول ۴-۲: توان، شار، فشار، زمان و ضخامت هر آزمایش در پارامتر شار گاز آرگون..... ۷۷

۱- فصل اول

معرفی کربن های شبه الماسی، انواع روش های لایه نشانی

فیلم های نازک

۱-۱ مقدمه

در سال‌های اخیر، علم لایه نشانی مواد و اصلاح و پردازش سطوح یکی از مهمترین و پرکاربردترین علوم در زمینه‌های مختلف مانند صنعت و پزشکی است. لایه نشانی مواد، اعم از رسانا، نیمه رسانا و نارسانا کاربردهای بسیار زیادی در زمینه‌های مختلف مانند، ادوات اپتیکی، وسایل مغناطیسی، مدارهای مجتمع نوری، ابزار برش و همچنین کاربرد در بسیاری از ادوات و ابزار پزشکی دارد. بی شک رشد سریع علم مانند فناوری ارتباطات، پردازش اطلاعات و ذخیره سازی، صنایع تزئینی، پوشش‌های سخت و مقاوم و همچنین بسیاری از ابزارآلات نوری مرهون پیشرفت فناوری لایه‌های نازک با روش‌های مناسب و مختلف است. لایه‌های نازک با ضخامتی نانومتری به دلیل ویژگی‌هایی مانند نازک بودن و نیز بزرگی بسیار زیاد نسبت سطح به حجم دارای خواصی هستند که نقش عمده‌ای را در بهبود فرایندهای صنعتی نوین ایفا می‌کنند. یکی از عناصر مهم در طبیعت که به دلیل دارا بودن خواص مختلف توجهات بسیاری را معطوف به خود کرده است کربن و لایه‌های نازک کربنی مانند کربن‌های شبه الماسی می‌باشد. در فصل اول این پایانامه مروری کوتاه بر معرفی، تاریخچه و ترکیبات کربن‌های شبه الماسی داریم و در ادامه به انواع روش‌های لایه نشانی این نوع مواد می‌پردازیم.

۱-۲ معرفی کربن‌های شبه الماسی^۱

کربن‌های شبه الماسی نیمه رساناهای بدون شبکه‌ی منظم یا آمورف‌هایی هستند که دارای دو نوع پیوند کربن-کربن می‌باشند. این پیوندها عبارتند از پیوندهای الماس گونه‌ی چهار وجهی sp^3 و گرافیت گونه‌ی سه گوشه‌ی sp^2 . ویژگی‌های فیزیکی این مواد مربوط به پیوندهای محکم sp^3 است در حالی که ویژگی‌های الکترونیکی این مواد مربوط به پیوندهای sp^2 می‌باشد [۱]. از ویژگی‌های مهم این فیلم‌ها می‌توان به سختی بالا، ضریب اصطکاک پایین، واکنش پذیری شیمیایی پایین و عبوردهی اپتیکی مناسب اشاره کرد. همچنین این فیلم‌ها گستره‌ی وسیعی از گاف نواری در نیمه رساناها را شامل می‌شوند. فیلم‌های

^۱ Diamond like carbon

کربن شبه الماسی که به اختصار (DLC)^۱ نیز نامیده می‌شوند کاربردهای بسیار متنوعی در اپتیک مانند پوشش‌های عبور دهنده‌ی مناسب، روکش‌های نوری ضد بازتاب، در صنعت مانند ابزار برش، روکش‌های مقاوم در برابر خوردگی، صفحه‌های حافظه‌ی مغناطیسی و همچنین وسایل الکترومکانیکی بسیار کوچک^۲ و در پزشکی شامل چیپ‌ها و حسگرهای زیستی می‌باشند [۲]. مقدار نسبی درصد sp^3/sp^2 مشخص کننده‌ی ویژگی‌های این فیلم‌ها است [۳، ۴]. اولین بار لایه نشانی فیلم‌های DLC توسط آیزنبرگ و چابوت^۳ به روش پرتوی یونی انجام گرفت. اما لایه نشانی این فیلم‌ها بسته به نوع کاربرد در صنعت یا آزمایشگاه به روش‌های بسیار متنوع و متفاوتی شامل روش‌های فیزیکی و شیمیایی انجام می‌شود. روش‌هایی مانند پرتوی یونی، کندوپاش، قوس کاتدی، لیزر پالسی و همچنین روش تبخیر شیمیایی به کمک پلاسما. در بسیاری از روش‌های لایه نشانی این فیلم‌ها مانند تبخیر شیمیایی به کمک پلاسما از یک گاز هیدروژن دار مانند متان (CH_4) و یا استیلن (C_2H_2) استفاده می‌شود که باعث می‌شود مقادیری از هیدروژن وارد این فیلم‌ها گردد و در اصطلاح به آن‌ها آمورف‌های کربنی هیدروژن دار ($a-C:H$)^۴ می‌گویند [۵]. مقادیر اندک هیدروژن باعث پایداری ویژگی‌های الماسی می‌گردد در حالی که مقادیر زیادتر هیدروژن ویژگی‌های پلیمری این نوع فیلم‌ها را تقویت می‌کند [۱]. بسته به نوع کاربرد مناسب در بسیاری از مواقع در لایه نشانی این فیلم‌ها از برخی عناصر غیر فلزی مانند سیلیکون و اکسیژن ($a-C:H:X$) و یا از برخی فلزات نیز مانند مس و یا نقره ($a-C:Me$) استفاده می‌گردد [۶]. در شکل ۱-۱ آلوتروپ‌های مختلف کربن به همراه برخی ویژگی‌های فیزیکی آنها آورده شده است [۷].

¹ Diamond-like carbon

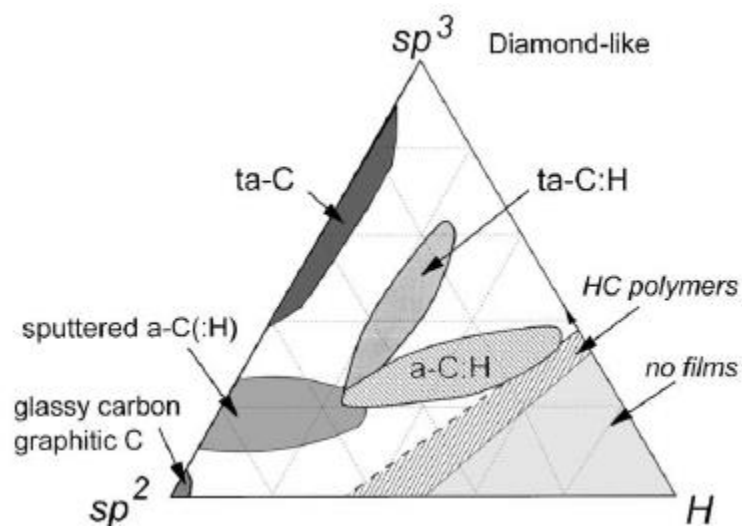
² Micro electromechanical devices

³ Aisenberg and Chabot

⁴ Hydrogenated amorphous carbon

جدول ۱-۱: مقایسه‌ی ویژگی‌های مهم آلوتروپ‌های کربن

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

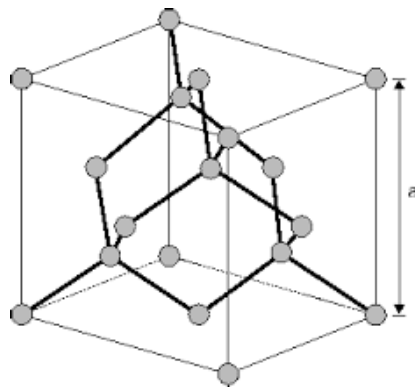


شکل ۱-۱: نمودار فازهای مختلف آمورف‌های کربنی [۷]

۳-۱ آلوتروپ‌های کربن

۱-۳-۱ الماس

کربن می‌تواند در حالت‌های مختلفی در طبیعت یافت شود. یکی از حالت‌های آن الماس است. ساختار بلوری الماس شامل شبکه‌ای از پیوندهای sp^3 می‌باشد که به وسیله‌ی پیوندهای کووالانسی محکم سیگما (σ) به یکدیگر متصل شده‌اند. الماس به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد مانند: سختی بالا، عبوردهی اپتیکی مناسب، رسانش گرمایی بالا، واکنش پذیری شیمیایی پایین یک ماده‌ی بی نظیر در طبیعت شناخته می‌شود و کاربردهای گوناگونی دارد. الماس متشکل از ساختار بلوری مکعبی fcc است (شکل ۱-۲) [۸].



شکل ۱-۲: یک یاخته‌ی یکه از شبکه‌ی الماس

در ساختار شبکه‌ای الماس هر اتم کربن با چهار اتم کربن دیگر پیوندهای چهار وجهی دارد. در واقع می‌دانیم که اتم کربن در تراز دوم خود چهار الکترون ظرفیت دارد. ساختار الکترونی کربن بصورت $1s^2 2s^2 2p^2$ است. در مجاورت یک اتم دیگر مانند کربن و یا هیدروژن در تراز ۲ هر سه اوربیتال p_x, p_y, p_z پر می‌شوند. در نتیجه اوربیتال‌های s (کروی)^۱ و p (دمبلی)^۲ در تراز دوم با یکدیگر ادغام می‌شوند^۳ و نتیجه‌ی آن ایجاد چهار اوربیتال sp^3 است (شکل ۱-۳). این پیوندهای چهار گانه از نوع پیوندهای

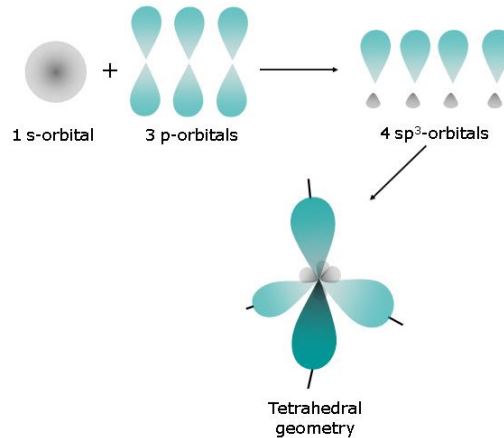
^۱ Spherical

^۲ Dumbbell

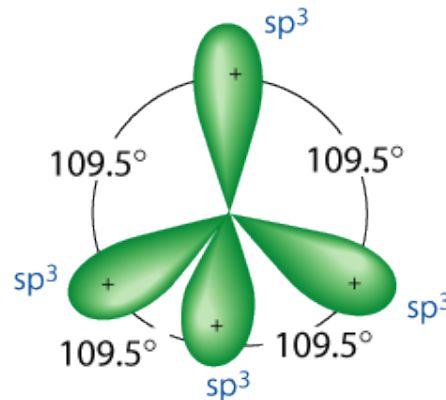
^۳ Hybridized

سیگما هستند و پیوندهای کربن-کربن در الماس و یا کربن-هیدروژن در گاز متان از این نوع هستند.

زاویه‌ی پیوندی در این پیوندها 109.5° درجه است (شکل ۱-۴).



شکل ۱-۳: ادغام اوربیتال‌های s و p و ایجاد چهار پیوند sp^3

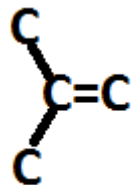


شکل ۱-۴: پیوندهای چهاروجهی sp^3 در الماس

۱-۳-۲ گرافیت

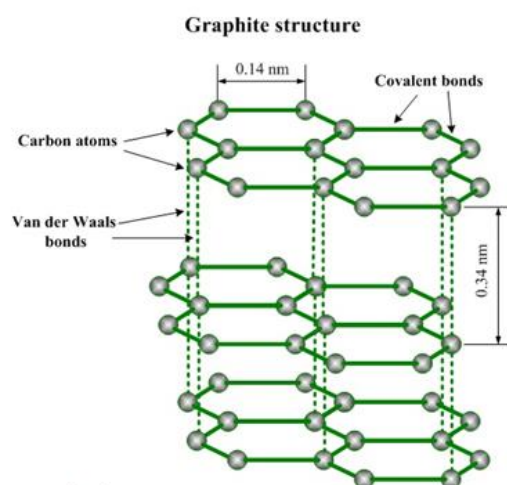
آلوتروپ دیگر کربن گرافیت است. در گرافیت هر اتم کربن با سه اتم کربن دیگر پیوند کووالانسی ایجاد می‌کند که یکی از آن پیوندها پیوند کووالانسی دوگانه است (شکل ۱-۵). دو پیوند یگانه پیوندهای سیگما و از پیوندهای دوگانه یکی سیگما و دیگری پی است. ساختار گرافیت بصورت اتم‌هایی است که به صورت لایه لایه بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند که هر کدام از لایه‌ها با پیوند ضعیفتر و اندروالسی به

یکدیگر چسبیده اند (شکل ۱-۶). به هریک از این لایه ها گرافن می گویند که در سال های اخیر تحقیقات زیادی را به خود اختصاص داده است. نانوتیوب های رایجی که اخیرا بکار گرفته می شوند از دیواره های استوانه ای شکلی از گرافن تشکیل یافته اند [۹].



شکل ۱-۵: پیوندهای کووالانسی تشکیل دهنده ی گرافیت

گرافیت از پیوندهای sp^2 تشکیل یافته است. به دلیل ساختار لایه لایه، گرافیت ماده ای نرم و دارای ضریب اصطکاک پایین است. این ماده همچنین دارای رسانندگی الکتریکی مناسبی است به گونه ای که در بسیاری از الکترودها از گرافیت استفاده می شود. الکترون هایی که در پیوند π حضور دارند دلیل رسانایی گرافیت هستند. در واقع این الکترون ها بر خلاف الکترون هایی که در پیوندهای محکم σ حضور دارند، قابلیت این را دارند که در واکنش های الکتریکی شرکت کنند. مشاهده شده است که در دماهای بالاتر از ۴۰۰ درجه ی سانتی گراد در فیلم های آمورف کربنی مقدار زیادی از پیوندهای sp^3 به پیوندهای گرافیت گونه ی sp^2 تبدیل می شوند. چنین دماهایی بخوبی می توانند در لایه نشانی و پوشش فیلم های

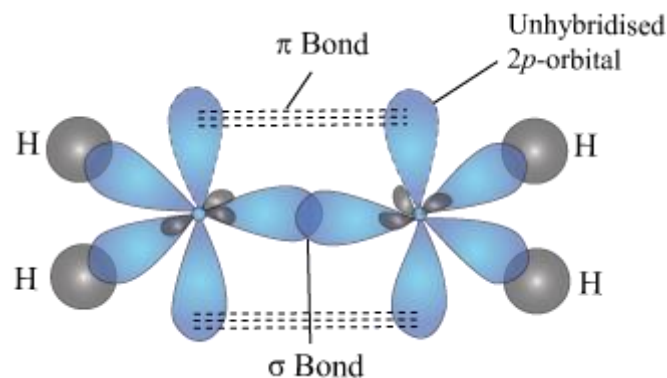


شکل ۱-۶: ساختار لایه لایه ای گرافیت

گرافیتی موثر باشند.

۳-۳-۱ پیوندهای هیدروکربنی (اتان، استیلن و...)

یکی دیگر از مولکول‌های کربن داری که متشکل از پیوندهای sp^2 می‌باشد اتان (C_2H_4) است. در مولکول اتان اتم‌های کربن با هیدروژن توسط پیوندهای سیگما به یکدیگر متصل شده‌اند. همچنین اتم‌های کربن نیز به یکدیگر با پیوندهای دوگانه متصل شده‌اند که یکی از آن‌ها پیوند سیگما و دیگری پیوند پی (ناشی از همپوشانی در اوربیتال ترکیب نشده‌ی پی در مجاورت یکدیگر) است (شکل ۷-۱). 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 مثلا 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 آن‌ها اتم کربن با دو اتم کربن و هیدروژن دیگر پیوند دارد برقرار می‌باشند. در این مولکول اتم‌های کربن با پیوندی سه گانه به یکدیگر و با پیوندی یگانه به اتم‌های هیدروژن متصل شده‌اند (شکل ۸-۱).

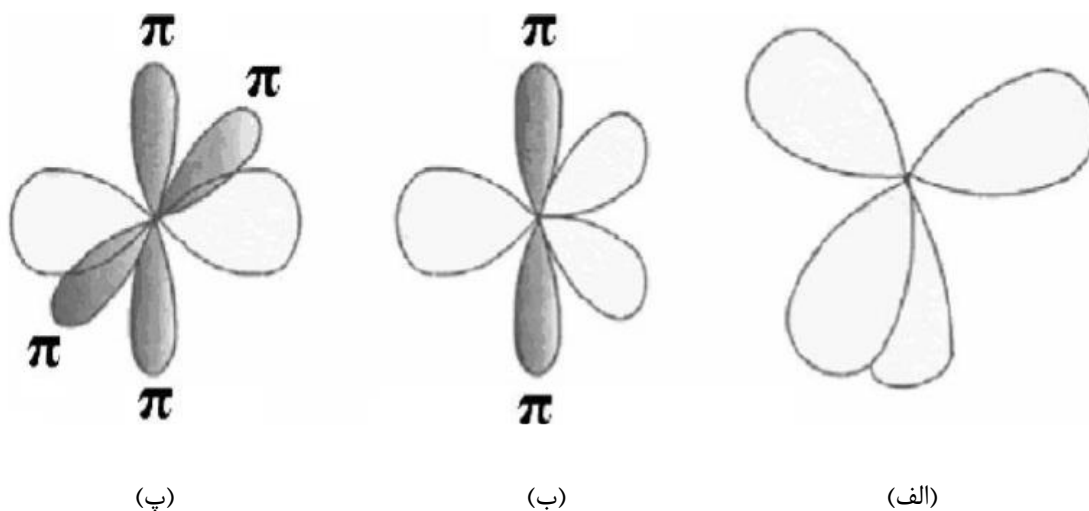


شکل ۷-۱: سه پیوند sp^2 (از نوع سیگما) و پیوند ناشی از همپوشانی دو اوربیتال p (از نوع پی)



شکل ۸-۱: پیوندهای کووالانسی در استیلن

پیوند کربن-هیدروژن و یکی از پیوندهای کربن-کربن از نوع سیگما هستند و دو پیوند کربن-کربن دیگر از نوع پی هستند. پس پیوندهای کربن در طبیعت شامل پیوندهای sp^1 ، sp^2 و sp^3 هستند (شکل ۱-۹).



شکل ۱-۹: (الف) ترکیب اوربیتالی sp^3 (ب) ترکیب اوربیتالی sp^2 (پ) ترکیب اوربیتالی sp^1 [۷]

در واقع آنچه گفته شد مروری بر ساختار و ویژگی‌های اتم کربن و آلوتروپ‌های مختلف آن نظیر گرافیت، الماس و انواع پلیمرها و همچنین نانوتیوب‌های کربنی است که امروزه نقش مهمی در صنعت و تکنولوژی و همچنین در علم پزشکی دارند. نظیر این ویژگی‌ها در فیلم‌های آمورف کربنی نیز وجود دارد که باعث استفاده از این مواد در صنعت و پزشکی گردیده است.

۴-۱ تاریخچه

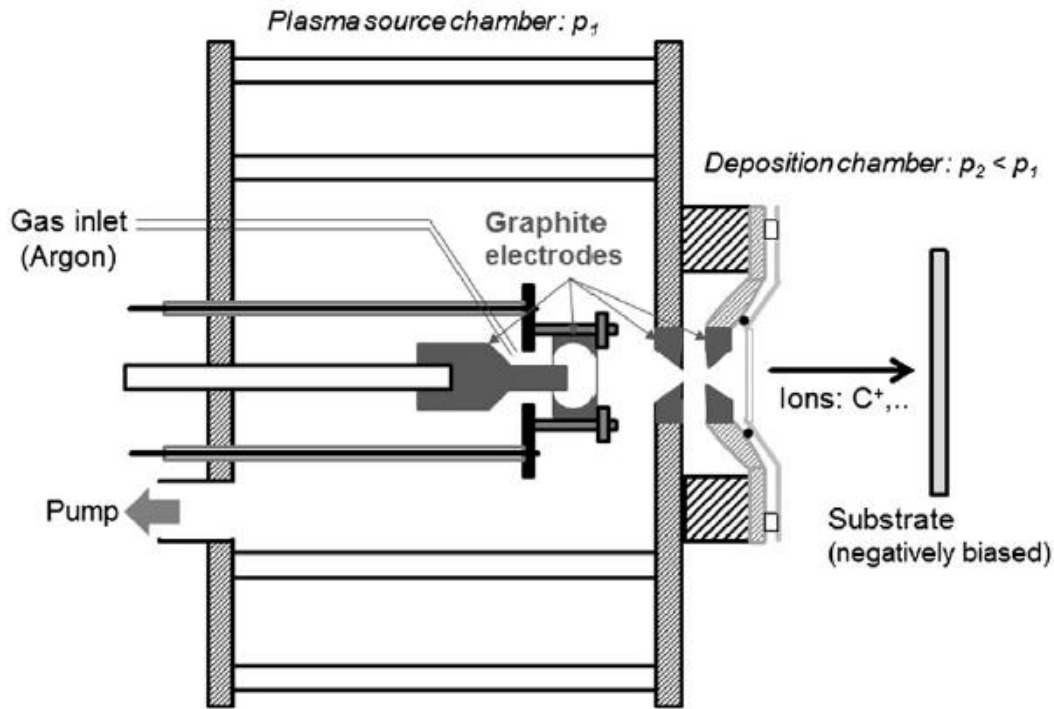
لایه‌های نازک آمورف کربنی سخت نخستین بار در مقاله ای توسط شملنمیر^۱ تحت عنوان اثر گاز استیلن یونیزه شده بر روی سطح آلیاژ تنگستن-کبالت در سال ۱۹۵۳ گزارش شدند. مهمترین مشاهده ای که او در این آزمایش داشت این بود که با تخلیه‌ی الکتریکی در یک گاز هیدروکربنی مانند استیلن لایه‌هایی از کربید تنگستن تولید می‌شوند. نتیجه‌ی مهم دیگری که او در این آزمایش به آن رسید این بود که آمورف‌های سیاه و بسیار سختی روی کاتد محفظه‌ی تخلیه‌ی الکتریکی و در شرایطی که جریان

^۱ Schmeltenmeier

تخلیه خیلی زیاد نباشد ایجاد می‌شود. در مقاله‌ی دیگری که توسط شملمنیر در سال ۱۹۵۶ ارائه شد وی این طور گزارش کرد که این فیلم‌ها با چند میکرون ضخامت ساختاری بی شکل دارند و همچنین تحت شرایط خاص ترکیبی از ساختار الماسی پیدا می‌کنند. او این ساختار را با استفاده از آنالیزهای XRD مشخص نمود. در سال ۱۹۵۵ کونینگ و هلوینگ^۱ با استفاده از تخلیه‌ی الکتریکی جریان مستقیم (DC) در گاز بنزن (C_6H_6)، فیلم‌هایی را بر روی آند لایه نشانی کردند. این فیلم‌ها زردرنگ بودند و چگالی کمی در حدود $1/4 \text{ g/cm}^3$ داشتند. اما اصطلاح کربن شبه الماسی نخستین بار در سال ۱۹۷۱ طی یک لایه نشانی به روش پرتوی یونی که توسط آیسنبرگ و چابوت^۲ انجام شد مورد استفاده قرار گرفت. این لایه نشانی به وسیله‌ی یک پرتوی یونی از کربن و آرگون و با استفاده از الکترودی گرافیتی و در دمای اتاق انجام شد (شکل ۱-۱۰). پرتوی یونی که شامل یون‌های کربن مثبت و آرگون است در محفظه‌ی تخلیه‌ی الکتریکی پخش شده و یون‌های کربن بر روی زیر لایه‌هایی که تحت بایاس منفی قرار گرفته اند لایه نشانی می‌شوند. انرژی یون‌های فرودی به وسیله‌ی بایاس منفی زیر لایه‌ها کنترل می‌گردد. این فیلم‌های لایه نشانی شده در مقابل خراش مقاوم، نارسانای الکتریکی، دارای عبوردهی اپتیکی مناسب و بسیار غیر واکنشی بودند. ساختار این فیلم‌ها نیز دارای قسمتی کریستالی با ثابت شبکه‌ای مانند الماس بود. همین دو نفر در سال ۱۹۷۳ گزارش کردند که استفاده از فیلم‌های کربن شبه الماسی در تیغه‌ها و ابزار برش باعث افزایش چشمگیر کارایی آن‌ها می‌شود. در واقع لایه نشانی این فیلم‌ها بر روی تیغه‌ها باعث کاهش ضریب اصطکاک آن‌ها می‌شود.

¹ König and Helwig

² Aisenberg and Chabot



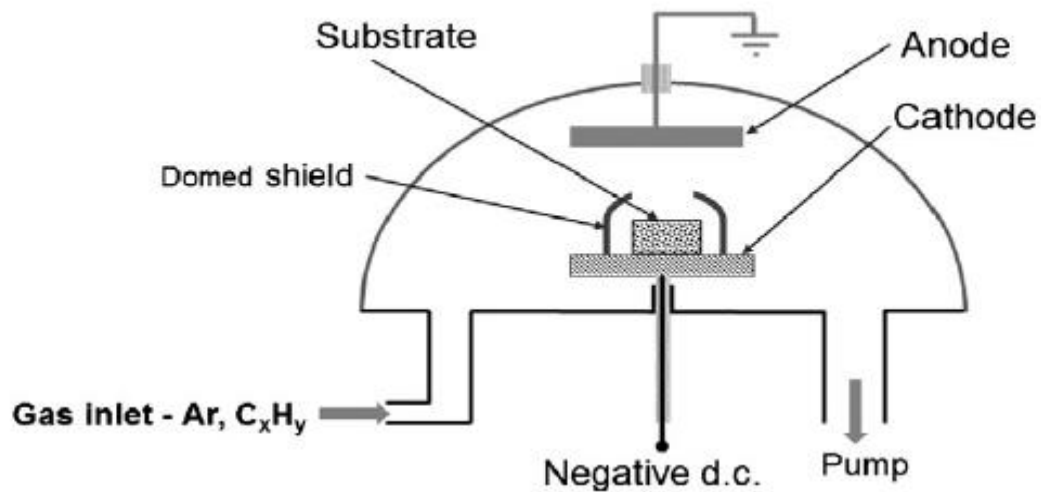
شکل ۱-۱۰: تصویری از دستگاه لایه نشانی پرتوی یونی [۱۰]

ویتمل و ویلیامسون^۱ فیلم‌های سخت و نارسانایی را با ضخامتی بیشتر از ۴ میکرومتر بر روی زیر لایه های فلزی مختلفی تولید نمودند. روشی که آنها برای تولید این نوع فیلم‌ها استفاده کردند مانند شملنمیر مبتنی بر استفاده از یک ولتاژ مستقیم اما استفاده از گازهای اتیلن (C_2H_4) و ۵٪ گاز آرگون بود (شکل ۱-۱۱). یکی دیگر از روش‌های لایه نشانی که از دهه ۱۹۸۰ به بعد رواج یافت استفاده از یک فرکانس رادیویی متناوب ۱۳/۵۶ MHz در لایه نشانی فیلم‌های نیمه رسانا و همچنین فیلم‌های کربنی بود. هولاند و اوپها^۲ به وسیله تخریب الکتریکی یک فرکانس رادیویی (۱۳/۵۶ MHz) در گاز بوتان (C_4H_{10}) فیلم‌هایی نارسانا و سخت را روی زیرلایه‌های دی الکتریک مانند شیشه لایه نشانی کردند (شکل ۱-۱۲). در اواخر دهه ۱۹۸۰ میلادی استفاده از گازهای هیدروکربنی در لایه نشانی این فیلم‌ها رواج یافت به گونه‌ای که فشار این گازها و همچنین ولتاژ بایاس زیر لایه‌ها به عنوان دو پارامتر و عامل مهم در لایه نشانی این نوع فیلم‌ها بکار گرفته می‌شد. فیلم‌های لایه نشانی شده چگالی در حدود gr/cm^3

¹ Whitmell and Williamson

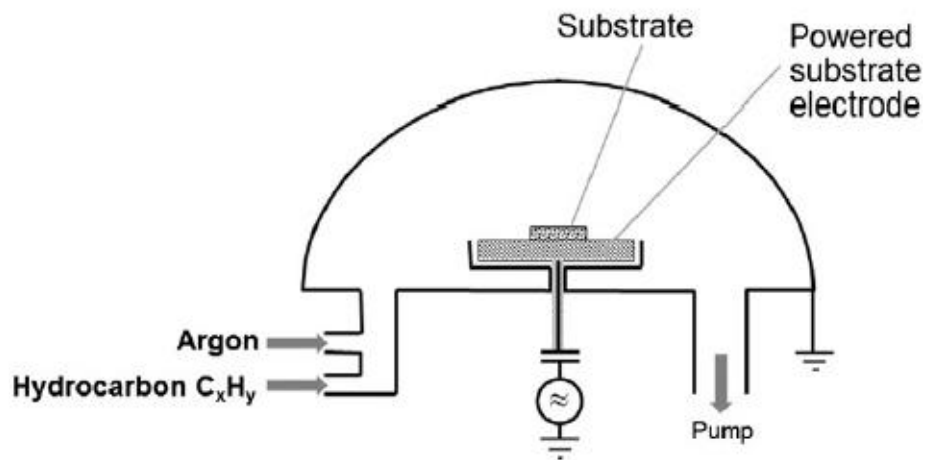
² Holland and Ojha

را دارا بودند و مشخص شده بود که این چگالی به طور خطی با جمله‌ی $V_B P^{-0.5}$ متناسب است.



شکل ۱-۱۱: تصویری از دستگاه لایه نشانی DC [۱۰]

همچنین لایه نشانی این نوع فیلم‌ها با ضریب شکست حدود ۲ بر روی زیر لایه‌هایی از جنس سیلیکون یا ژرمانیوم با ضریب شکست حدود ۴ می‌تواند به عنوان پوشش‌های ضد بازتاب و یا عبوردهنده‌ی مناسبی استفاده گردد [۱۰].



شکل ۱-۱۲: تصویری از یک دستگاه لایه نشانی RF [۱۰]

۱-۵ انواع روش‌های لایه نشانی

لایه نشانی فیلم‌های نازک اعم از رسانا، نیمه رسانا و یا نارسانا بسته به شرایط موجود و نوع کاربرد مورد نیاز به روش‌های گوناگونی انجام می‌گیرد. لایه نشانی این نوع فیلم‌ها به دو روش کلی تبخیر شیمیایی (CVD)^۱ و نیز تبخیر فیزیکی (PVD)^۲ انجام می‌شود. در ادامه به معرفی چند روش مهم لایه نشانی این نوع فیلم‌ها که برای لایه نشانی فیلم‌های DLC نیز بکار گرفته می‌شوند می‌پردازیم.

۱-۵-۱ لایه نشانی پرتوی یونی (IBD)^۳

یک منبع پرتوی یونی یک منبع تولید پلاسما است که با مجموعه‌ای از توری‌ها برای انتقال یون‌ها ایجاد شده است. منبع یونی مورد نیاز شامل سه قسمت مهم است که دنبال یکدیگر قرار گرفته‌اند. محفظه‌ی تخلیه‌ی الکتریکی، توری‌ها و خنثی کننده. یون‌ها در محفظه به وسیله‌ی ایجاد یک میدان الکتریکی RF و در حضور یک گاز مانند گاز آرگون ایجاد می‌شوند. گاز در یک محفظه‌ی از جنس کوارتز یا آلومینا با یک آنتن سیم پیچ که به منبع RF متصل است تغذیه می‌شود. میدان الکتریکی RF باعث می‌شود که الکترون‌ها شتاب گرفته و در برخورد با اتم‌های آرگون گاز را به یون و الکترون تبدیل کند. این فرایند به عنوان جفتیدگی القایی^۴ شناخته می‌شود. در نتیجه گاز شکسته شده و به پلاسما تبدیل می‌شود. اثر این ولتاژ بر یون‌ها باعث ایجاد یک نیروی الکترواستاتیک می‌گردد که می‌تواند انرژی یون‌ها را بالا ببرد. اگرچه این اثر باعث می‌شود که منبع یونی به سادگی شروع به کار کند، اما این یون‌ها ممکن است به طریق کندوپاش منبع تولید یون را فرسوده کنند، به آن آسیب بزنند و در فرایند لایه نشانی تولید ناخالصی کنند. این به عنوان جفتیدگی خازنی^۵ شناخته می‌شود. در منبع یونی، جفتیدگی خازنی توسط قرار دادن یک حفاظ الکترواستاتیک در داخل محفظه‌ی کوارتزی متوقف می‌شود به گونه‌ای که فقط

¹ Chemical vapor deposition

² Physical vapor deposition

³ Ion beam deposition

⁴ inductively coupling

⁵ capacitive coupling

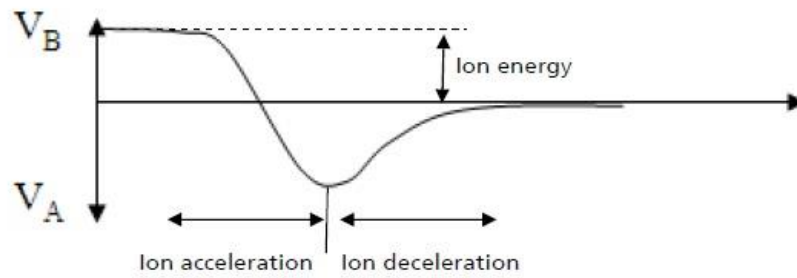
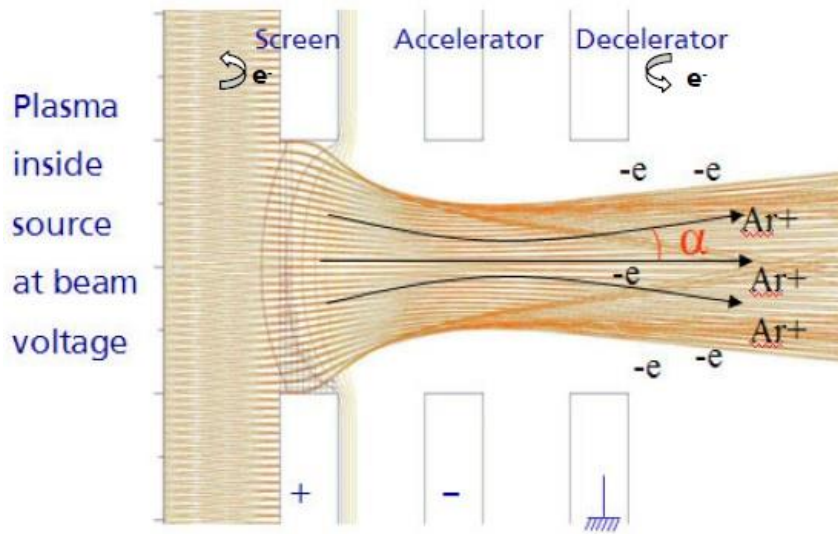
مولفه‌ی مغناطیسی منبع RF انرژی را به اتم‌های گاز منتقل می‌کند. حفاظ الکترواستاتیکی مانع ورود میدان الکتریکی که در طول آنتن سیم پیچ RF ایجاد شده است به داخل منبع یون می‌شود [۱۱]. نقش توری‌ها برای شتاب دادن یون‌ها با یک سرعت بالا لازم است. معمولاً در روش پرتوی یونی از دو یا سه توری استفاده می‌شود. توری‌ها از تعداد زیادی روزنه تشکیل شده‌اند. جدایی توری‌ها و انحنای توری‌ها نیز بسته به کاربرد مناسب متفاوت هستند، برای مثال به اندازه‌ی تارگت و یا نرخ لایه نشانی بستگی دارند. منبع مولد یک پلاسمای سرد با یون‌های کم انرژی (کمتر از ۱eV) را تولید می‌کند که این یون‌ها می‌توانند بدون اینکه آسیبی به توری‌ها برسانند از آن‌ها عبور کنند. در یک سیستم با سه توری، یک اختلاف پتانسیل موثر در بین توری‌ها نیروی لازم برای حرکت یون‌ها را فراهم می‌کند. توری داخلی که با پلازما مرتبط است اسکرین‌گرید^۱ نامیده می‌شود. این توری یکی از توری‌هایی است که ولتاژ یا انرژی شتاب دهنده‌ی یون‌ها را تنظیم می‌نماید. این توری را به یک پتانسیل مثبت (نسبت به زمین) متصل می‌کنند. توری دومی را نیز به یک پتانسیل منفی متصل می‌کنند که این اختلاف پتانسیل باعث حرکت یون‌ها می‌شود. توری سوم یک توری کاهش دهنده‌ی سرعت است که معمولاً آن را به زمین متصل می‌کنند (شکل ۱-۱۳). این توری باعث می‌شود که پرتوی یونی واگرا نشود و الکترون‌ها و همچنین مواد کندوپاش شده به داخل توری‌های شتاب دهنده و منبع مولد پلازما وارد نشوند. همچنین باعث می‌شود که توری‌ها تمیزتر بمانند و زمان لازم برای تمیز کردن آن‌ها را نیز افزایش می‌دهد. انرژی نهایی یون‌ها با ولتاژی که اعمال کرده ایم متناسب است. سومین عنصر سازنده‌ی منبع مولد یون یک خنثی کننده است که با تولید الکترون باعث تعادل و خنثی شدن بار یون‌ها می‌گردد. این عمل باعث جلوگیری از باردار شدن تارگت و همچنین زیرلایه‌ها می‌شود. معمولاً تعداد بیشتری الکترون از خنثی کننده به نسبت یون‌های تولیدی از منبع تولید می‌شوند اما بسیاری از این الکترون‌ها در عمل ترکیب شدن و خنثی سازی یون‌ها شرکت ندارند. واگرایی پرتوی یونی از منبع به عوامل زیادی بستگی دارد. عواملی نظیر ولتاژ پرتوی یونی (V_B)، جریان پرتوی یونی (I_B)، ولتاژ شتابدهنده (V_A)، جریان خنثی کننده

¹ screen grid

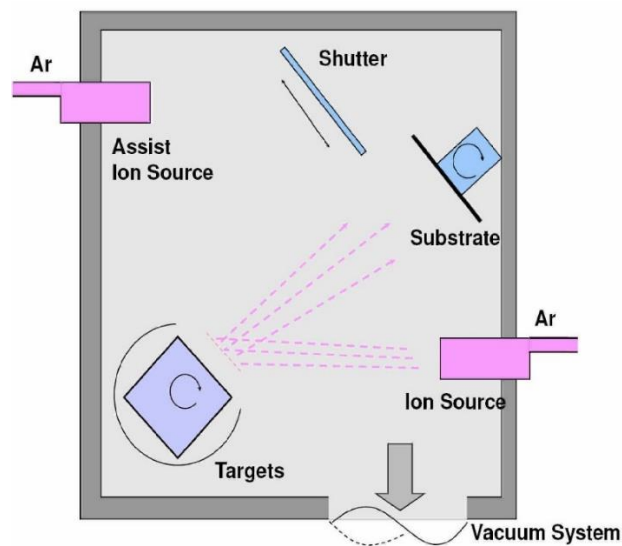
(IN)، و همچنین فشار گاز. به همین دلیل برای کاهش واگرایی پرتو فشار گاز را به حداقل می‌رسانیم. در این روش لایه نشانی زیرلایه‌ها قابلیت این را دارند که در حین لایه نشانی بچرخند همچنین زیرلایه‌ها نسبت به شار پرتوی یونی مایل و زاویه دار هستند. نرخ لایه نشانی در این روش کمتر از تبخیر است اما در این روش نرخ لایه نشانی و همچنین زمان و انرژی ذرات فرودی قابل کنترل است. با استفاده از روش پرتوی یونی می‌توان انواع اکسیدها مانند Al_2O_3 و SiO_2 و همچنین انواع نیتrideها مانند Si_3N_4 را لایه نشانی کرد. در شکل ۱-۱۴ نمایی از دستگاه پرتوی یونی نشان داده شده است [۱۲، ۱۳].

مهمترین ویژگی‌های لایه نشانی به این روش عبارتند از:

- کیفیت بالای فیلم
- فیلم‌های چگال و صاف
- پراکندگی پایین ذرات
- قابلیت تکرارپذیری بالای هر آزمایش
- یکنواختی بسیار خوب
- کاربردهای بسیار وسیع



شکل ۱-۱۳: ساختار سه توری مولد پرتوی یونی [۱۴]



شکل ۱-۱۴: یک دستگاه پرتوی یونی

۱-۵-۲ لایه نشانی به روش قوس الکتریکی کاتدی^۱

لایه نشانی قوس کاتدی یک فرایند برای تولید فیلم‌های نازک با کیفیت بالا در مقیاس صنعتی است. این روش بر اساس ولتاژ پایین و قوس الکتریکی کاتدی جریان بالا که یک پلاسمای چگال با یونیزاسیون بالا تولید می‌کند انجام می‌گیرد. لایه نشانی قوس کاتدی با یک پلاسمای لایه نشانی کننده ی 100% یونیزه شده با یون‌های پر انرژی صورت می‌گیرد. این روش با استفاده از ولتاژ DC و یا مد پالسی انجام می‌شود. در این کار منبع تغذیه ولتاژی را ایجاد می‌کند که بین آند و کاتد یک تخلیه قوس الکتریکی به وجود می‌آورد. جریان قوس الکتریکی در روی سطح کوچکی از کاتد متمرکز می‌شود به طوری که یک چگالی جریان بالا در حدود 10^{12} A/m^2 ایجاد می‌کند که معمولاً به آن نقطه‌ی کاتدی^۲ گفته می‌شود. این چگالی جریان بالا به یک چگالی توان بالا در حدود 10^{13} W/m^2 منجر می‌شود که یک تغییر فاز موضعی از تارگت جامد به پلاسمای لایه نشانی کاملاً یونیزه شده تولید می‌کند. پلاسما به سرعت در محیط خلا پخش می‌شود و به سمت زیرلایه حرکت می‌کند [۱۵، ۱۶]. در زمان لایه نشانی روی زیرلایه، پلاسما حاوی یون‌هایی با انرژی جنبشی در حدود 20 eV برای عناصر سبکتر و 200 eV برای عناصر سنگینتر است. این موضوع را می‌توان با کندوپاش مقایسه کرد که در آن انرژی نهایتاً چند eV است. این روش به دلیل انرژی بالای یون‌ها دارای مزیت‌های گوناگونی نسبت به سایر روش‌ها است. برای مثال فیلم‌های لایه نشانی شده با روش قوس الکتریکی کاتدی، چگال و دارای چسبندگی زیادی بر روی زیرلایه هستند. اتم‌های لایه نشانی شده بر روی سطح زیرلایه نفوذ می‌کنند و باعث می‌شوند که فیلم با چسبندگی بالایی به زیر لایه‌ها بچسبد. از طرفی به دلیل انرژی بالای ذرات در فرایند لایه نشانی، برای تولید فیلم‌های با چگالی بالا نیازی به گرما دادن به سطح زیرلایه‌ها نیست [۱۷]. همچنین به وسیله‌ی بایاس کردن زیرلایه‌ها نیز می‌توان نرخ لایه نشانی و انرژی یون‌های فرودی را کنترل کرد. از روش قوس الکتریکی کاتدی برای لایه نشانی بسیاری از نیتrideها و برخی از اکسیدها استفاده می‌شود

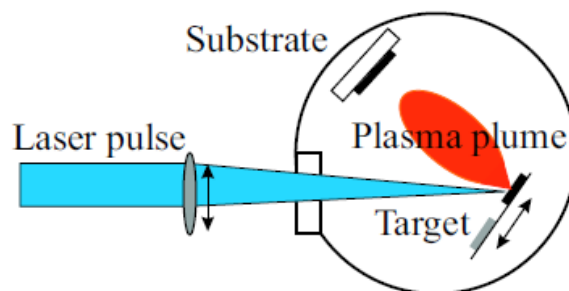
¹ Cathodic arc

² Cathode spot

و فیلم‌های لایه نشانی شده به این روش کاربردهای زیادی برای مثال در پوشش‌های مقاوم به خوردگی بر روی ابزار برش و ابزار تزئینی دارند [۱۸].

۱-۵-۳ لایه نشانی لیزر پالسی (PLD)^۱

تکنیک لایه نشانی لیزر پالسی، برای لایه نشانی فیلم‌های نازک بیش از یک دهه است که مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش براساس استفاده از یک لیزر پالسی پر توان مانند Nd:YAG با توانی مثلا در حدود 10^8 W/cm^2 است. لیزر پس از تابیدن به سطح تارگت باعث از هم گسیختن آن، تبخیر و یونیزه شدن آن می‌شود. این کندگی در سطح تارگت تولید یک توده پلاسمای گذرای بسیار درخشان را می‌کند که به سرعت از سطح تارگت منتقل می‌شود. ماده‌ی کنده شده بر روی سطح زیر لایه، لایه نشانی می‌گردد. شکل ۱-۱۵ یک نمای شماتیک را از این دستگاه نشان می‌دهد. معمولا تارگت تحت زاویه‌ی ۴۵ درجه قرار داده می‌شود و زیرلایه نیز به موازات آن و در فاصله‌ی ۱۰-۲ سانتی متر قرار داده می‌شوند. در روش PLD بسیاری از پارامترهای آزمایشگاهی که اثر زیادی در ویژگی‌های ماده دارند قابل تغییر هستند. پارامترهایی مربوط به لیزر نظیر طول موج، زمان پالس‌ها، تعداد تکرار پالس قابل تغییر هستند. از طرفی فاصله‌ی تارگت تا زیرلایه، دمای زیرلایه، گاز مورد استفاده و نیز فشار گاز هم می‌تواند به عنوان پارامترهای مهمی در نظر گرفته شوند.



شکل ۱-۱۵: یک تصویر شماتیک از دستگاه PLD

^۱ Pulsed laser deposition

لایه نشانی لیزر پالسی یک روش چند کاره برای تولید و رشد فیلم‌های نازک است. به دلیل این که منبع انرژی در بیرون از محفظه‌ی لایه نشانی قرار دارد، و در این روش می‌توان بخوبی از خلا بسیار بالا و انواع مختلف گازها در خلا استفاده نمود. به همراه انتقال استوکیومتری بین تارگت و زیرلایه امکان لایه نشانی انواع مواد مانند ابر رساناهای دمای بالا، اکسیدها، نیتrideها، کربیدها، نیمه رساناها، فلزات و همچنین پلیمرها وجود دارد. از طرفی نرخ لایه نشانی در این روش بالا و در حدود 10 nm/s است. و همچنین چون منبع تولید لیزر در بیرون محفظه قرار دارد این روش یک روش تمیز برای تولید فیلم‌های خالص است [۱۹، ۲۰].

۱-۵-۴ لایه نشانی به روش کندوپاش^۱

روش کندوپاش یکی از روش‌های بسیار مهم و کارا در لایه نشانی فیلم‌های نازک است. از این روش در لایه نشانی انواع رساناها مانند مس و تیتانیوم و انواع نیمه رساناها مانند اکسیدها و نیتrideها و نیز فیلم‌های کربنی استفاده می‌شود. اساس کار روش کندوپاش لایه نشانی به کمک پلاسما است. فشار کاری مورد نیاز در این روش بسته به نوع آزمایش و کاربرد می‌تواند در حدود $1-100 \text{ mtorr}$ تغییر کند. برای تولید پلاسما از یک گاز که معمولاً شامل گازهای نجیب مانند آرگون است استفاده می‌گردد. دلیل استفاده از گازهای نجیب برای تولید پلاسما این است که گازهای نجیب در گروه آخر جدول تناوبی قرار دارند و الکترون‌های لایه‌ی آخر در فاصله‌ی زیادی نسبت به هسته قرار گرفته‌اند و با توجه به اثر همپوشانی الکترون‌های داخلی بر روی هسته راحت‌تر می‌توانند از اتم جدا شده و تولید پلاسما نمایند. هنگامی که در محفظه‌ی تخلیه‌ی الکتریکی یک میدان خارجی بین آند و کاتد برقرار می‌شود الکترون‌های آزاد در محیط با اتم آرگون برخورد می‌کنند و اگر انرژی لازم را برای جداکردن الکترون از اتم آرگون داشته باشند حاصل یون آرگون مثبت و دو الکترون می‌شود (رابطه‌ی ۱-۱).

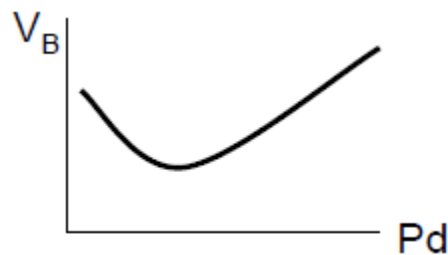
^۱ sputtering



ولتاژ شکست یک گاز تابعی از فشار گاز (p) و فاصله‌ی میان آند تا کاتد (d) است که مطابق رابطه‌ی ۱-۲ به یکدیگر مربوط می‌گردند.

$$V_B = \frac{APd}{\ln(Pd) + B} \quad (2-1)$$

در این رابطه A و B ضرایب ثابت و مربوط به نوع هر گاز متفاوت است. شکل زیر نمودار رابطه‌ی پاشن را نشان می‌دهد (شکل ۱-۱۶).

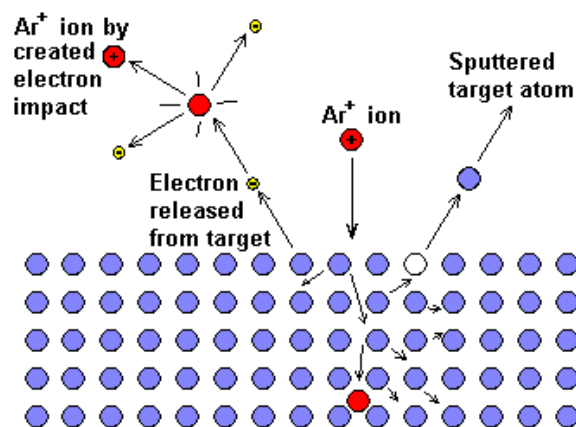


شکل ۱-۱۶: نمودار رابطه‌ی پاشن برای شکستگی گاز

برای تولید یک پلاسمای پایدار نیاز به یک فشار بهینه است. زیرا اگر فشار بسیار پایین باشد برخوردهای کافی بین الکترون‌ها و اتم‌ها برای تولید پلازما صورت نمی‌گیرد. از طرفی در فشار بالا نیز به دلیل زیاد بودن برخوردها الکترون‌ها انرژی لازم را برای فرایند یونیزاسیون بدست نمی‌آورند. پس از تولید پلازما، یون‌ها سطح تارگت را که بر روی کاتد قرار گرفته است شروع به بمباران می‌کنند. در بمباران تارگت به وسیله‌ی یون‌ها بسته به انرژی یون چند حالت ممکن است اتفاق بیفتد.

- $E < 5\text{eV}$: بازتاب یون یا تجمع یونی
- $5\text{eV} < E < 10\text{eV}$: سطح اندکی خورده می‌شود
- $10\text{eV} < E < 3\text{KeV}$: کندوپاش
- $E > 3\text{KeV}$: کاشت یونی

پس از بمباران شدن تارگت توسط یون‌ها، اتم‌ها از سطح آن جدا شده و با سازوکار مناسب بر روی زیرلایه‌ها می‌نشینند (شکل ۱-۱۷). کندوپاش بسته به نوع نیاز و نوع تارگت به روش‌های مختلفی شامل کندوپاش جریان مستقیم (DC)، کندوپاش با ولتاژ متناوب (RF) و کندوپاش مغناطیسی تقسیم می‌شود که در ادامه به طور مختصر به بررسی هریک از این روش‌ها می‌پردازیم [۲۱، ۲۲].



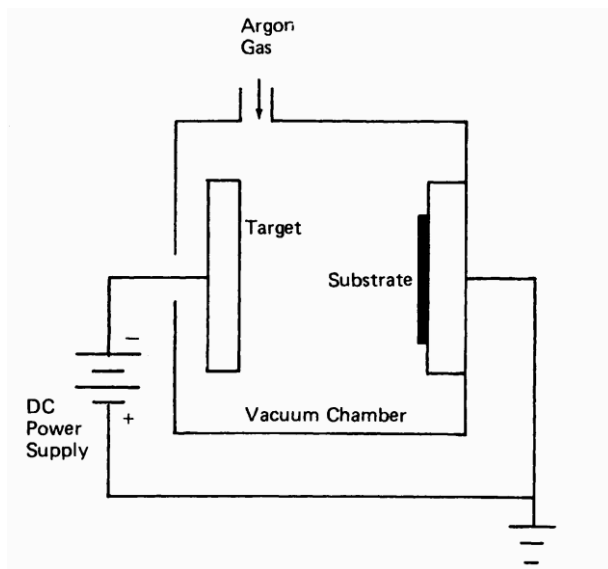
شکل ۱-۱۷: بمباران تارگت توسط یون آرگون

۱-۴-۵-۱ کندوپاش جریان مستقیم^۱

اکثراً برای لایه نشانی فلزات و فیلم‌های رسانا استفاده می‌شود. در این روش تارگت رسانا بر روی کاتد قرار گرفته و با بمباران تارگت اتم‌های سطح آن جدا شده و بر روی زیر لایه نشانی می‌شوند. ولتاژ مورد نیاز در این روش ولتاژ مستقیم است (شکل ۱-۱۸). استفاده از کندوپاش جریان مستقیم به دلیل ارزانی و کیفیت بالای فیلم‌ها در صنعت کاربرد زیادی دارد اما مشکلاتی هم نظیر نرخ پایین لایه نشانی و مدت زمان زیاد لایه نشانی را نیز دارد [۲۳]. اما مهمترین اشکال استفاده از این روش در لایه نشانی فیلم‌های نیمه رسانا یا نارسانا است [۲۴]. اگر تارگت مورد استفاده یک تارگت نارسانا باشد آن گاه برای ایجاد جریان در سطح کاتد و تولید پلاسما به یک ولتاژ بسیار زیاد نیاز است از طرفی پس از زمان اندکی

^۱ DC sputtering

لایه نشانی یون‌ها بر روی سطح تارگت جمع شده (به این دلیل که یون‌ها پس از برخورد با تارگت نارسانا نمی‌توانند از آن الکترون دریافت کنند و خنثی شوند) و باعث می‌شود که پتانسیل سطح موثر کاتد رفته رفته کاهش پیدا کند. به همین دلیل برای لایه نشانی فیلم‌های نارسانا از روش جایگزین (کندوپاش RF) استفاده می‌شود [۲۵].



شکل ۱-۱۸: نمایی از دستگاه کندوپاش جریان مستقیم

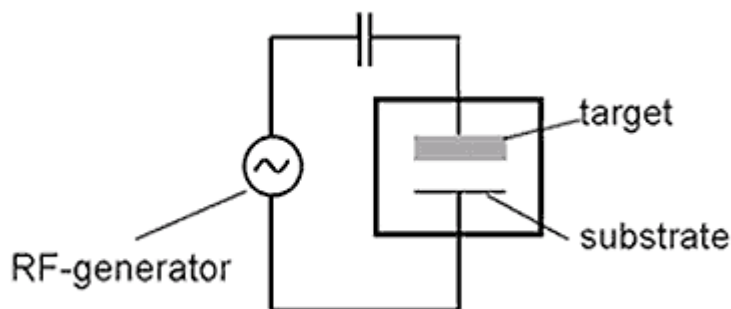
۱-۴-۵-۲ کندوپاش فرکانس رادیویی^۱

این تکنیک برای لایه نشانی بسیاری از فیلم‌های نیمه رسانا یا نارسانا استفاده می‌شود. در این روش یک ولتاژ متناوب با فرکانس $13/56 \text{ MHz}$ به کار گرفته می‌شود. در سیکل مثبت کاتد، الکترون‌ها بر روی کاتد جمع می‌شوند و ایجاد یک پتانسیل منفی می‌کنند. پس از تغییر سیکل و منفی شدن آن یون‌ها به دلیل سنگین بودن قادر به پاسخ در برابر تغییر سیکل نیستند و بر خلاف الکترون‌ها نمی‌توانند به سهولت در پلازما حرکت کنند. در نتیجه روی سطح کاتد یک بایاس منفی خود القا^۲ ایجاد می‌گردد که نتیجه‌ی آن بمباران تارگت توسط یون‌ها است [۲۶]. مزیت این روش نسبت به DC این است که

¹ RF sputtering

² Negative self-bias

می‌تواند در فشار کمتری تولید پلاسما و لایه نشانی انجام شود (۰/۵-۱۰ mtorr). اما ایجاد یک ولتاژ متناوب با فرکانس رادیویی به سادگی امکان پذیر نیست از طرفی هزینه بر است و شامل مدارهای اضافی برای تطبیق امپدانس می‌شود. شکل ۱-۱۹ نمای شماتیک از دستگاه RF را نشان می‌دهد [۲۷].



شکل ۱-۱۹: دستگاه کندوپاش RF

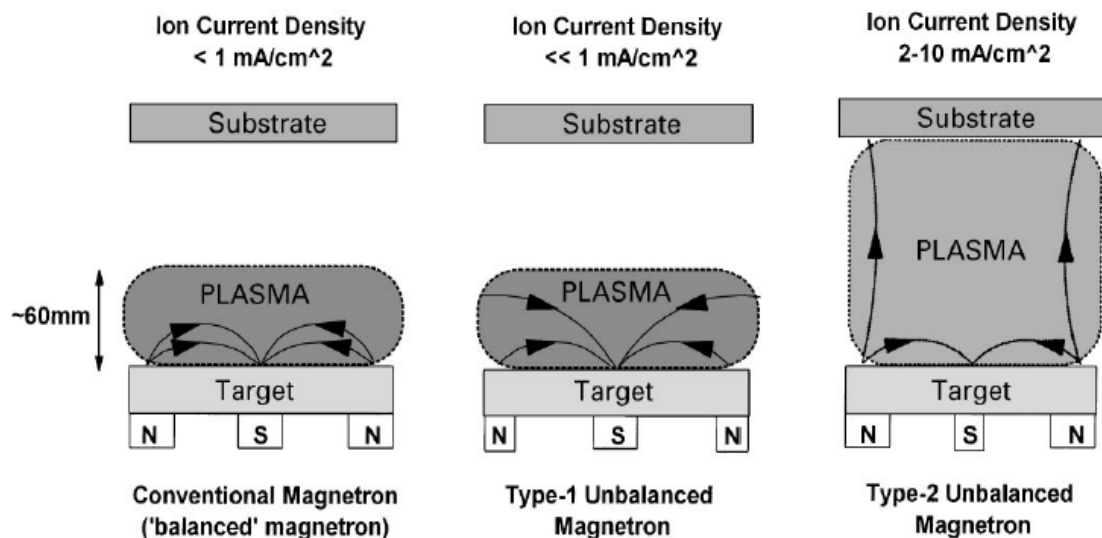
۱-۵-۴-۳ کندوپاش مغناطیسی^۱

هنگامی که تارگت توسط یون‌ها بمباران می‌گردد، الکترون‌هایی نیز از سطح تارگت جدا می‌شوند که به آن‌ها الکترون‌های ثانویه^۲ می‌گویند. وجود این الکترون‌ها در سطح تارگت برای پایداری و متمرکز بودن پلاسما لازم است. به همین جهت در زیر تارگت از یک آهنربا برای ایجاد میدان مغناطیسی استفاده می‌شود که به این روش کندوپاش مغناطیسی می‌گویند. آهنربا به گونه ای قرار می‌گیرد که یک قطب آن در محور مرکزی تارگت و قطب‌های دیگر آن در اطراف تارگت قرار می‌گیرند. الکترون‌ها در این میدان مغناطیسی به دام می‌افتند و بر روی خطوط میدان شروع به حرکت نوسانی می‌کنند [۲۸]. به دام افتادن الکترون‌ها باعث می‌شود که برخورد‌های بیشتری در این ناحیه رخ دهد و در محل تارگت فرایند یونیزاسیون بیشتر شده و چگالی پلاسما و در نتیجه بمباران تارگت افزایش می‌یابد. این امر باعث افزایش نرخ لایه نشانی بر روی زیرلایه می‌شود. از طرفی با افزایش فرایند یونش، ولتاژ شکستگی گاز و

^۱ Magnetron sputtering

^۲ Secondary electron

همچنین فشار مورد نیاز برای تولید پلاسما کاهش می‌یابد. در روش کندوپاش مغناطیسی اگر قدرت میدان آهنربای مرکزی با دو آهنربای کناری یکسان باشد در نتیجه خطوط میدان در بین آن‌ها بسته و همگن است [۲۹]. به این پیکربندی، پیکربندی مغناطیسی تعادلی^۱ گفته می‌شود. در این حالت ناحیه‌ی چگال پلاسما در فاصله‌ای حدود ۶۰ mm از سطح تارگت قرار دارد. فیلم‌هایی که در این ناحیه رشد می‌یابند تحت تاثیر بمباران یونی همزمان قرار می‌گیرند که می‌تواند به طور واضح در ساختار و ویژگی‌های فیلم‌ها مانند چگالی و سختی اثر بگذارد. زیرلایه‌هایی که در بیرون این ناحیه و در ناحیه‌ی پلاسمای کم چگال قرار می‌گیرند تحت جریان یونی کمتر از 1 mA/cm^2 قرار می‌گیرند که این جریان آن چنان تاثیری بر ساختار فیلم‌ها ندارد. برای حل این مشکل از پیکربندی مغناطیسی غیر متعادل^۲ استفاده می‌شود که در آن قدرت میدان در آهنرباهای کناری و مرکزی متفاوت است. در این روش زیرلایه‌ها تحت تاثیر یک جریان یونی قرار می‌گیرند. شکل ۱-۲۰ نمایی از یک پیکربندی تعادلی و غیر تعادلی کندوپاش مغناطیسی را نشان می‌دهد [۳۰].



شکل ۱-۲۰: نمایی از کندوپاش مغناطیسی تعادلی و غیر تعادلی (در نوع اول میدان مرکزی قویتر و در نوع دوم میدان‌های کناری قویتراند) [۳۰]

¹ Balanced magnetron

² Unbalanced magnetron

۱-۵-۵ روش رسوب بخار شیمیایی به کمک پلاسما (PECVD)^۱

با استفاده از روش PECVD می‌توان انواع فیلم‌ها مانند آمورف‌های کربنی و یا اکسیدها و نیتrideها را لایه نشانی کرد. در این روش نیز مانند روش تبخیر شیمیایی (CVD)، لایه نشانی از یک فاز گازی شکل بر روی زیرلایه‌ها صورت می‌گیرد. اما در روش CVD برای لایه نشانی نیاز به گرما دادن به گاز و زیرلایه‌ها تا چند صد درجه‌ی سانتیگراد است. برای مثال برای لایه نشانی تیتانیوم نیتريد (TiN) بر روی زیرلایه‌ای فولادی دمایی بیشتر از دمای ذوب آن نیاز است که این خود بزرگترین اشکال در روش تبخیر شیمیایی است. اما در روش PECVD برای لایه نشانی از تخلیه‌ی الکتریکی و تولید پلاسما برای ایجاد رادیکال‌های آزاد استفاده می‌شود. در این روش با استفاده از یک منبع تغذیه با فرکانس رادیویی ۱۳/۵۶ MHz فرایند ایجاد و تولید پلاسما صورت می‌گیرد. پس از آن ذرات پلاسما با سازوکار مناسب بر روی زیرلایه‌ها لایه نشانی می‌شوند. خود روش PECVD به دو صورت انجام می‌گیرد. در روش اول که پلاسمای جفت شده‌ی ظرفیتی^۲ نامیده می‌شود از دو الکترود مثبت و منفی در جهت ایجاد اختلاف پتانسیل و تولید پلاسما ایجاد می‌شود. در روش دوم که پلاسمای جفت شده‌ی القایی^۳ نامیده می‌شود از یک سیم پیچ در اطراف لوله‌ی حاوی گاز واکنش دهنده استفاده می‌شود. هنگامی که جریان متناوب از طریق سیم پیچ عبور می‌کند یک میدان الکتریکی متناوب در داخل لوله القا شده که باعث شکسته شدن گاز می‌شود [۲۶]. روش لایه نشانی رسوب دهی بخار شیمیایی به کمک پلاسما یک روش بسیار مهم و چندکاره در صنعت است. این روش در مقایسه با سایر روش‌ها دارای نرخ لایه نشانی بالاتر به همراه حفظ کیفیت فیلم‌هاست. از عمده ترین کاربردهای دستگاه رسوب دهی بخار شیمیایی به کمک پلاسما می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۲].

- بهبود خواص مقاومت در برابر خوردگی قطعه

¹ Plasma enhanced chemical vapor deposition

² Capacitively Coupled Plasma

³ Inductively Coupled plasma

- کاهش درجه حرارت فرایند نسبت به سایر روش‌های مرسوم
- پر کردن خوب منافذ و شکاف‌ها
- چسبندگی بسیار خوب مواد بر روی زیرلایه‌ها
- چگالی بالای فیلم‌ها

۶-۱ پلاسما

گفته می‌شود که در حدود ۹۹ درصد ماده‌ی موجود در جهان از پلاسما تشکیل یافته است. قسمت عمده‌ی از جو اجرام آسمانی، نیبولاهای گازی شکل، و بیشتر هیدروژن بین ستاره‌ای از پلاسما تشکیل شده است. پلاسما یک گاز یونیزه شده است که رفتار جمعی از خود نشان می‌دهد. در پلاسما نیروهای الکترومغناطیسی بلند برد بر نیروهای بین اتمی و بین مولکولی غالب است. در یک پلاسمای ایده آل چگالی یون و الکترون بطور تقریبی با هم برابر هستند ($n_i = n_e$) که به آن شرط شبه خنثی ای گفته می‌شود [۳۱].

۱-۶-۱ معادله‌ی ساها

این معادله مقدار یونیزاسیون انتظاری یک گاز در تعادل گرمایی را مشخص می‌کند.

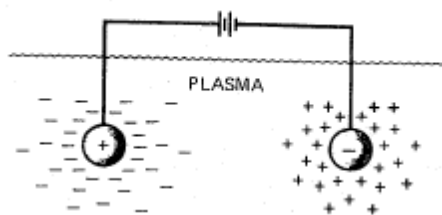
$$\frac{n_i}{n_n} = 2.4 \times 10^{21} \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-U_i/KT} \quad (۳-۱)$$

در این رابطه n_i و n_n به ترتیب چگالی اتم‌های یونیزه شده و اتم‌های خنثی (تعداد بر متر مکعب)، T دمای گاز بر حسب کلوین، K ثابت بولتزمن و U_i انرژی یونش گاز است. در دمای اتاق برای هوای معمولی می‌توان چگالی مولکول‌ها را در حدود $3 \times 10^{25} m^{-3}$ ، دما $300^\circ K$ و انرژی یونش را eV در ۱۴/۵ (برای گاز نیتروژن) در نظر گرفت. کسر یونیزاسیون چیزی در حدود $10^{-122} = \frac{n_i}{n_n}$ است. زمانی

که دما افزایش می‌یابد، درجه‌ی یونیزاسیون مادامی‌که U_i چند برابر KT است کم باقی می‌ماند. سپس $\frac{n_i}{n_n}$ بطور ناگهانی افزایش می‌یابد و گاز به پلاسما تبدیل می‌شود. در واقع دلیل اینکه در اجرام آسمانی پلاسما وجود دارد همین دمای بسیار زیاد این اجرام است.

۱-۶-۲ حفاظ دبای^۱

اگر مانند شکل دو کره‌ی رسانا را که به دو قطب یک پتانسیل خارجی متصل است وارد پلاسما کنیم یون‌ها به سمت کره‌ی منفی و الکترون‌ها به سمت کره‌ی منفی حرکت می‌کنند. در این حالت اگر پلاسما سرد باشد و فاقد حرکت‌های گرمایی باشد، بار زیادی در ابر اطراف کره‌ها قرار می‌گیرد که این بار پتانسیل موثر خارجی را تضعیف می‌کند به طوری که میدان به داخل پلاسما نفوذ نمی‌کند. به این اثر حفاظ دبای گفته می‌شود. از طرف دیگر اگر دما محدود و معین باشد ذراتی که در لبه‌ی ابر، یعنی جایی که میدان ضعیف است قرار دارند، انرژی حرارتی لازم برای فرار از چاه پتانسیل الکترواستاتیکی پیدا می‌کنند. در این صورت لبه‌ی ابر در شعاعی واقع می‌شود که در آن انرژی پتانسیل تقریباً برابر انرژی حرارتی KT ذرات است، و حفاظ کامل نیست. پتانسیل‌هایی در حدود KT/e می‌توانند به داخل پلاسما نشت کرده و سبب ایجاد میدان‌های الکتریکی معینی در آن شوند.



شکل ۱-۲۱: کره‌ی دبای [۳۲]

^۱ Debye shielding

۱-۲-۶-۱ طول دبای^۱

با استفاده از حل معادله‌ی پواسن یک بعدی و فرض این که جرم الکترون‌ها در مقایسه با جرم یون‌ها بسیار کوچک است می‌توان کاهش پتانسیل $\phi(x)$ را به صورت فرمول زیر نوشت.

$$\phi(x) = \phi_0 \exp\left(-\frac{|x|}{\lambda_D}\right) \quad (۴-۱)$$

در این رابطه λ_D که طول دبای نامیده می‌شود اندازه‌ای از فاصله‌ی حفاظ یا ضخامت غلاف را می‌دهد که در آن پتانسیل به $1/e$ پتانسیل سطح می‌رسد.

۱-۳-۶-۱ پارامترهای پلاسما

پلاسما دارای پارامترهای مهمی است که در ادامه به بررسی آن‌ها می‌پردازیم.

(۱) با استفاده از معادله‌ی بالا می‌توان تعداد ذرات موجود در یک کره‌ی دبای یعنی N_D را محاسبه کنیم.

$$N_D = n \frac{4}{3} \pi \lambda^3 = 1.38 \times 10^6 T^{3/2} n^{1/2} \quad (۵-۱)$$

بدیهی است که اگر در ناحیه‌ی غلاف تعداد اندکی ذره وجود داشته باشد حفاظ دبای از لحاظ آماری

مفهومی غیر معتبر خواهد بود پس باید داشته باشیم: $N_D \gg 1$

(۲) ملاک پلاسما بودن یک گاز یونیزه این است که چگالی آن به قدری بزرگ باشد که λ_D در مقایسه

با ابعاد دستگاه L بسیار کوچک باشد

(۳) سومین شرط مهم برای وجود پلاسما این است که در واقع حرکت ذرات بیشتر توسط نیروهای الکترو

مغناطیسی کنترل شود تا نیروهای هیدرودینامیکی معمولی. این بدین معنی است که زمان متوسط بین

^۱ Debye length

برخوردهای انجام شده بین ذرات (τ)، باید در مقایسه با فرکانس نوسانات نوعی پلاسما (ω) بیشتر باشد،

یعنی داشته باشیم $[\text{۳۲}] : \omega\tau > 1$.

۲- فصل دوم

مروری بر برخی از روش‌های مشخصه‌یابی کربن‌های شبه‌الماسی

۱-۲ مقدمه

بررسی خواص و ساختار مواد لایه نشانی شده بر روی سطوح، گام مهمی در جهت شناسایی و استفاده‌ی صنعتی بیشتر از مواد و لایه‌های نازک است. امروزه این مشخصه یابی با ابزار و دستگاه‌های بسیار پیشرفته و مدرن در جهت بررسی خواص مختلف مواد به کار گرفته می‌شود. با استفاده از روش‌های مشخصه یابی فیلم‌های نازک و مواد می‌توان خواص مختلف آن‌ها را مانند خواص اپتیکی، مغناطیسی، ساختاری، الکترونیکی و همچنین مورفولوژی و توپوگرافی سطح آن‌ها را بررسی نمود. در این فصل به بررسی مختصر برخی از روش‌های مشخصه یابی کربن‌های شبه الماسی مانند طیف سنجی رامان^۱، طیف سنجی XPS^۲ بیضی سنجی^۳، میکروسکوپ نیروی اتمی^۴ (AFM) و طیف نگاری نوری^۵ (UV-Vis-NIR) می‌پردازیم.

۲-۲ طیف سنجی فرابنفش - مرئی - فروسرخ نزدیک (UV-Vis-NIR)

طیف سنجی نوری یک دستگاه نسبتاً ساده است که به کمک آن می‌توان طیف عبور، بازتاب و جذب فیلم را به دست آورد. طیف سنج مورد استفاده مدل UV1800- SHIMADZU است که دارای دو جایگاه، یکی برای قرار دادن نمونه‌ی مورد نظر و دیگری زیرلایه‌ی تنها است. این طیف سنج در گستره‌ی ۱۱۰۰-۳۰۰ نانومتر طیف فیلم را با مقیاس ۱ نانومتر اندازه می‌گیرد. با استفاده از داده‌های اپتیکی طیف سنج می‌توان بسیاری از خواص اپتیکی مواد مانند گاف اپتیکی و ضریب جذب مواد را محاسبه کرد.

¹ Raman spectroscopy

² X-ray photoelectron spectroscopy

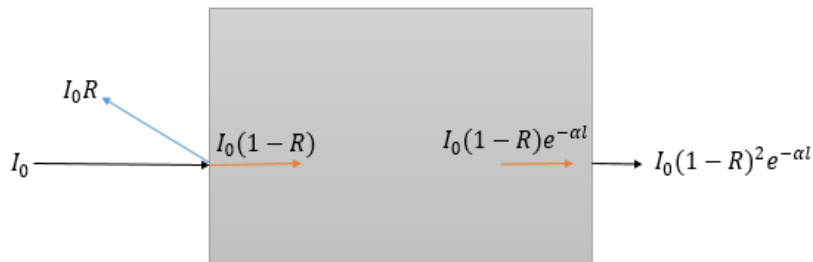
³ Ellipsometry

⁴ Atomic force microscopic

⁵ UV-Visible-near infrared spectroscopy

۱-۲-۲ ضریب جذب^۱

مطابق شکل ۱-۲ اگر نور فرودی به سطح یک نمونه دارای شدت I_0 باشد آن گاه داریم:



شکل ۱-۲: جذب، بازتاب و عبور از یک لایه

که در این رابطه R ضریب بازتاب از سطح، α ضریب جذب و l طول نمونه بر حسب (cm) است. طیف عبور اندازه گیری شده (T) توسط دستگاه UV برابر است با رابطه‌ی زیر:

$$T(\lambda) = \frac{I}{I_0} = (1-R)^2 e^{-\alpha l} \quad (1-2)$$

و ضریب جذب با استفاده از رابطه‌ی ۲-۲ محاسبه می‌شود [۳۳]:

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

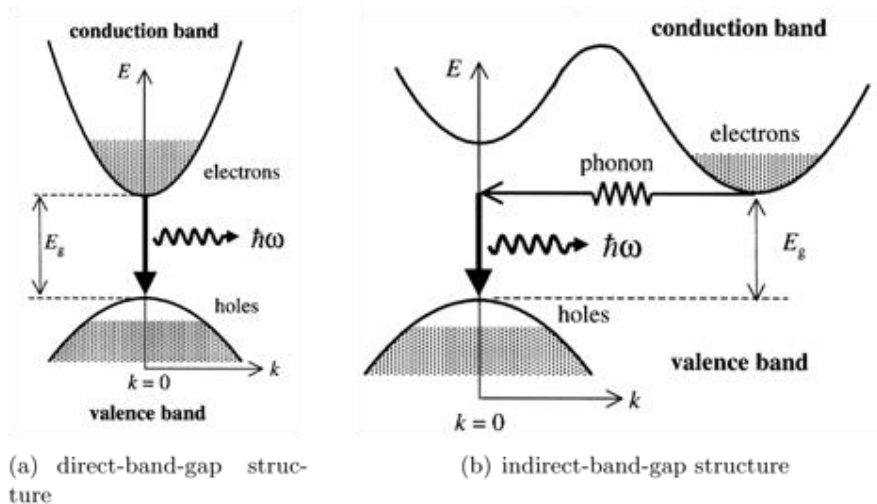
۲-۲-۲ گاف نواری اپتیکی^۲

محاسبه‌ی گاف نواری اپتیکی در فیزیک حالت جامد و نیمه رساناها بسیار مهم است. گاف نواری نشان دهنده‌ی اختلاف انرژی میان بالای نوار ظرفیت حاوی الکترون‌ها و پایین نوار رسانش که بدون حضور الکترون‌ها است می‌باشد. گاف نواری مربوط به رسانایی الکتریکی مواد است. عموماً در فلزات گاف نواری وجود ندارد و مقدار آن در نارساناها بسیار زیاد است، اما مقدار گاف نواری در نیمه رساناها بسته به نوع

¹ Absorption coefficient

² Optical band gap

ماده در حدود چند الکترون ولت است. اگر انرژی فوتون تابیده شده به ماده از گاف اپتیکی آن بیشتر باشد الکترون انرژی فوتون تابیده شده را جذب کرده و به نوار رسانش منتقل می‌شود. مطابق شکل، اگر پایین نوار رسانش با قله‌ی نوار ظرفیت دارای عدد موج یکسان باشند گاف اپتیکی مستقیم و در غیر اینصورت غیر مستقیم است.



شکل ۲-۲: گاف اپتیکی مستقیم و غیر مستقیم

در جذب‌های بالا ($\alpha(\omega) > 10^4 \text{ cm}^{-1}$)، برای محاسبه‌ی گاف نواری می‌توان از رابطه‌ی تاک^۱ استفاده کرد.

$$(\alpha h\nu)^{\frac{1}{n}} = \text{const}(h\nu - E_g) \quad (3-2)$$

در رابطه‌ی ۲-۳ اگر گاف نواری مستقیم باشد ($n=\frac{1}{2}$) و اگر گاف نواری غیر مستقیم باشد ($n=2$) می‌-

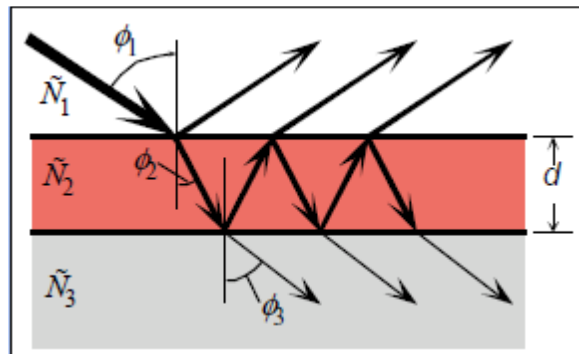
باشد. با برونیابی کردن نمودار $(\alpha h\nu)^{\frac{1}{n}}$ بر حسب $h\nu$ می‌توان گاف اپتیکی را محاسبه کرد [۳۴].

¹ Tauc relation

۳-۲ بیضی سنجی

بیضی سنجی یک روش اپتیکی قوی برای محاسبه‌ی ثابت‌های اپتیکی ماده مانند ضرایب شکست و خاموشی و همچنین ضخامت فیلم می‌باشد. اساس کار این روش بر پایه‌ی تحلیل نور بازتابی از سطح فیلم و زیرلایه است. زمانی که یک فیلم نازک، بر روی سطح یک زیرلایه قرار می‌گیرد، پرتوی نور قطبیده‌ی تک رنگ فرودی از هر کدام از مرزها بازتاب می‌شود. این موضوع در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. ضریب بازتاب مجموع از هر یک از مرزها بر حسب نسبت ضریب بازتاب مختلط برای مولفه‌های موازی (R^P) و عمودی (R^S) نور بیان می‌شود.

$$\rho = tg \psi e^{i\Delta} = \frac{R^P}{R^S} \quad (۴-۲)$$



شکل ۳-۲: بازتاب‌های متوالی از سطح فیلم و زیرلایه

روش بیضی سنجی بر اساس مد بازتاب عمل می‌کند. در ابتدا بازتاب کلی را محاسبه کرده و سپس تغییر فاز را از ضرایب بازتاب فرنل برای هر مرز محاسبه می‌کند. در این مورد یک بازتاب از مرز هوا و فیلم با ضرایب فرنل r_{12}^S و r_{12}^P و همچنین یک بازتاب از مرز فیلم و زیرلایه با ضرایب فرنل r_{23}^S و r_{23}^P وجود دارد. در ضرایب فرنل، بالوندهای S و P نشان دهنده‌ی مولفه‌های موازی و عمود میدان و زیر وندهای ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب نمایانگر هوا، فیلم و زیرلایه می‌باشند. ضرایب بازتاب فرنل عبارتند از:

$$r_{12}^P = \frac{N_2 \cos \phi_1 - N_1 \cos \phi_2}{N_2 \cos \phi_1 + N_1 \cos \phi_2} \quad (۵-۲)$$

$$r_{12}^s = \frac{N_1 \cos \phi_1 - N_2 \cos \phi_2}{N_1 \cos \phi_1 + N_2 \cos \phi_2} \quad (6-2)$$

$$r_{23}^p = \frac{N_3 \cos \phi_2 - N_2 \cos \phi_3}{N_3 \cos \phi_2 + N_2 \cos \phi_3} \quad (7-2)$$

$$r_{23}^s = \frac{N_2 \cos \phi_2 - N_3 \cos \phi_3}{N_2 \cos \phi_2 + N_3 \cos \phi_3} \quad (8-2)$$

ضرایب بازتاب مجموع موازی و عمود نیز بر حسب ضرایب فرنل محاسبه می‌شوند.

$$R^p = \frac{r_{12}^p + r_{23}^p \exp(-2i\beta)}{1 + r_{12}^p r_{23}^p \exp(-2i\beta)} \quad (9-2)$$

$$R^s = \frac{r_{12}^s + r_{23}^s \exp(-2i\beta)}{1 + r_{12}^s r_{23}^s \exp(-2i\beta)} \quad (10-2)$$

در این روابط، β بر حسب ضخامت فیلم (d)، طول موج (λ)، زاویه‌ی فرود پرتو (ϕ) و N_2 ضریب شکست مختلط فیلم است.

$$\beta = 2\pi \left(\frac{\lambda}{d}\right) N_2 \cos \phi \quad (11-2)$$

ψ به کمک نسبت ضرایب بازتاب موازی و عمود به دست می‌آید.

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{|R^p|}{|R^s|} \quad (12-2)$$

$$N_2 = n_2 + ik_2 \quad (13-2)$$

برای محاسبه‌ی N_2 و d هیچ راه حل تحلیلی بر حسب تغییر فاز و میرایی وجود ندارد. در روش بیضی سنجی هدف محاسبه‌ی طیف ψ و Δ بر حسب طول موج است و سپس با فیت کردن مناسب این

طیف‌ها با استفاده از یک مدل مناسب، می‌توان ثابت‌های اپتیکی فیلم را محاسبه کرد [۳۵، ۳۶].

۲-۴ طیف سنجی رامان^۱

طیف سنجی رامان یک تکنیک طیف سنجی بر اساس پراکندگی غیر کشسان یک پرتوی نور تک رنگ مانند نور یک لیزر است. پراکندگی غیر کشسان به معنی این است که فرکانس نور فرودی بر سطح ماده به دلیل برهمکنش با آن تغییر می‌کند. فوتون‌های نور لیزر به وسیله‌ی نمونه جذب و سپس باز نشر می‌شوند. فرکانس نور باز نشر شده در مقایسه با منبع فرکانس نور اصلی یا بدون تغییر می‌ماند که به آن پراکندگی رایلی گفته می‌شود و یا کم و زیاد می‌گردد که به آن اثر رامان می‌گویند. این تغییرات اطلاعاتی را در مورد گذارهای ارتعاشی، چرخشی و یا انتقالی مولکول‌ها در اختیار ما قرار می‌دهند. طیف سنجی رامان برای مطالعه‌ی نمونه‌های مایع، جامد و یا گاز استفاده می‌شود. زمانی که نور به نمونه برخورد می‌کند دو حالت ممکن است اتفاق بیفتد که در ادامه به بررسی آن‌ها می‌پردازیم.

۲-۴-۱ پراکندگی رایلی^۲

پراکندگی رایلی به وسیله‌ی ذراتی ایجاد می‌شود که اندازه‌ی آن‌ها بسیار کوچکتر از طول موج تابش است. در اثر این نوع پراکندگی طول موج تابش تغییر نمی‌کند و تحت عنوان پراکندگی کشسان^۳ نیز شناخته می‌شود.

۲-۴-۲ پراکندگی رامان

پراکندگی رامان زمانی اتفاق می‌افتد که طول موج نور تابیده شده به سطح ماده در اثر واکنش با آن تغییر کند. این پراکندگی در مورد $0.01/0$ فوتون‌ها اتفاق می‌افتد. اگر طول موج نور پراکنده شده نسبت به نور تابیده شده افزایش یابد (انرژی آن کاهش یابد)، پراکندگی رامان استوکس^۴، و اگر طول موج نور

¹ Raman spectroscopy

² Rayleigh scattering

³ Elastic scattering

⁴ stokes

بازنشر شده کاهش یابد (انرژی آن افزایش یابد) آنتی استوکس^۱ نامیده می‌شود. میدان الکتریکی نور فرودی مطابق رابطه‌ی ۲-۱۴ دارای دامنه‌ی E_0 و فرکانس ν_0 است.

$$E = E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) \quad (14-2)$$

این نور فرودی در برخورد با مولکول الکترون‌های آن را قطبیده کرده و وادار به نوسان میکند. ممان دو قطبی^۲ مولکول تابعی از میدان الکتریکی است (رابطه‌ی ۲-۱۵)

$$P = \alpha E \quad (15-2)$$

در رابطه‌ی بالا α ضریب قطبش پذیری^۳ ماده نامیده می‌شود.

بردار جابجایی نوسانات طبیعی مولکول با دامنه‌ی q_0 و فرکانس ν_{vib} برابر است با:

$$q_{vib} = q_0 \cos(2\pi\nu_{vib} t) \quad (16-2)$$

برای آنکه یک پیوند در رامان فعال باشد لازم است که قطبش پذیری آن به صورت تابعی از فاصله میان هسته‌ها (طول پیوند) تغییر کند. قطبش پذیری را بصورت یک سری تیلور بسط یافته تعریف می‌کنند:

$$\alpha = \alpha_0 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q} \right) q_{vib} + \dots \quad (17-2)$$

پس می‌توان ممان دوقطبی مولکول را با استفاده از روابط بالا به شکل زیر نوشت.

$$p = \alpha E = \alpha_0 E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q} \right) q_0 E_0 \{ \cos 2\pi(\nu_0 + \nu_{vib}) + \cos(\nu_0 - \nu_{vib}) \} \quad (18-2)$$

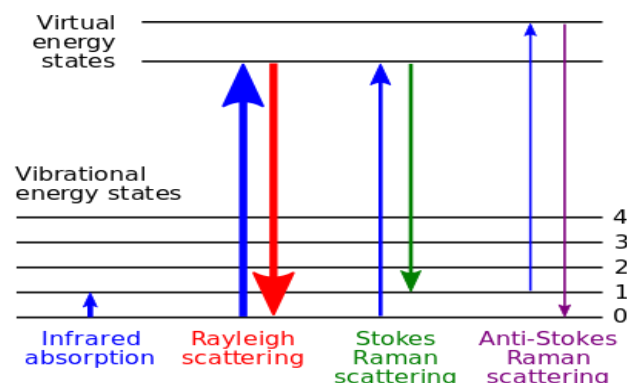
همانطور که از رابطه‌ی بالا مشخص است سه فرکانس پراکندگی نور برابر با ν_0 (پراکندگی رایلی)،

$\nu_0 + \nu_{vib}$ (آنتی استوکس) و $\nu_0 - \nu_{vib}$ (استوکس) است [۳۷, ۳۸].

¹ Anti-stokes

² Dipole moment

³ Polarizability



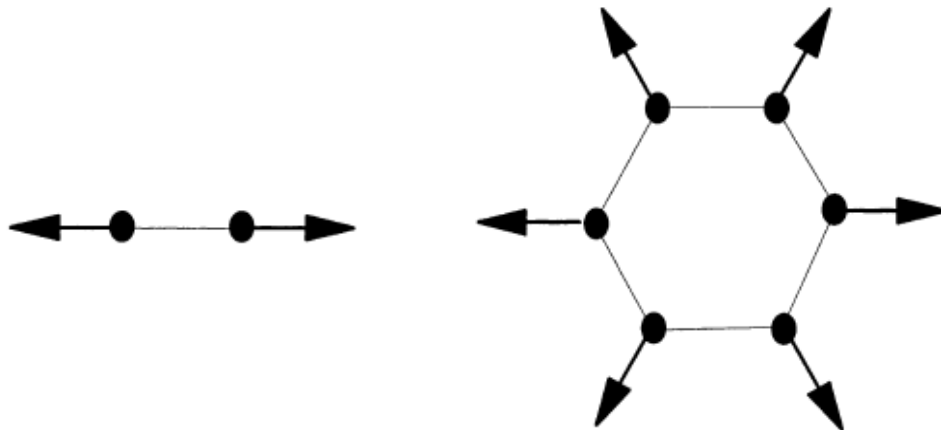
شکل ۲-۴: پراکندگی رامان

۳-۴-۲ آنالیز رامان کربن شبه الماسی

مهمترین آنالیز در بررسی فیلم‌های کربن شبه الماسی، آنالیز رامان است. با استفاده از این آنالیز می‌توان نسبت sp^3/sp^2 را مشخص کرده و با استفاده از تغییرات این نسبت، بسیاری از خواص و ویژگی‌های الکترونیکی و اپتیکی فیلم‌ها را تعیین نمود. البته آنالیز رامان توسط مکان‌های تقریبی sp^2 مشخص می‌گردد نه به وسیله‌ی کسر پیوندهای sp^2 . در منحنی رامان آمورف‌های کربنی دو زیر پیک D و G وجود دارد. حالت G مربوط به لرزش‌های کششی هر جفت از پیوندهای sp^2 است، چه در زنجیره‌های $C=C$ یا در حلقه‌های آروماتیک [۴۹]. پیک D مربوط به مد تنفسی مکان‌های sp^2 فقط در حلقه‌های آروماتیک است و نه در زنجیره‌ها [۴۹]. بدیهی است که با کاهش I_D/I_G نسبت پیوندهای sp^3 افزایش می‌یابد. تغییر شدت حالت D با ساختار اتمی جالب است. در سال‌های قبل، تونسترا و کونگ^۱ نشان دادند که شدت نسبی میان مدهای D و G با طول همبستگی درون صفحه‌ای (L_a) یا اندازه دانه گرافیت رابطه‌ی عکس دارد.

$$\frac{I_D}{I_G} = \frac{c}{L_a} \quad (۱۹-۲)$$

¹ Tuinstra and koenig



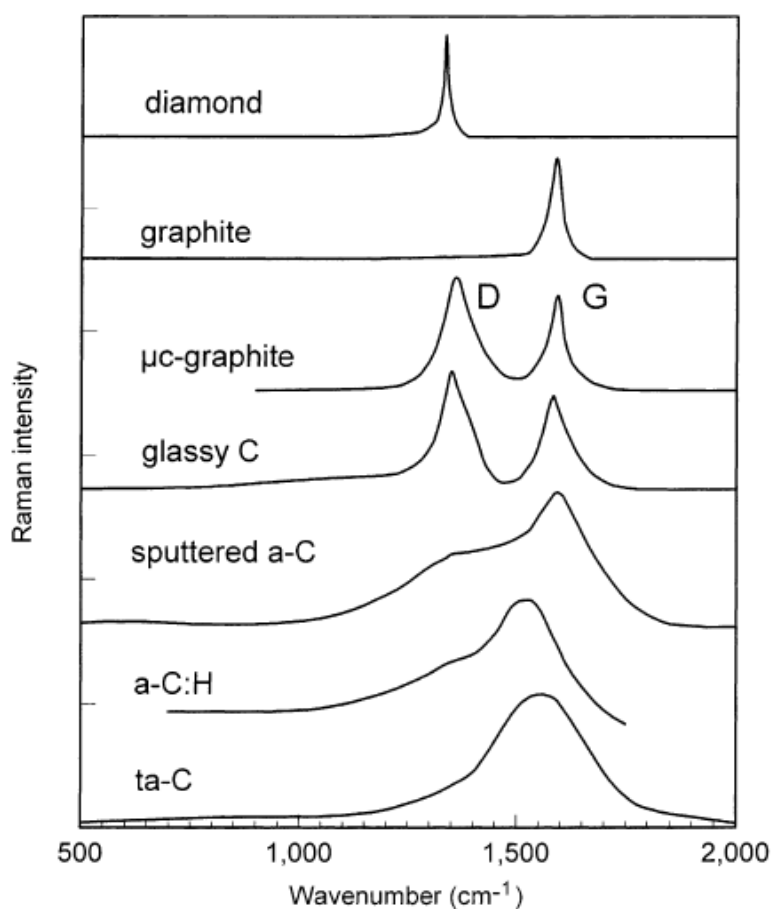
ب: مد کششی در زنجیره [۷]

شکل ۲-۵ الف: مد تنفسی در حلقه‌ی آروماتیک

این بدین معناست که I_D/I_G با تعداد حلقه‌های لبه‌ی دانه متناسب است. واضح است که این رابطه به ازای L_a برابر با صفر برقرار نیست. داده‌های اخیر برای لایه نشانی ta-C در دمای بالا پیشنهاد میکنند که برای L_a کوچکتر از ۲ نانومتر رابطه به فرم زیر تبدیل می‌گردد.

$$\frac{I_D}{I_G} = cl_a^2 \quad (۲-۲۰)$$

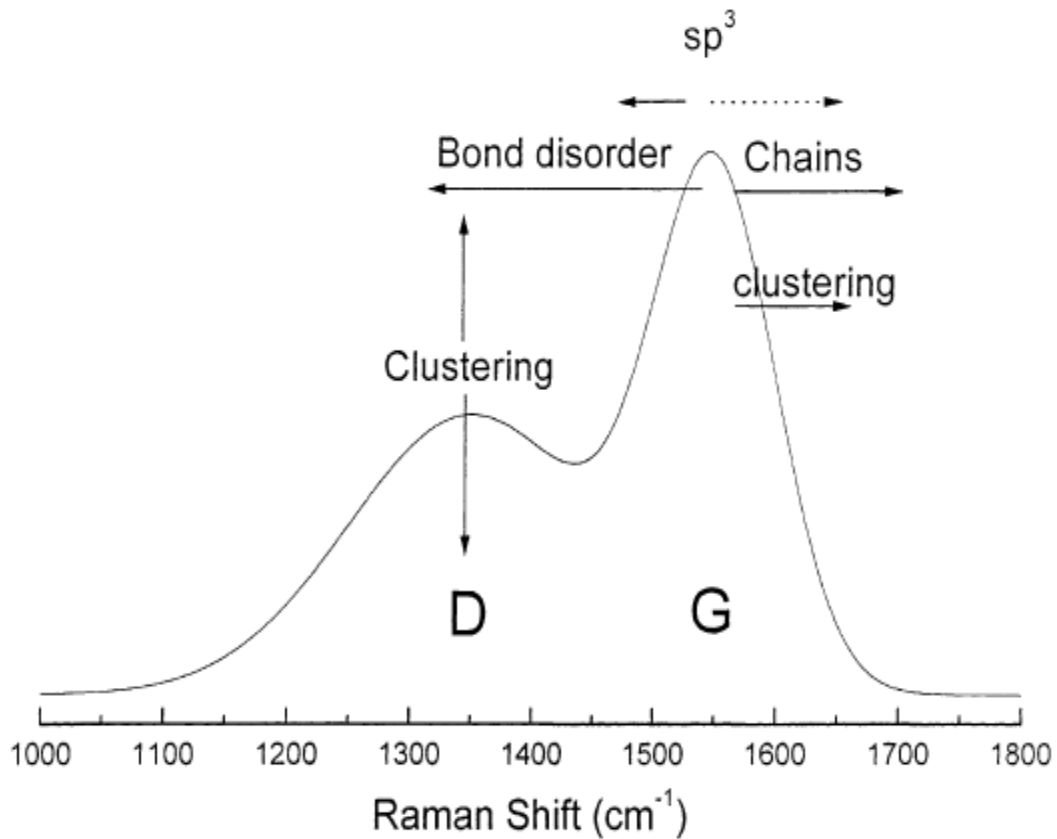
پیک G به دلیل وجود تمامی سایت‌های sp^2 است، اما پیک D فقط به دلیل وجود حلقه‌های شش گوشه است. بنابراین شدت نسبی I_D/I_G با کاهش حلقه‌ها در هر خوشه کاهش و کسر گروه‌های زنجیره‌ای افزایش می‌یابد. فاکتور مهم برای فیلم‌های DLC این است که L_a همیشه کمتر از ۱ نانومتر است بنابراین از رابطه‌ی تونسترا-کونینگ هرگز استفاده نمی‌شود و بجای آن از رابطه‌ی (۲-۲۰) استفاده می‌گردد. در شکل ۲-۶ طیف رامان آلوتروپ‌های کربن مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۶: مقایسه میان انواع طیف رامان کربن [۷]

طیف رامان آمورف‌های کربنی و کربن‌های بی نظم بطور کلی مانند شکل ۲-۷ است. در این شکل عوامل مختلفی که می‌تواند پیک‌های G و D را جابجا کند در جهت‌ها و شدت‌های مختلف مشاهده شده‌اند. یک ویژگی بسیار خوب در طیف سنجی رامان این است که پیوندهای C-H را مشاهده نمی‌کند [۷]. در طیف رامان فیلم‌های کربن شبه الماسی، یک پیک پهن در عدد موج ۹۰۰ تا 1800 cm^{-1} مشاهده می‌گردد. این پیک پهن به وسیله‌ی دو پیک در حالت گاوسی فیت می‌گردد. برای هر منحنی نسبت شدت‌های I_D/I_G ، مکان پیک G و همچنین FWHM پیک G محاسبه می‌گردد و این پارامترها کاملاً مربوط به چگالی، اندازه و ساختار خوشه‌های sp^2 می‌باشند. ویژگی خوشه‌های sp^2 کاملاً وابسته به مقادیر و پیوندهای sp^3 در آمورف‌های کربنی است. و این موضوع به ما کمک می‌کند که از پارامترهای رامان مقدار پیوندهای sp^3 را اندازه‌گیری کنیم. مکان تقریبی پیک G در 1560 cm^{-1} و پیک D در 1350 cm^{-1}

۱۳۵۰ است. کاهش $\frac{I_D}{I_G}$ و همچنین کاهش پیک G به سمت عدد موج‌های کمتر نشان دهنده‌ی افزایش مقادیر sp^3 است [۵۰].



شکل ۲-۷: طرح الگو وار از نمودار طیف کربن غیر بلوری و اثر عوامل مختلف بر تغییر مکان و شدت پیک‌های D و G

۲-۵ میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)^۱

AFM یک روش بسیار مناسب برای مشاهده‌ی پروفایل سطح سه بعدی فیلم و توپوگرافی^۲ سطح آن است. میکروسکوپ نیروی اتمی، متشکل از یک اهرم فنری^۳ مانند است که بر روی آن یک کاوشگر سوزنی شکل قرار گرفته است. هنگامی که کاوشگر بر روی سطح ماده حرکت می‌کند در اثر وجود نیرو بین نوک کاوشگر و سطح ماده منحرف می‌شود و زبری سطح ماده را تصویرسازی می‌کند. نیروهای

¹ Atomic force microscopic

² Topography

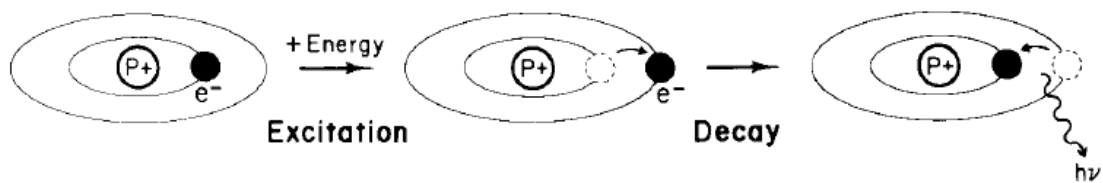
³ Cantilever-type spring

اندازه‌گیری شده در محدوده‌ی 10^{-6} - 10^{-9} نیوتون هستند و در فاصله‌ی بسیار کوتاه بین کاوشگر و نمونه، نیروها غالباً از نوع واندروالسی هستند. انحراف کاوشگر با استفاده از روش بازتاب پرتو به دست می‌آید. هنگامی که نوک سوزن بر روی سطح نمونه در حال اسکن است یک لیزر دیودی نیمه رسانا به سطح پشت اهرم فنری تابیده و از سطح آن بازتاب می‌شود و به این ترتیب خم شدن و انحراف کاوشگر را اندازه‌گیری می‌کند [۳۹]. اگر جدایی میان کاوشگر و نمونه در حدود کمتر از ۵ آنگستروم باشد نیروهای واندروالسی میان نمونه و سوزن به دلیل همپوشانی الکترون‌ها از نوع دافعه هستند و به این حالت مد تماسی می‌گویند. در این حالت اسکن سطح سریع و برای سطوح زبر مناسب است اما می‌تواند به سطح نمونه آسیب برساند. حالت دیگر زمانی اتفاق می‌افتد که جدای میان نمونه و سوزن ۱۰-۲ نانومتر باشد در این حالت نیروی واندروالسی میان نمونه و کاوشگر از نوع جاذبه است. در این حالت به سطح نمونه آسیبی نمی‌رسد اما رزولوشن کمتری نسبت به حالت تماسی دارد [۴۰].

۲-۶ طیف سنجی نشر نوری^۱ (OES)

طیف سنجی نشر نوری یکی از روش‌های بسیار مهم در تشخیص عناصر و یون‌های موجود در پلاسما است. این روش برای شناسایی انواع پلاسما مانند پلاسمای پرفشار و کم فشار بدون محدودیت دمایی قابل استفاده است و هیچ گونه اثر و تخریبی بر روی نمونه‌ی مورد مطالعه ایجاد نمی‌کند. اندازه‌گیری‌های طیفی این قابلیت را دارند اطلاعاتی نظیر ساختار و عناصر پلاسما و همچنین دما و توزیع انرژی در پلاسما را در اختیار ما قرار دهند. اساس کار طیف سنجی نوری بر مبنای انرژی نشر شده از یک اتم یا یون برانگیخته است. اندازه‌گیری جذب و نشر یک تابش الکترومغناطیس با شناخت ساختار و طبیعت اتم و یون به سادگی امکان پذیر است [۴۱]. مطابق با الگوی بور، اتم از یک هسته با بار مثبت تشکیل شده است که الکترون‌ها بر روی ترازهای اوربیتالی گسسته به دور آن می‌چرخند (شکل ۲-۸).

¹ Optical emission spectroscopy

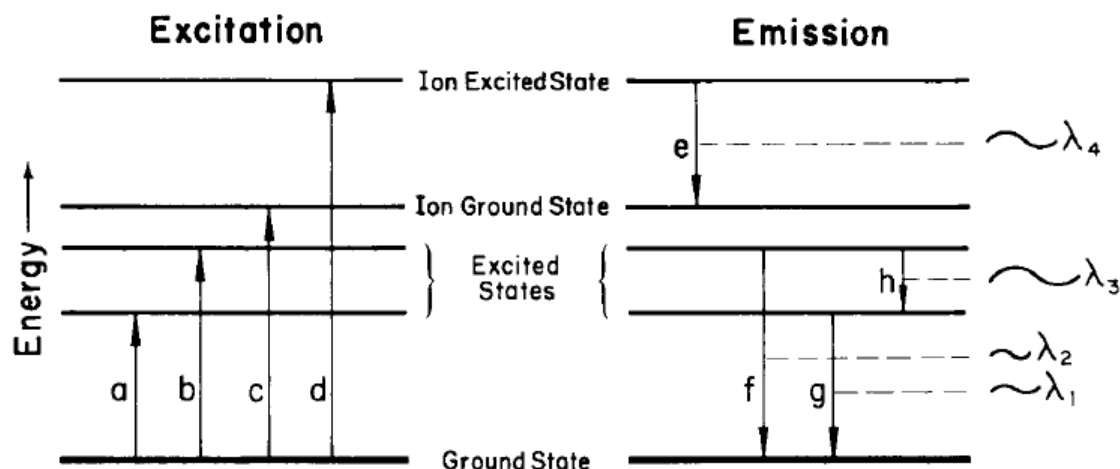


شکل ۲-۸: مدل بور برای اتم، جذب و نشر فوتون [۴۲]

هر اوربیتال الکترونی انرژی متناظر با آن تراز دارد. به طور کلی هرچقدر یک اوربیتال از هسته دورتر باشد انرژی آن بیشتر است. زمانی که الکترون در نزدیکترین اوربیتال به هسته قرار دارد، اتم در کمینه‌ی انرژی و حالت پایدار قرار دارد که به عنوان تراز پایه شناخته می‌شود. زمانی که به وسیله‌ی جذب تابش الکترومغناطیس و یا برخورد اتم با یک الکترون، اتم و یا یون دیگر به اتم انرژی منتقل می‌شود، ممکن است چندین حالت اتفاق بیفتد. مثلاً ممکن است انرژی جنبشی آن افزایش یافته و یا الکترون آن از تراز پایه به تراز انرژی بالاتر حرکت کند که به این حالت اتم برانگیخته می‌گویند. اتم در حالت برانگیخته ناپایدار است و تمایل دارد که با از دست دادن انرژی به حالت پایدار بازگردد. بنابراین الکترون از تراز اوربیتالی بالاتر به تراز نزدیکتر به هسته منتقل می‌شود و یک تابش الکترومغناطیس از خود نشر می‌کند. اگر انرژی جذب شده اتم به اندازه‌ی کافی زیاد باشد الکترون از اتم جدا شده و یک یون با بار خالص مثبت ایجاد می‌کند. انرژی مورد نیاز برای این فرایند انرژی یونش نامیده می‌شود و برای هر عنصر متفاوت است. یون‌ها هم حالت پایه و حالت برانگیخته دارند و دقیقاً می‌توانند مانند یک اتم انرژی جذب کرده و به حالت برانگیخته بروند و در بازگشت به حالت پایه انرژی خود را نشر دهند (شکل ۲-۹). مطابق رابطه‌ی ۲-۲۱ تفاوت انرژی میان ترازهای بالایی و پایینی در گذار تابشی نشان دهنده‌ی طول موج انرژی تابش است.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2-21)$$

هر عنصری ترازهای انرژی منحصر به فرد خود را دارد بنابراین با استفاده از طول موج جذب و نشر الکترومغناطیس هر عنصر می‌توان با طیف نگاری پلاسما عناصر و یون‌های موجود را شناسایی نمود. در



شکل ۹-۲: نمودار ترازهای انرژی در اتم و یون، a و b حالت برانگیخته، c یونش، d یونش/برانگیختگی، e نشر یونی، و f و g و h نشر اتمی [۴۲]

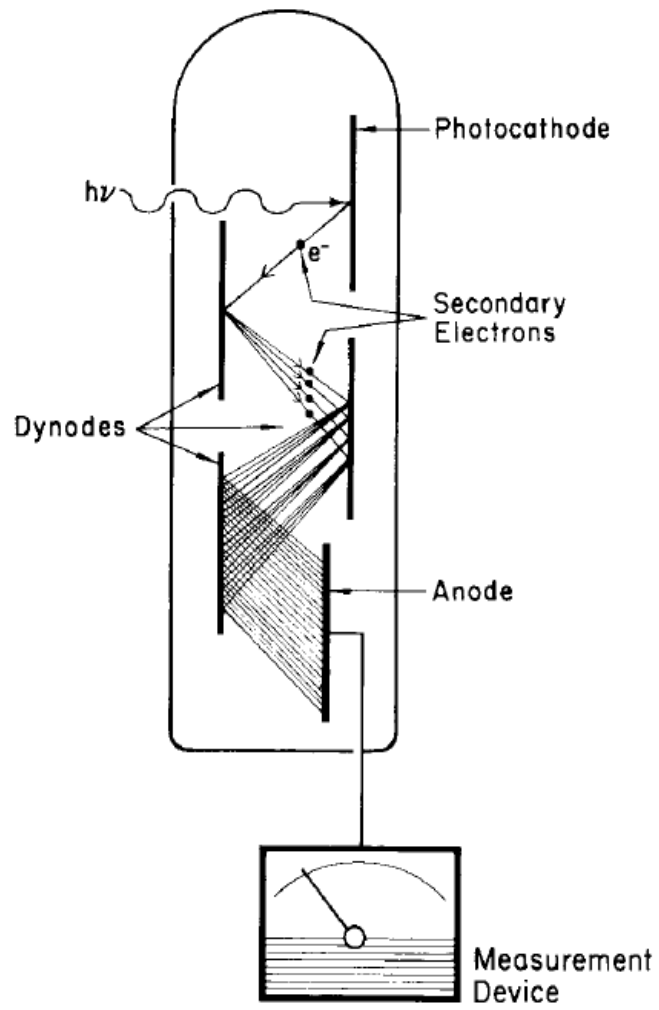
دستگاه طیف نگار، نور به وسیله‌ی یک عدسی متمرکز شده و از طریق فیبر نوری وارد دستگاه اسپکتروفتومتر می‌شود. پس از آن به وسیله‌ی یک توری انکسار که از شیارهای موازی بر روی یک آینه تخت تشکیل شده است (۴۲۰۰-۶۰۰ خط بر میلی متر)، طول موج‌های مختلف نور جدا می‌شوند. پس از آن نور به سمت آشکارساز حرکت می‌کند. آشکارساز از یک فوتومولتی پلیمر^۱ (PMT) تشکیل شده که شامل یک محفظه‌ی خلاء است که در آن یک ماده‌ی حساس به تابش فوتون^۲ به نام فوتوکاتد^۳ قرار دارد. فوتون پس از برخورد به سطح فوتوکاتد یک یا چند الکترون را از سطح آن جدا می‌کند. الکترون‌های جدا شده به سمت داینودها^۴ حرکت کرده و با برخورد به سمت هر داینود دو تا پنج الکترون ثانویه را جدا می‌کنند. یک فوتومولتی پلیمر متشکل از ۱۶-۹ داینود است. در مرحله‌ی آخر الکترون‌های ثانویه توسط آند جمع شده و جریان آن‌ها اندازه‌گیری می‌گردد که این جریان با شدت نور فرودی به داخل PMT مرتبط است [۴۲].

^۱ Photomultiplier tube

^۲ Photosensitive

^۳ Photocathode

^۴ Dynode



شکل ۲-۱۰: فتوکاتد، داینود و آند در یک فتومولتی پلییر [۴۲]

۳- فصل سوم

جزئیات مراحل و چیدمان آزمایشگاهی با استفاده از دستگاه

پند و پاش مغناطیسی جریان مستقیم

۳-۱ مقدمه

لایه نشانی فیلم‌ها و لایه‌های نازک بخش عمده‌ای از تحقیقات در زمینه‌های مختلف مانند صنعت و پزشکی را شامل می‌شود. روش‌های تولید و رشد لایه‌های نازک و بهبود و پردازش سطوح و خواص آن‌ها بخش بسیار مهمی را در توسعه و گسترش این علم در سالیان اخیر داشته است. لایه نشانی فیلم‌های نازک به روش‌های بسیار متنوع و گوناگونی مانند انواع روش‌های فیزیکی و شیمیایی انجام می‌گیرد. تنوع مواد برای لایه نشانی، متفاوت بودن خواص آن‌ها و نیاز به شرایط متفاوت برای لایه نشانی انواع فیلم‌ها اعم از رسانا، نیمه رسانا یا نارسانا منجر به توسعه و گسترش انواع روش‌ها و دستگاه‌های لایه نشانی گردیده است. برای لایه نشانی کربن‌های شبه الماسی از روش‌های بسیار متنوعی مانند لیزر پالسی، کندوپاش، رسوب شیمیایی به کمک پلاسما و قوس کاتدی استفاده می‌گردد که در این پایانامه برای تولید و لایه نشانی از دستگاه کندوپاش و روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم استفاده شده است. این روش به دلایلی مانند کارایی بالا، قابلیت لایه نشانی بر روی زیرلایه‌ها با اندازه و اشکال متفاوت، کنترل ساده و همچنین کم هزینه بودن روشی بسیار مناسب برای انجام کارهای آزمایشگاهی و صنعتی است. در ادامه به بررسی مراحل تولید و لایه نشانی کربن‌های شبه الماسی به همراه توضیح در مورد چیدمان دستگاه کندوپاش مورد استفاده در این پایانامه می‌پردازیم.

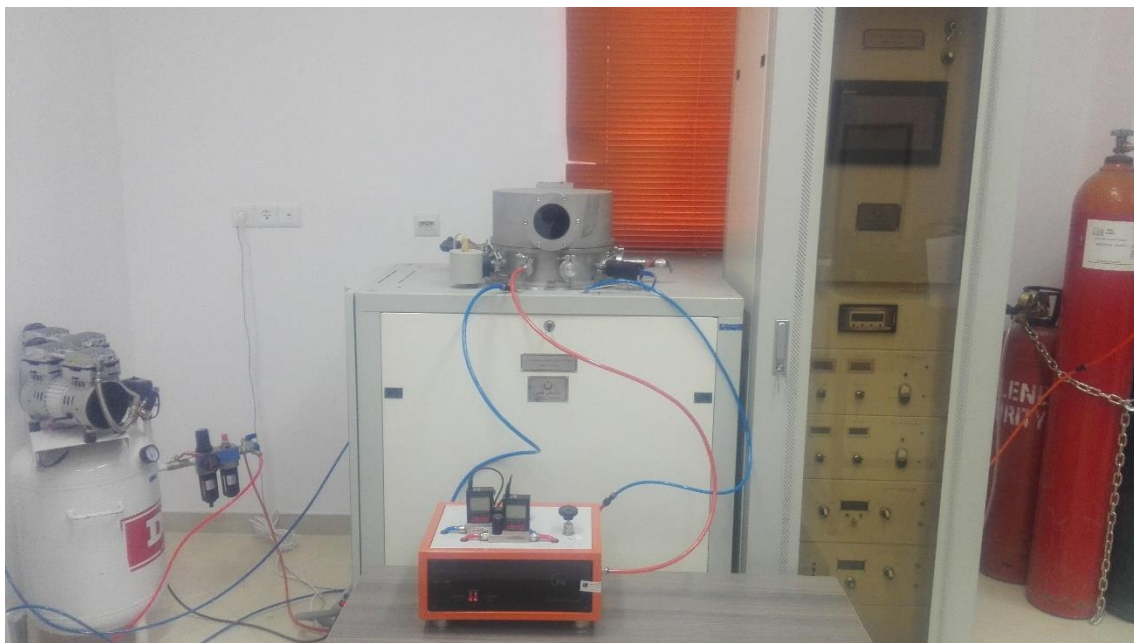
۳-۲ آماده سازی زیرلایه

زیرلایه‌های مورد استفاده در این تحقیق زیرلایه‌های شیشه‌ای در ابعاد $75 \times 25 \times 1 \text{ mm}^3$ می‌باشند. جهت خلوص فیلم‌ها و نیز بهبود خواص اپتیکی لازم است که قبل از عمل لایه نشانی زیرلایه‌ها بطور کامل شستشو و عاری از هرگونه آلودگی و لکه گردند. ابتدا زیرلایه‌ها با استفاده از مایع شستشو کاملاً شسته شده و سپس با استفاده از آب مقطر یک بار تقطیر آب کشی می‌گردد. پس از آن زیرلایه‌ها به مدت ۱۶ دقیقه در محلول ۵۰ درصد استون و ۵۰ درصد اتانول و در دمای ۵۰ درجه‌ی سانتی گراد در

دستگاه اولتراسونیک قرار داده می‌شود و سپس پس از آب کشی با آب مقطر، استون و اتانول به وسیله‌ی سشوار صنعتی خشک و آماده‌ی لایه نشانی می‌گردند.

۳-۳ دستگاه کندوپاش

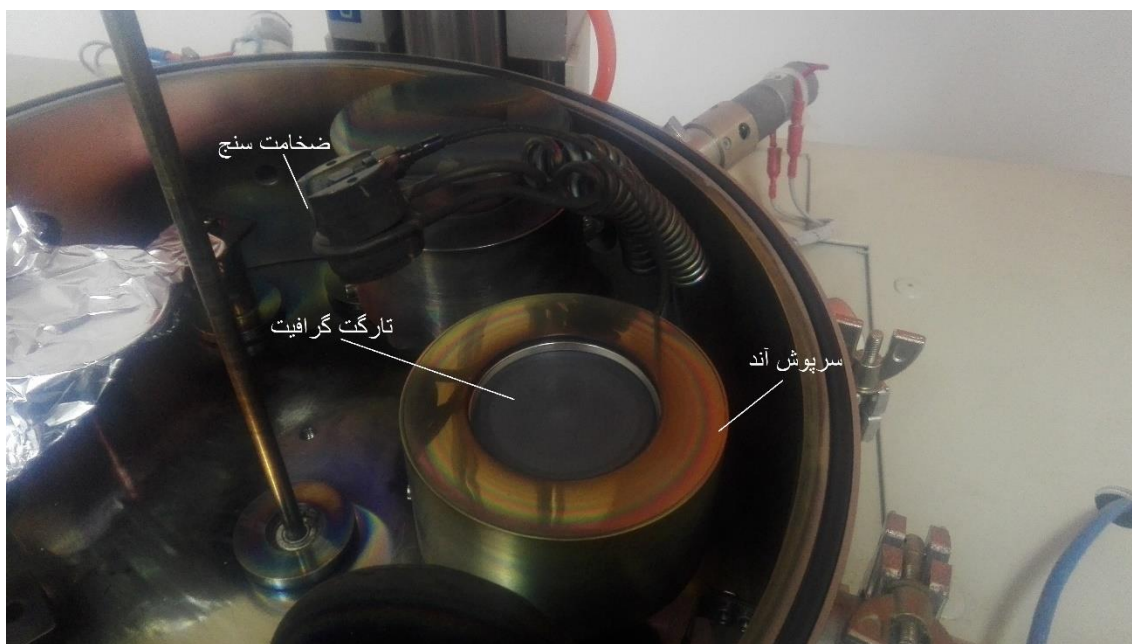
سامانه‌ی کندوپاش مورد استفاده در این مطالعه، دارای مدل DRS&TE305 است و یک دستگاه سه کاره دارای قابلیت‌های لایه نشانی به روش‌های کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم، فرکانس رادیویی و همچنین تبخیر حرارتی می‌باشد که در این تحقیق از کندوپاش جریان مستقیم استفاده گردیده است. دستگاه کندوپاش عمدتاً از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده که در ادامه به بررسی آن‌ها می‌پردازیم.



شکل ۳-۱: سامانه‌ی کندوپاش مورد استفاده

۳-۳-۱ منبع تغذیه: منبع تغذیه‌ی این دستگاه یک منبع تغذیه‌ی ۱۰۰۰ وات مدل PS1000 است که دارای خروجی ۱۰۰۰ ولت و ۱ آمپر می‌باشد که کاربرد آن اعمال ولتاژ بین دو الکترود داخل محفظه خلاء و تولید پلاسما است. پلاسما در ولتاژ حدوداً ۳۰۰ ولت روشن می‌شود و می‌توان از حاصل ضرب ولتاژ در جریان، توان لایه نشانی را محاسبه نمود.

۳-۳-۲ محفظه‌ی لایه نشانی: یک محفظه‌ی استوانه‌ای شکل که عمل لایه نشانی در داخل آن اتفاق می‌افتد. این محفظه شامل الکترودها (کاتد و آند)، نگهدارنده‌ی زیرلایه‌ها و ضخامت سنج است. تارگت مورد نظر مطابق شکل بر روی کاتد قرار گرفته و عمل کندوپاش و لایه نشانی انجام می‌پذیرد.



شکل ۳-۲: نمای داخلی محفظه‌ی لایه نشانی

۳-۳-۳ نگهدارنده‌ی زیرلایه‌ها: یک نگهدارنده‌ی دایره‌ای شکل متخلخل که در بالای تارگت قرار گرفته و زیرلایه‌ها به کمک دو تیغه بر روی آن متصل می‌گردد. این نگهدارنده قابلیت چرخش ۳۶۰ درجه‌ای را نیز دارد.

۳-۳-۴ شاتر: شاتر به دلیل جلوگیری از لایه نشانی ناخواسته بر روی تارگت قرار می‌گیرد و با کنار رفتن آن از روی تارگت عمل لایه نشانی انجام می‌گیرد. قبل از کنار رفتن شاتر، تارگت به مدت حدوداً ۱۰ دقیقه کندوپاش ابتدایی می‌شود تا ناخالصی‌های روی سطح آن از بین رفته و عمل لایه نشانی به سهولت انجام گیرد. پس از آن شاتر کنار رفته و لایه نشانی صورت می‌گیرد.

۳-۳-۵ پمپ خلاء روتاری: پمپ روتاری مورد استفاده در این سامانه مدل RV8 است و به دو

جهت استفاده می‌گردد: (۱) برای خلاء محفظه در حین عمل لایه نشانی که فشار پایه‌ی محفظه را در حدود 10^{-2} torr می‌رساند. (۲) برای پشتیبانی از پمپ دیفیوژن استفاده می‌گردد زیرا فشار پشت پمپ دیفیوژن نباید بیشتر از 10^{-1} torr بشود.

۳-۳-۶ پمپ خلاء دیفیوژن: پمپ دیفیوژن مورد استفاده دارای مدل DP-100 است و برای

دستیابی به محدوده فشار 10^{-6} torr استفاده می‌گردد. از این پمپ برای از بین بردن آلاینده‌ها و ناخالصی‌های داخل محفظه استفاده می‌شود. پمپ دیفیوژن قادر به خلاء محفظه با فشار جو نیست و قبل از اتصال آن به محفظه باید با پمپ روتاری فشار تا حدود $5/5 \times 10^{-2}$ torr پایین بیاید.

۳-۳-۷ کپسول گاز آرگون: برای لایه نشانی و تولید پلاسما از گاز آرگون با درصد خلوص

۹۹/۹۹۹ استفاده می‌شود. معمولا برای تولید پلاسما برای کندوپاش از گازهای نجیب و بی اثر مانند آرگون و کریپتون استفاده می‌شود. گازهای نجیب در گروه آخر جدول تناوبی قرار دارند و چون الکترون‌های ظرفیت آن‌ها در فاصله‌ی دورتری از هسته قرار گرفته‌اند و به دلیل اثر همپوشانی الکترون‌های داخلی، الکترون‌های ظرفیت به سهولت از اتم جدا شده و تولید پلاسما می‌کنند. از طرفی گازهای نجیب در واکنش‌های شیمیایی شرکت نمی‌کنند و بی اثر هستند. در بسیاری از مطالعات بر روی کندوپاش آمورف‌های کربنی از گازهای هیدروکربنی مانند متان و یا استیلن نیز استفاده می‌شود و می‌توان فیلم‌های آمورف کربنی هیدروژن دار تولید کرده و اثر مقادیر هیدروژن را در پیوندهای sp^3 از نوع C-H و همچنین خواص اپتیکی فیلم‌ها مانند گاف نواری و ضریب شکست بررسی نمود.

۳-۳-۸ کنترل کننده‌ی شار جرمی (MFC)^۱: با استفاده از دستگاه کنترل کننده‌ی شار جرمی می‌توان شار گاز مورد نظر را که در این مطالعه گاز آرگون است را بر حسب scm^2 تنظیم کرد. دستگاه کنترل کننده‌ی شار جرمی در این آزمایش از نوع Alicat و با قابلیت عبور حداکثر 1000 scm گاز است. این دستگاه قابلیت تنظیم و کالیبره شدن برای بسیاری از گازها را داراست. باید توجه کرد که در حین استفاده از آن مقدار PSI پشت دستگاه در حدود ۳۰-۱۵ باشد.



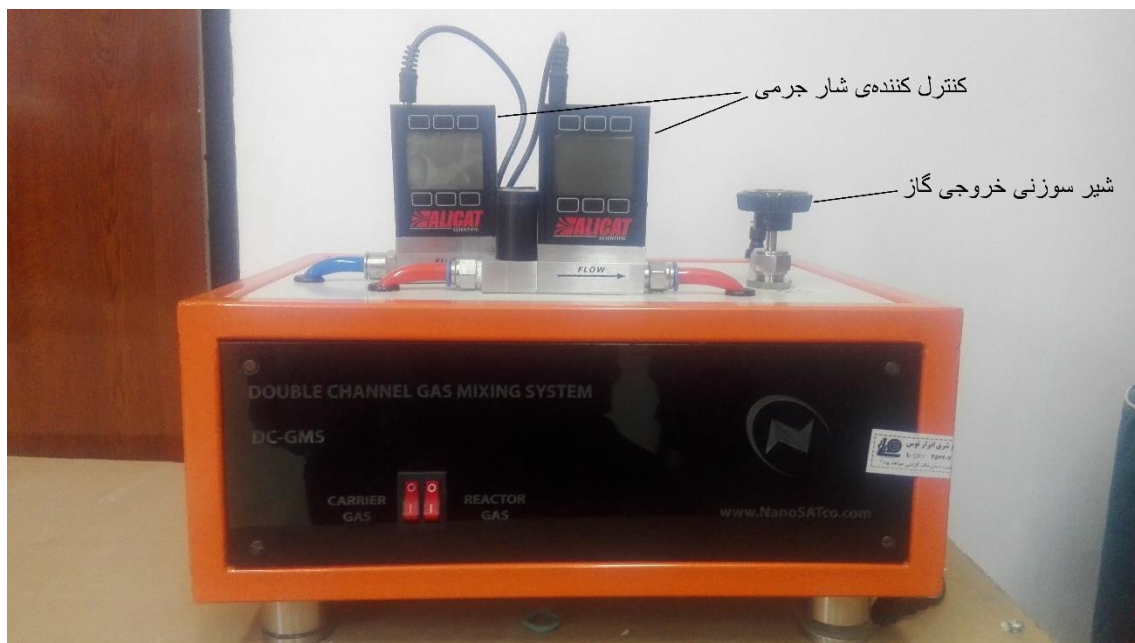
شکل ۳-۳: دستگاه کنترل کننده‌ی شار جرمی

۳-۳-۹ میکسر: میکسر دارای دو ورودی گاز ۱ و ۲ و یک خروجی است که بر روی آن دو MFC قرار گرفته‌اند. پس از تنظیم شار ورودی هر گاز، گازهای مختلف درون میکسر ترکیب شده و از طریق خروجی وارد محفظه‌ی لایه نشانی می‌گردند.

۳-۳-۱۰ ضخامت سنج: ضخامت سنج دستگاهی است که بر روی تارگت قرار گرفته و در حین لایه نشانی برای اندازه‌گیری ضخامت لایه‌های نازک بر روی زیر لایه‌ها استفاده می‌گردد. اساس کار ضخامت سنجی با استفاده از خاصیت پیزوالکتریک، تغییر فرکانس در اثر نشستن جرم بر روی قطعه‌ی پیزوالکتریک می‌باشد. این دستگاه از دو بخش آشکارساز و نوسان ساز تشکیل یافته است.

¹ Mass flow controller

² Standard cubic centimeters per minute



شکل ۳-۴: دستگاه میکسر

۳-۳-۱۱ فشار سنج پیرانی: فشار سنج پیرانی اکتیو مدل فیا ۱۰۳ بر اساس هدایت حرارتی گازها کار می‌کند و در اصل یک پل اندازه‌گیری در خود دارد. یکی از شاخه‌های پل رشته‌ی نازکی است که در خلاء قرار می‌گیرد و تغییرات فشار را حس کرده و مدار کنترل کننده‌ی فشار سنج، ولتاژی بر حسب فشار محفظه‌ی خلاء تولید می‌کند. فشار سنج پیرانی برای اندازه‌گیری فشار در محدوده‌ی 10^{-3} تا 100 torr مناسب می‌باشد.

۳-۳-۱۲ فشار سنج کاتد سرد (پنینگ): فشار سنج کاتد سرد مورد استفاده مدل فکسا ۱۰۱ است. این نوع فشار سنج بر اساس مقدار جریان یونش گاز کار می‌کند و برای اندازه‌گیری در گستره‌ی فشاری 10^{-3} تا 10^{-7} torr مناسب است و به طور معمول در سامانه‌های خلاء استفاده می‌شود.

۳-۳-۱۳ تارگت گرافیتی: تارگت مورد استفاده در این آزمایش یک تارگت گرافیتی به قطر ۲ و ضخامت $\frac{1}{4}$ اینچ با درصد خلوص ۹۹/۹۹ می‌باشد. قبل از قرار دادن تارگت بر روی کاتد سطح آن به

آهستگی سمباده‌ی نرم زده شده و با الکل تمیز می‌گردد. این کار باعث می‌شود تا در حین آزمایش پلاسما پایدار مانده و جرقه نزند.



شکل ۳-۵: اتصال فشار سنج‌ها به محفظه

۴- فصل چهارم

بحث و نتایج مربوط به لایه نشانی کربن های شبه الماسی

۴-۱ مقدمه

در این پژوهش اثر پارامترهای توان و شار گاز آرگون بر روی خواص اپتیکی و ساختاری و همچنین مورفولوژی فیلم‌های کربن شبه الماسی لایه نشانی شده به روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم بررسی شده است. برای بررسی اثر توان، لایه‌ها در توان‌های ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ وات و در شار ثابت ۸ sccm گاز آرگون لایه نشانی شده و برای بررسی اثر شار گاز آرگون از شارهای ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ sccm و در توان ثابت ۱۰۰ وات استفاده می‌شود. طیف ضرایب شکست و خاموشی فیلم‌ها به وسیله‌ی روش بیضی سنجی محاسبه شده است. ضریب جذب فیلم‌ها نیز با استفاده از محاسبه‌ی ضریب خاموشی اندازه‌گیری شده و با استفاده از آن گاف نواری اپتیکی و انرژی E_{04} محاسبه شده است. فیلم‌ها با ضخامت تقریباً یکسان و در حدود ۱۷۰-۱۵۰ نانومتر لایه نشانی شده اند. ساختار فیلم‌ها و بررسی پیوندهای sp^3 و sp^2 به وسیله‌ی طیف سنجی رامان انجام می‌گیرد. بررسی توپوگرافی و زبری سطح لایه‌های نازک نیز به وسیله‌ی میکروسکوپ نیروی اتمی انجام می‌گردد. طیف سنجی پلاسما نیز با استفاده از (OES) انجام می‌گیرد.

۴-۲ بررسی اثر توان لایه نشانی

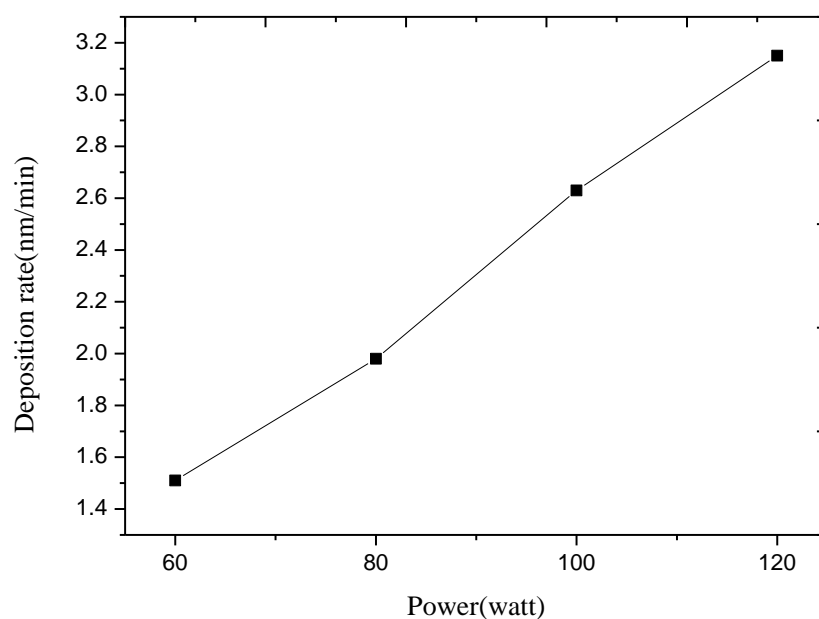
۴-۲-۱ نرخ لایه نشانی

فیلم‌های لایه نشانی شده در این پژوهش در توان‌های متفاوت و با ضخامت تقریباً یکسان لایه نشانی شده‌اند. در جدول ۴-۱ توان، ضخامت، زمان و شار لایه نشانی برای هر فیلم مشخص شده است و مشاهده می‌شود که با افزایش توان، آهنگ لایه نشانی افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند که توان لایه نشانی اثر مستقیمی بر روی نرخ و زمان لایه نشانی دارد. با افزایش توان، میدان الکتریکی بین کاتد و آند افزایش یافته و طی آن برخوردهای میان ذرات در محفظه بیشتر شده و فرایند تجزیه و تولید یون‌های آرگون افزایش می‌یابد. از طرفی یون‌های آرگون تولید شده با انرژی بیشتری به سطح تارگت

برخورد کرده و نرخ کندوپاش تارگت و لایه نشانی افزایش می‌یابد. در نمودار ۱-۴ رابطه‌ی میان توان و زمان لایه نشانی مشخص شده است. مشاهده می‌شود که رفتار نمودار تقریباً خطی است [۳].

جدول ۱-۴: توان، ضخامت، زمان و شار هر آزمایش در پارامتر توان

فیلم	توان (وات)	شار (sccm)	ضخامت (نانومتر)	زمان (دقیقه)
۱	۶۰	۸	۱۶۳/۳۸	۱۱۰
۲	۸۰	۸	۱۵۸/۶۶	۸۰
۳	۱۰۰	۸	۱۶۱/۰۶	۶۵
۴	۱۲۰	۸	۱۶۲/۲۸	۳۸

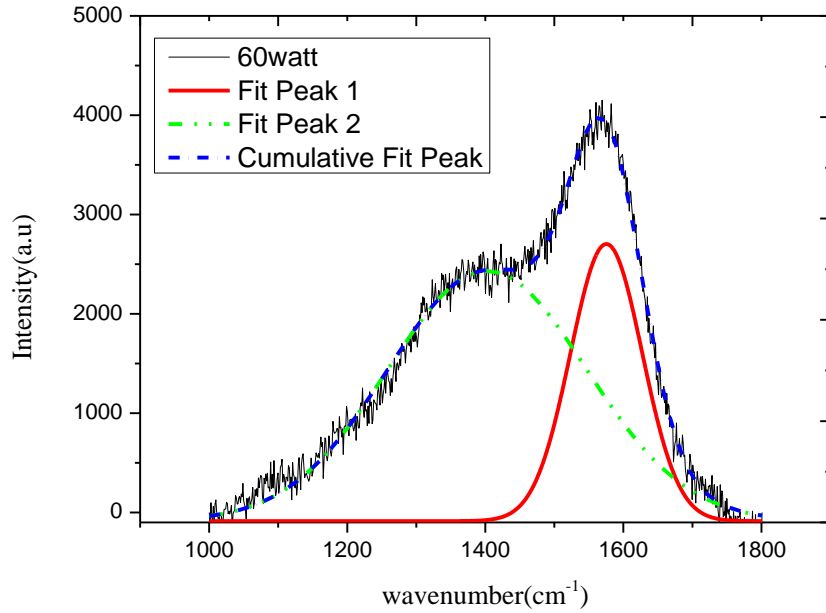


شکل ۱-۴: نمودار آهنگ لایه نشانی بر حسب توان

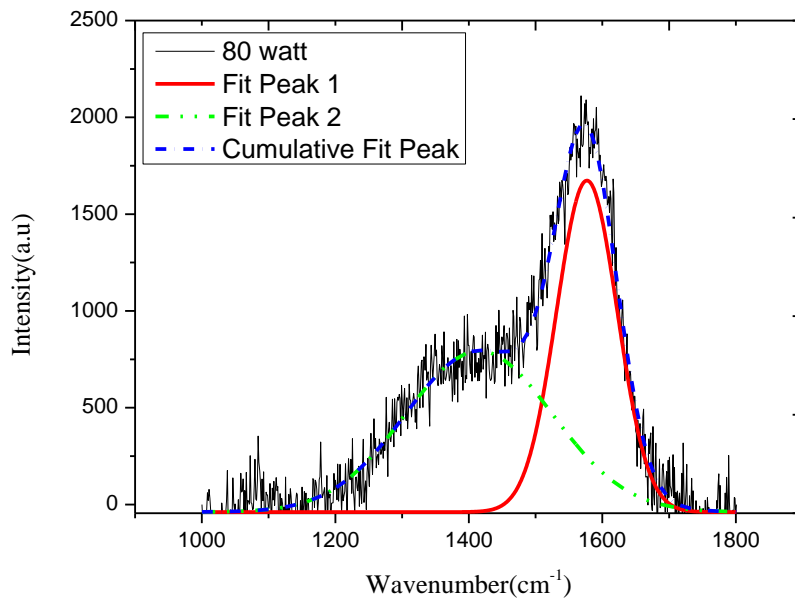
۲-۲-۴ طیف سنجی رامان

در نمودار شکل‌های زیر طیف رامان برای توان‌های ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ وات رسم شده است که هر

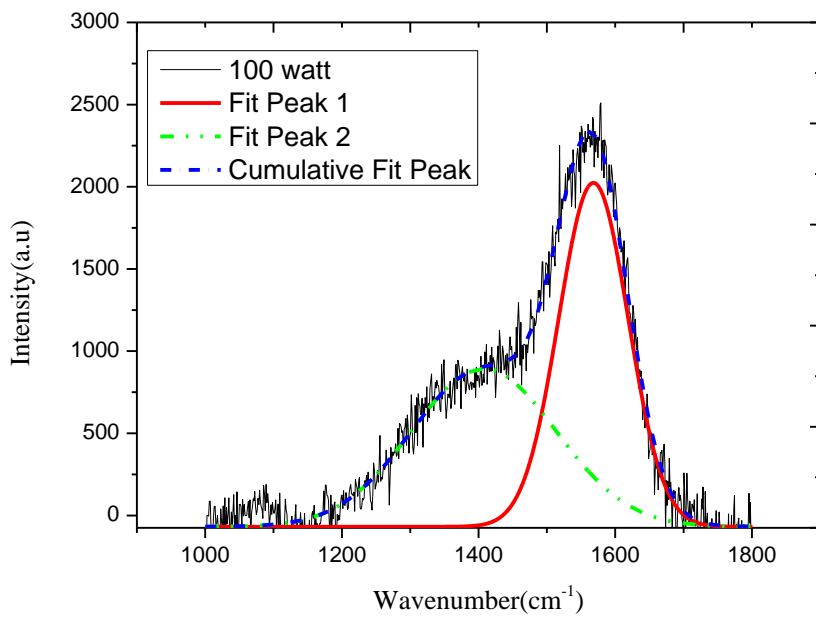
قله‌ی پهن طیف را به وسیله‌ی دو فیت گاوسی به دو زیر قله تبدیل کرده و نسبت مساحت زیرین آن‌ها و همچنین محل پیک G مشخص شده است [۵۱].



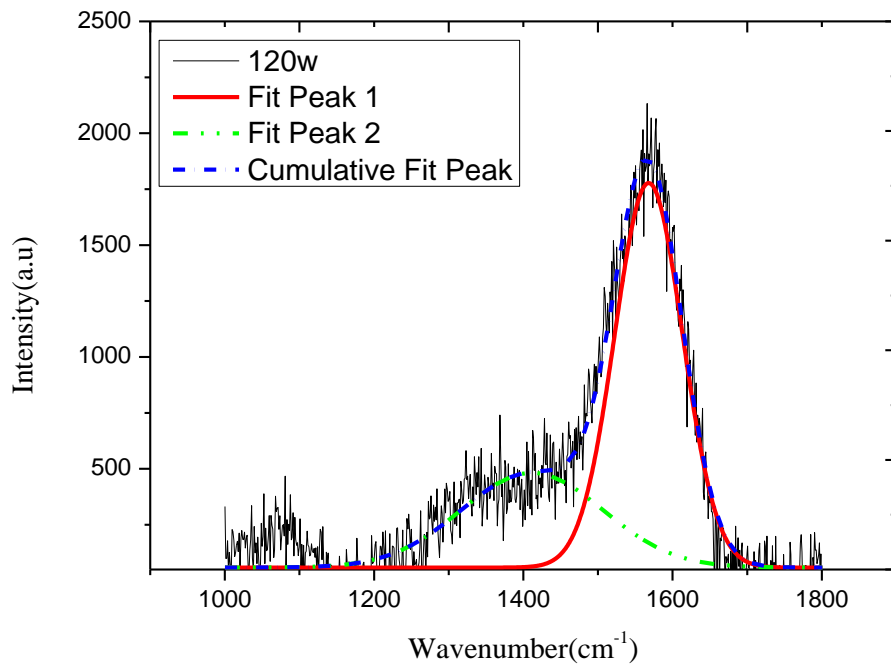
شکل ۴-۲: طیف رامان نمونه‌ی ۶۰ وات



شکل ۴-۳: طیف رامان نمونه‌ی ۸۰ وات

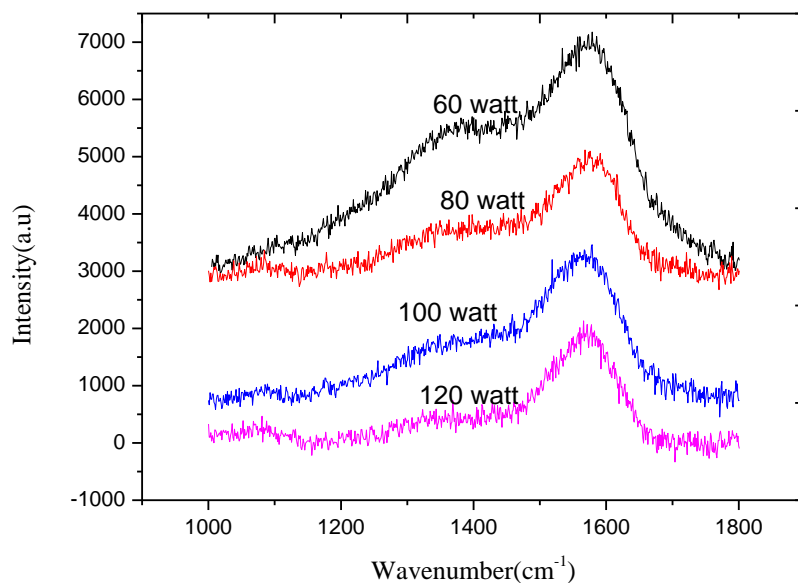


شکل ۴-۴: طیف رامان نمونه‌ی ۱۰۰ وات

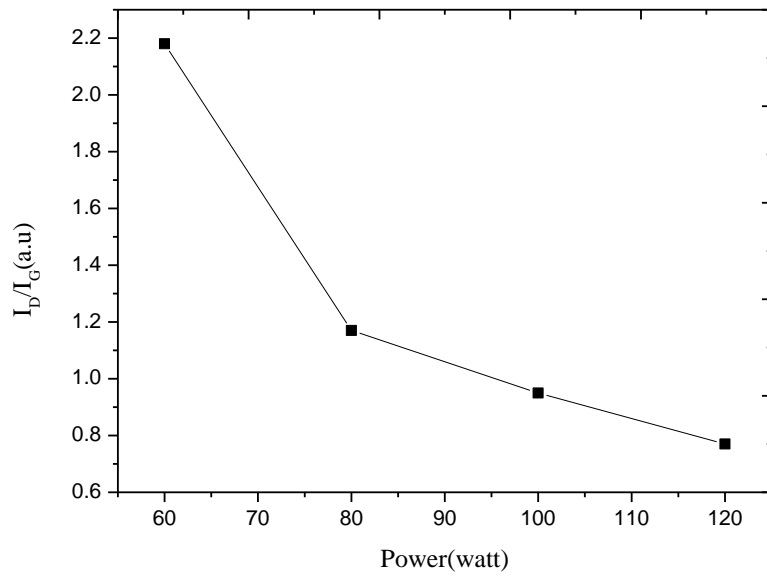


شکل ۴-۵: طیف رامان نمونه‌ی ۱۲۰ وات

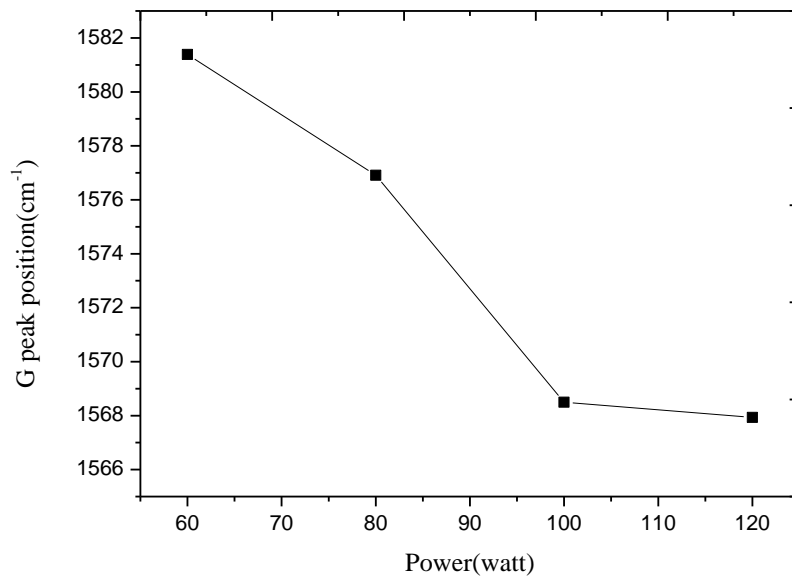
در شکل ۴-۶ طیف‌های رامان که در توان‌های مختلف بر روی یکدیگر قرار گرفته اند مشاهده می‌شود. با استفاده از فیت گوسی منحنی‌های رامان و محاسبه‌ی مساحت زیر فیت‌های گوسی برای پیک‌های D و G می‌توان ساختار و پیوندهای فیلم‌ها را بررسی کرد. مطابق با نمودارهای ۴-۷ و ۴-۸ با افزایش توان لایه نشانی نسبت $\frac{I_D}{I_G}$ و همچنین مکان پیک G کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش توان، پیوندهای گرافیت گونه‌ی sp^2 کاهش و پیوندهای الماس گونه‌ی sp^3 افزایش می‌یابند. در قسمت گاف نواری به طور مفصل توضیح خواهد داده شد که با کاهش پیوندهای sp^2 ترازهای $\pi - \pi^*$ که در فیلم‌ای کربن شبه الماسی مسئول ایجاد گاف نواری اپتیکی هستند کاهش یافته و گاف نواری اپتیکی افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۶: طیف رامان در توان‌های مختلف



شکل ۴-۷: نمودار تغییرات شدت $\frac{I_D}{I_G}$ بر حسب توان



شکل ۴-۸: تغییرات مکان پیک G بر حسب توان

تغییر مقادیر پیوندهای sp^3 در این فیلم‌ها را می‌توان به خوبی به وسیله‌ی مدل زیر کاشت^۱ توصیف کرد. بر اساس این مدل تبدیل پیوندهای sp^2 به sp^3 در آمورف‌های کربنی می‌تواند به وسیله‌ی انرژی برخوردی گونه‌های کربنی توصیف گردد. زمانی که انرژی یک گونه‌ی برخوردی کمتر از انرژی آستانه‌ی نفوذ به سطح فیلم باشد، این ذره نمی‌تواند به سطح فیلم نفوذ کند. در نتیجه این گونه‌ها فقط بر روی سطح فیلم پراکنده شده و در سطح انرژی پایین خود که همان پیوند sp^2 است باقی می‌مانند. اما در شرایط دیگر اگر انرژی گونه‌ی کربنی برخوردی بیش از انرژی آستانه‌ی نفوذ بر روی سطح فیلم باشد، این گونه‌ی برخوردی انرژی دار توانایی اینکه در داخل سطح فیلم نفوذ کند را دارد و در مکان بینابینی زیر سطح فیلم نفوذ می‌کند. این موضوع باعث افزایش چگالی موضعی می‌گردد. اتم‌های قرارگرفته در آن محل نیز بر اساس افزایش چگالی با اتم‌های مجاور خود باز ترکیب شده و پیوندهای جدید sp^3 را ایجاد می‌کنند [۳].

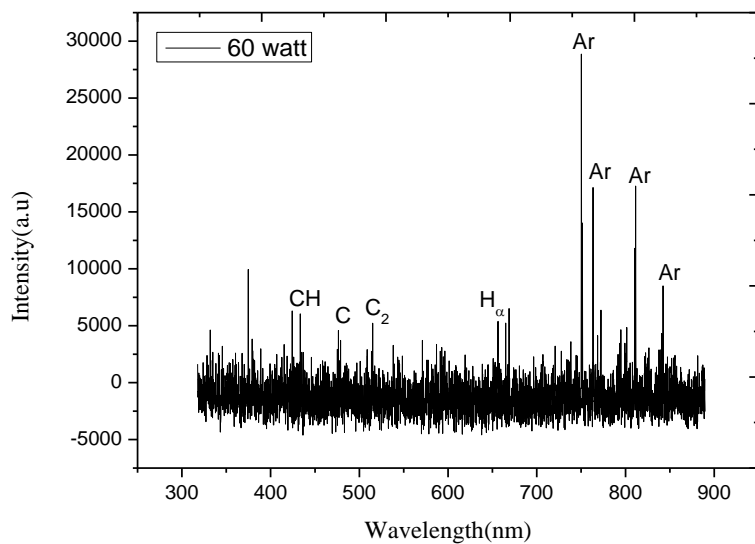
۴-۲-۳ طیف سنجی نشر نوری^۲ (OES)

طیف سنجی نشر نوری پلاسما به کمک دستگاه اسپکتروسکوپی AVANTES انجام می‌گیرد. با استفاده از طیف سنجی نشر نوری پلاسما می‌توان عناصر و بسیاری از پیوندهای موجود در پلاسما را شناسایی کرد و به ارتباط میان عناصر و پیوندهای فعال موجود در پلاسما و ساختار و پیوندهای فیلم‌ها مانند پیوندهای C_2 و C-H پی برد. در شکل‌های زیر نمودار نشر نوری پلاسما به ترتیب در توان‌های ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ وات و با شار ۸ sccm مشاهده می‌گردد. مشاهده می‌شود که با افزایش توان شدت پیک‌های OES افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه گاز آرگون جزو گازهای نجیب و در تناوب آخر جدول تناوبی است الکترون لایه‌ی آخر آن به سادگی جدا می‌گردد و این گاز به راحتی تبدیل به پلاسما

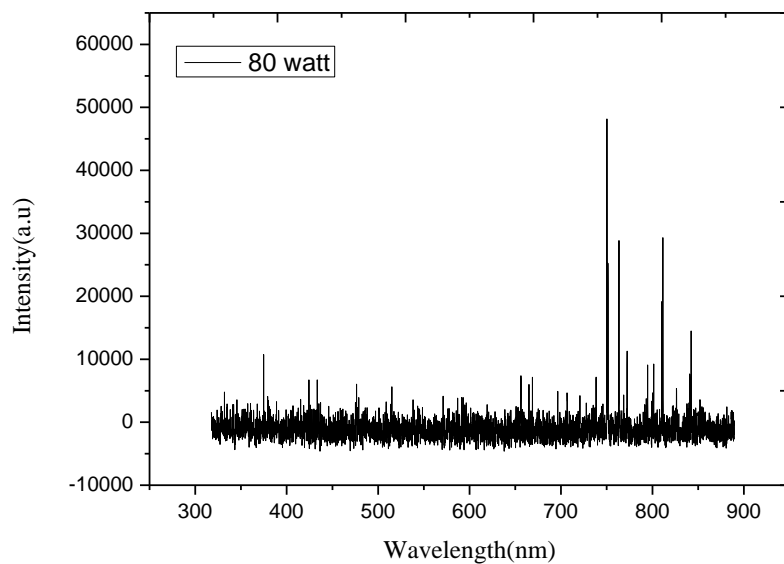
¹ Sub-plantation model

² Optical emission spectroscopy

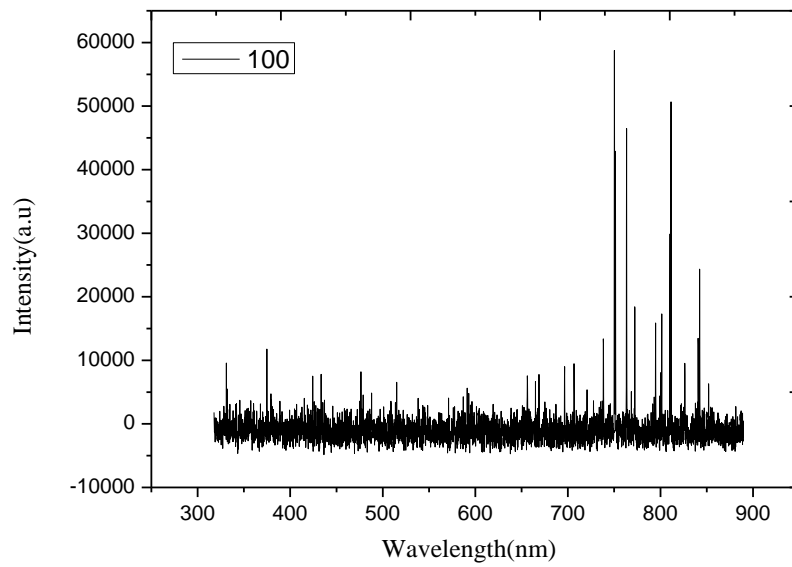
می‌گردد. با افزایش توان لایه نشانی، نرخ یونیزاسیون گاز آرگون افزایش می‌یابد و همانطور که در شکل‌ها مشاهده می‌گردد شدت پیک آن افزایش می‌یابد.



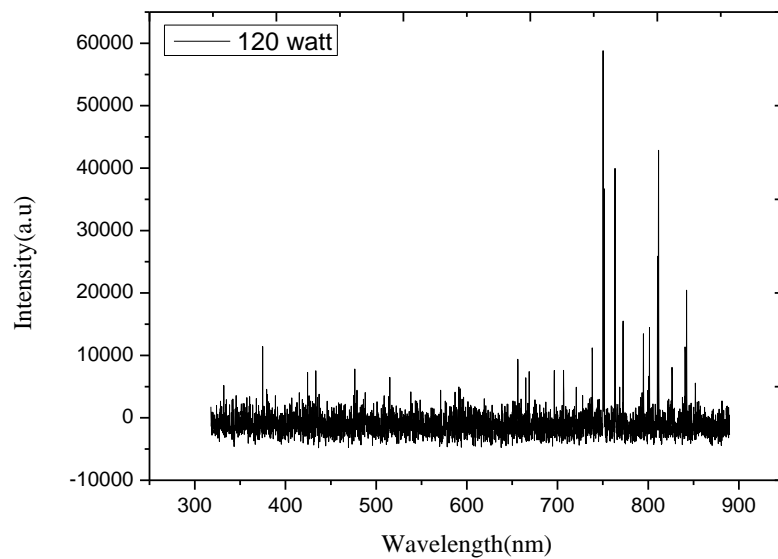
شکل ۴-۹: طیف نشر نوری پلاسما در توان ۶۰ وات



شکل ۴-۱۰: طیف نشر نوری پلاسما در توان ۸۰ وات



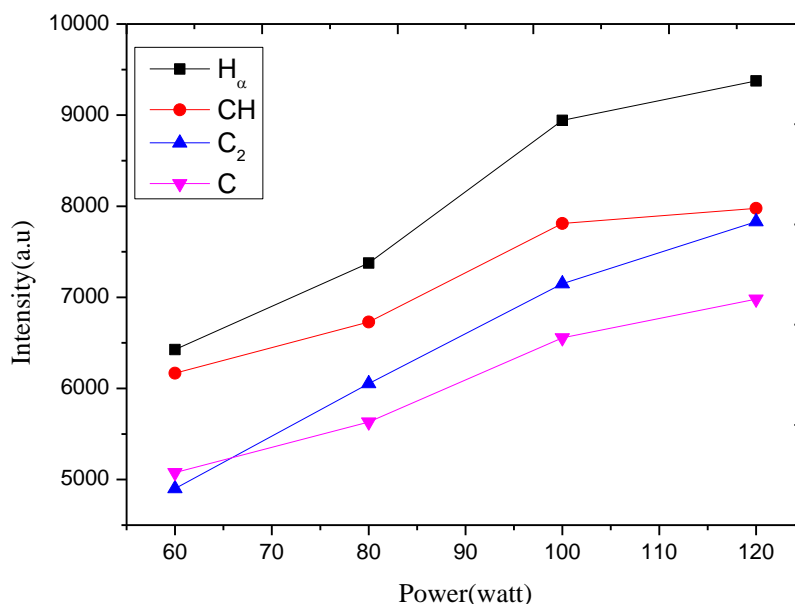
شکل ۴-۱۱: طیف نشر نوری پلاسما در توان ۱۰۰ وات



شکل ۴-۱۲: طیف نشر نوری پلاسما در توان ۱۲۰ وات

اما موردی را که می توان با استفاده از طیف سنجی پلاسمای محفظه مشاهده نمود افزایش شدت عناصر و ترکیب‌هایی مانند C , CH , C_2 و H_α است. افزایش پیوندهای CH در پلاسما منجر به افزایش این

پیوندها در فیلم شده که این امر باعث کاهش چگالی فیلمها و کاهش طیف ضریب شکست فیلمها می‌گردد. این موضوع در شکل ۴-۱۳ مشاهده می‌شود.



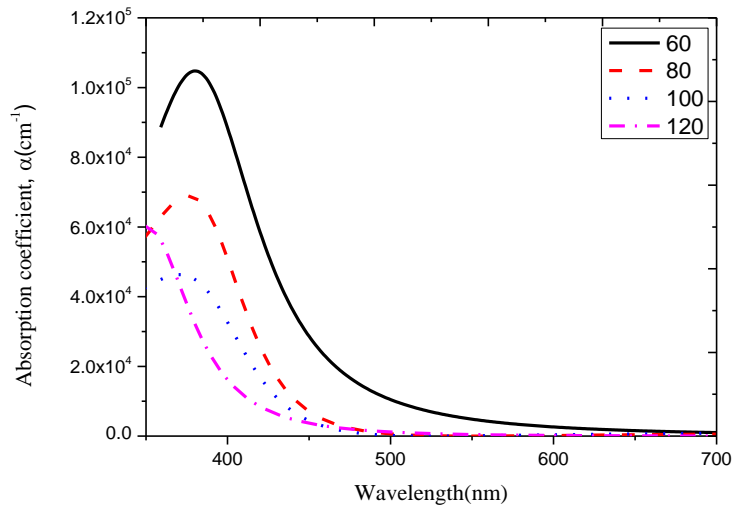
شکل ۴-۱۳: تغییرات شدت طیف برخی از عناصر و پیوندها بر حسب توان

۴-۲-۴ خواص اپتیکی

۴-۲-۴-۱ طیف جذب

با استفاده از ضریب خاموشی می‌توان ضریب جذب فیلمها (α) را محاسبه نمود. در شکل ۴-۱۴ طیف ضریب جذب فیلمها در بازه‌ی طول موج ۷۵۰-۳۰۰ نانومتر رسم شده و مشاهده می‌شود که با افزایش توان جذب اپتیکی فیلمها کاهش می‌یابد. اندازه‌گیری جذب اپتیکی عموماً برای مشخص کردن ویژگی‌های الکترونیکی مواد و فیلمها استفاده می‌شود. محاسبه‌ی ضریب جذب می‌تواند بسیاری از خواص نوری فیلمها را مانند گاف نواری، نوار ظرفیت و عمر تراز برانگیخته را توصیف کند و همچنین مشخص می‌کند که این ویژگی‌ها می‌تواند به اختلال در شبکه‌ی مواد و آمورفاها و همچنین قدرت پیوندها و نقایص آنها مربوط باشد [۴۳]. با افزایش توان، اندازه‌ی خوشه‌ها و درصد پیوندهای sp^2 کاهش یافته و

در نتیجه پیوندهای $\pi-\pi^*$ کاهش می‌یابند که این موضوع باعث کاهش جذب اپتیکی فیلم‌ها می‌گردد. گزارش جورجیوس^۱ و همکاران نیز نشان می‌دهد که با اضافه کردن عناصر فلزی مانند نقره و مس در آمورف‌های کربنی جذب اپتیکی این فیلم‌ها افزایش می‌یابد [۴۴].

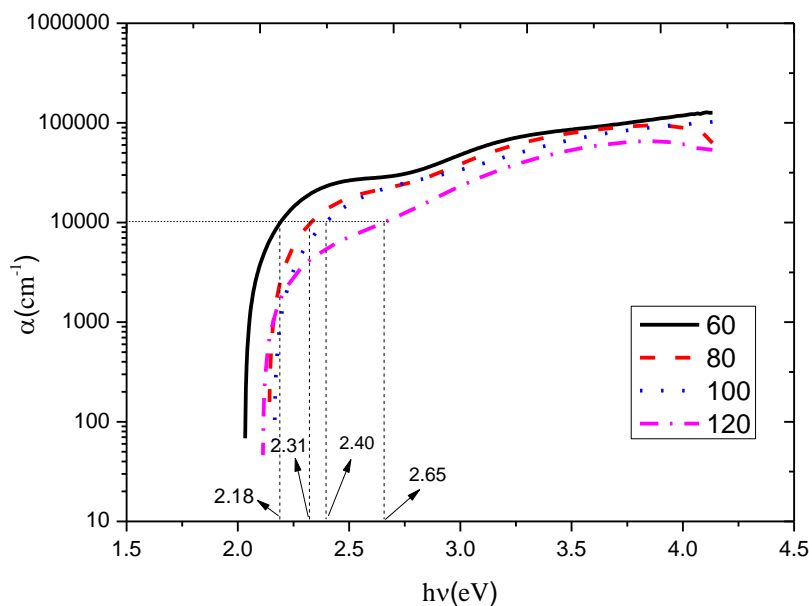


شکل ۴-۱۴: ضریب جذب بر حسب طول موج برای توانهای مختلف

۲-۴-۲-۴ گاف نواری اپتیکی

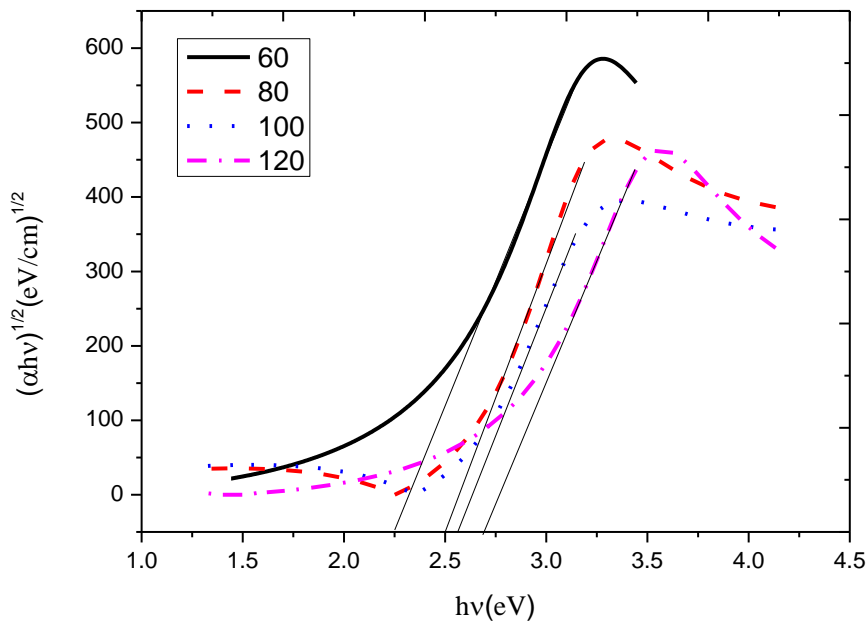
با استفاده از نمودار ضریب جذب بر حسب انرژی می‌توان گاف E_{04} را برای فیلم‌ها محاسبه کرد. گاف E_{04} برابر با انرژی است که در آن ضریب جذب برابر 10^4 cm^{-1} می‌باشد. برای محاسبه‌ی آن از نمودار لگاریتمی تابع در مبنای ۱۰ استفاده می‌کنیم. مشاهده می‌شود که با افزایش توان گاف E_{04} افزایش یافته و برای توان‌های ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ به ترتیب برابر با ۲/۱۸، ۲/۳۱، ۲/۴۰ و ۲/۶۵ الکترون ولت می‌باشد.

¹ Georgios



شکل ۴-۱۵: انرژی E₀₄ برای توان‌های متفاوت

گاف نواری گرافیت صفر و الماس بلوری در حدود ۵/۵ الکترون ولت است و پلیمری مانند پلی تن گافی در حدود ۶ الکترون ولت دارد. آمورف‌های کربنی بدون هیدروژن گافی در حدود ۲/۶-۲/۲ و آمورف‌های کربنی هیدروژن دار گافی بین ۴/۰-۱/۷ الکترون ولت دارند [۱]. همانطور که در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است برای به دست آوردن گاف نواری اپتیکی فیلم‌ها، از برونیایی قسمت خطی نمودار $(\alpha h\nu)^{1/2}$ بر حسب $h\nu$ استفاده می‌شود. ملاحظه می‌گردد که با افزایش توان، گاف نواری غیر مستقیم فیلم‌ها افزایش می‌یابد و برای توان‌های ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ به ترتیب برابر با ۲/۲۴، ۲/۵۰، ۲/۵۶ و ۲/۶۹ الکترون ولت است. تغییرات در ویژگی‌های اپتیکی فیلم‌های DLC کاملاً وابسته به تغییرات در ساختار ریز این فیلم‌ها است. ارتباط میان ویژگی‌های اپتیکی این فیلم‌ها و مقادیر نسبی پیوندهای هایبریدایز شده sp^2 - sp^3 را می‌توان به خوبی بر اساس مدل رابرتسون توصیف نمود. رابرتسون ساختار ریز فیلم‌های کربن شبه الماسی را به صورت خوشه‌هایی از پیوندهای sp^2 که درون شبکه‌هایی از پیوندهای ادامه دار sp^3 جاسازی شده‌اند توصیف کرد. مقدار و اندازه‌ی خوشه‌های sp^2 نقش مهمی را در تعیین ویژگی‌های اپتیکی فیلم‌ها ایفا می‌کند. اتم‌های کربن در ساختار sp^3 با چهار اتم همسایه‌ی خود پیوندهای محکم σ

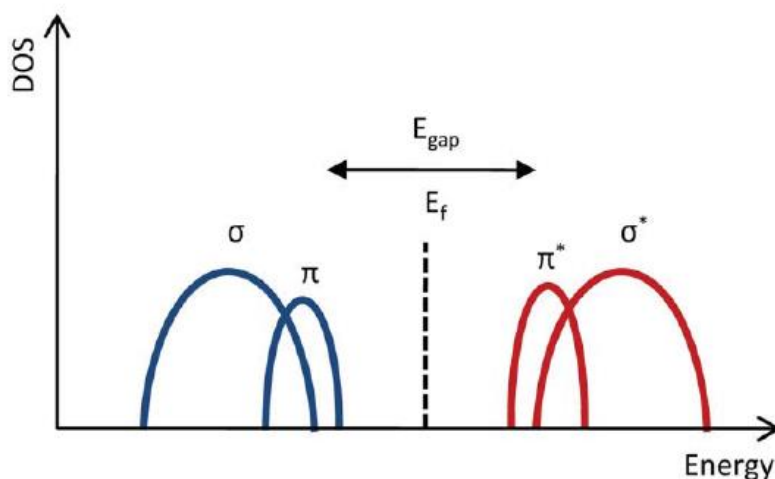


شکل ۴-۱۶: نمودار تاک برای محاسبه‌ی گاف نواری غیر مستقیم برای توان‌های مختلف

را تشکیل می‌دهند در حالیکه در ساختار sp^2 سه پیوند محکم σ و یک پیوند ضعیف π را تشکیل می‌دهند. پیوندهای σ ترازهای σ پر شده در نوار ظرفیت، و ترازهای خالی σ^* را در نوار رسانش تشکیل می‌دهند که به وسیله‌ی گاف بزرگ $\sigma-\sigma^*$ از یکدیگر جدا شده‌اند. به طور مشابه پیوندهای π ترازهای π پر را در نوار ظرفیت و ترازهای خالی π^* را در نوار رسانش تشکیل می‌دهند که به وسیله‌ی گاف کوچکتر $\pi-\pi^*$ از یکدیگر جدا شده‌اند. این موضوع در نمودار چگالی ترازها (DOS)^۱ در تصویر ۴-۱۷ نشان داده شده است و به طور تجربی در جاهای دیگر با استفاده از اندازه‌گیری‌های طیف سنجی فرابنفش الکترون تایید شده است. به دلیل گاف نواری کوچکتر، ترازهای $\pi-\pi^*$ گاف نواری غالب را در فیلم‌های DLC تشکیل می‌دهند. کاهش اندازه‌ی خوشه‌های کربنی sp^2 باعث افزایش گاف نواری می‌گردد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که جفت پیوندهای اندک $\pi-\pi^*$ و مقادیر اندک پیوندها و خوشه‌های sp^2 در فیلم‌ها باعث کاهش الکترون‌های اشتراکی می‌گردد. در نتیجه انرژی گذار و گاف نواری میان

^۱ Density of states

جفت پیوندهای $\pi-\pi^*$ افزایش می‌یابد. بنابراین با کنترل مقادیر نسبی خوشه‌های sp^2 در فیلم‌های آمورف کربنی به وسیله‌ی کنترل شرایط لایه نشانی مانند توان DC، می‌توان خواص اپتیکی و کاربردهای مورد نیاز این فیلم‌ها را به دست آورد [۴۵].

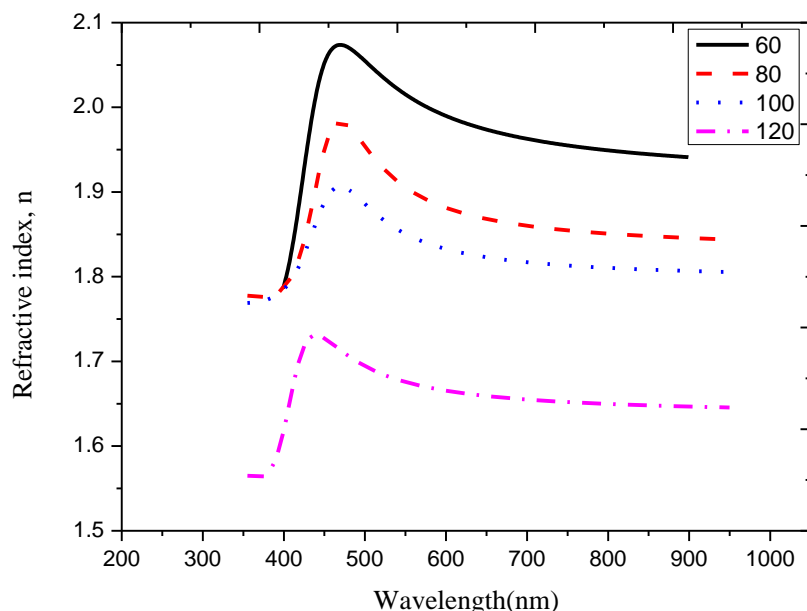


شکل ۴-۱۷: چگالی ترازها در فیلم‌های DLC بر اساس مدل رابرتسون [۴۵]

۴-۲-۳-۴ ضریب شکست

بدون شک یکی از مهمترین خواص نوری لایه های نازک ضریب شکست آن‌ها می‌باشد. فیلم‌های کربن شبه الماسی و آمورف‌های کربنی بسته به مقادیر عناصر و پیوندهای آن‌ها بخصوص مقادیر هیدروژن دارای طیف ضریب شکست متفاوتی هستند. ضریب شکست الماس کریستالی در طول موج ۵۵۰ نانومتر در حدود ۲/۴ و ضریب خاموشی آن نزدیک به صفر است. در همین طول موج ضریب شکست گرافیت حدود ۲/۷ و ضریب خاموشی آن ۱/۴۸ است. ضریب شکست برای فیلم‌های DLC بدون هیدروژن چگال در طول موج ۵۵۰ نانومتر در حدود ۲/۶-۲/۰ است اما به دلیل مقدار مشخص ضریب خاموشی این فیلم‌ها در ناحیه‌ی مرئی نسبتاً مات هستند. فیلم‌های DLC هیدروژن دار ضریب شکست کمتری (کمتر از ۱/۸ در طول موج ۵۵۰ نانومتر) و به طور طبیعی ضریب خاموشی کمتری دارند. یک نمونه‌ی مهم از مواد هیدروژن دار پلیمرها مانند پلی تن هستند که ضریب شکستی در حدود ۱/۵۱ و ضریب خاموشی در حدود صفر دارند. این موضوع در بسیاری از مقالات گزارش شده است که بدون وارد کردن گاز

هیدروژن در لایه نشانی فیلم‌های کربن شبه الماسی، به دلیل تبخیر جزئی بخار آب در محفظه‌ی لایه نشانی فیلم‌ها حاوی هیدروژن و پیوندهای C-H می‌شوند [۱]. بنابراین این طور می‌توان تحلیل نمود که با افزایش توان لایه نشانی، مقدار هیدروژن در فیلم‌ها افزایش می‌یابد و باعث ایجاد پیوندهای پایدار sp^3 از نوع C-H می‌گردد. این موضوع باعث کاهش چگالی فیلم‌ها و در نتیجه کاهش ضریب شکست فیلم‌ها می‌گردد. در توان‌های بالاتر، فیلم‌ها بیشتر خاصیت پلیمری پیدا کرده و دارای ضریب شکست و خاموشی کمتری می‌گردد. افزایش هیدروژن، باعث تبدیل شدن پیوندهای sp^2 به پیوندهای sp^3 از نوع $=CH_2$ و یا $\equiv CH$ می‌گردد. در نمودار شکل ۴-۱۸ طیف ضریب شکست فیلم‌ها مشاهده می‌شود. ضریب شکست فیلم‌های کربن شبه الماسی حداقل تا حدی به افزایش ترازهای $\pi-\pi^*$ وابسته است. همچنین افزایش ضریب شکست فیلم‌ها می‌تواند به دلیل افزایش چگالی فیلم‌ها با کاهش مقادیر هیدروژن باشد. همچنین باید توجه داشت که حدود تغییرات در ویژگی‌های اپتیکی آمورف‌های کربنی با تغییر ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها متناظر است



شکل ۴-۱۸: طیف ضریب شکست برای توان‌های مختلف

در گذشته این موضوع گزارش شده است که در نیمه رساناها با کاهش ضریب شکست، گاف نواری افزایش می‌یابد. از طرفی سان^۱ و همکارانش نشان دادند که در فیلم‌های DLC ضریب شکست و گاف نواری بطور معکوس با یکدیگر تغییر می‌کنند [۴۶]. اولین پیشنهاد در مورد ارتباط میان ضریب شکست و گاف نواری توسط موس در سال ۱۹۵۰ بر اساس این اصل که ترازهای انرژی در یک جامد توسط فاکتور $\frac{1}{\epsilon^2_{opt}}$ کاهش می‌یابند که در آن $\epsilon_{opt} = n^2$ ، ثابت دی الکتریک ماده است. موس با استفاده از داده‌های جمع آوری شده از جامدات مختلف رابطه‌ی زیر را ارائه داد.

$$\frac{n_0^4}{\lambda_g} = 77 \mu m^{-1} \quad (۱-۴)$$

رابطه‌ی موس^۲ را می‌توان برحسب گاف نواری به صورت زیر نوشت.

$$n_0^4 E_g = 95 eV \quad (۲-۴)$$

اخیرا راویندرا و اسریواستا^۳ بر اساس تحلیل داده‌ها برای مقدار ثابت مقدار جدیدی را پیشنهاد کردند.

$$n_0^4 E_g = 108 eV \quad (۳-۴)$$

با استفاده از مطالعه‌ی تعداد زیادی از مواد، راویندرا و همکارانش یک رابطه‌ی تجربی با فرم خطی را به دست آوردند.

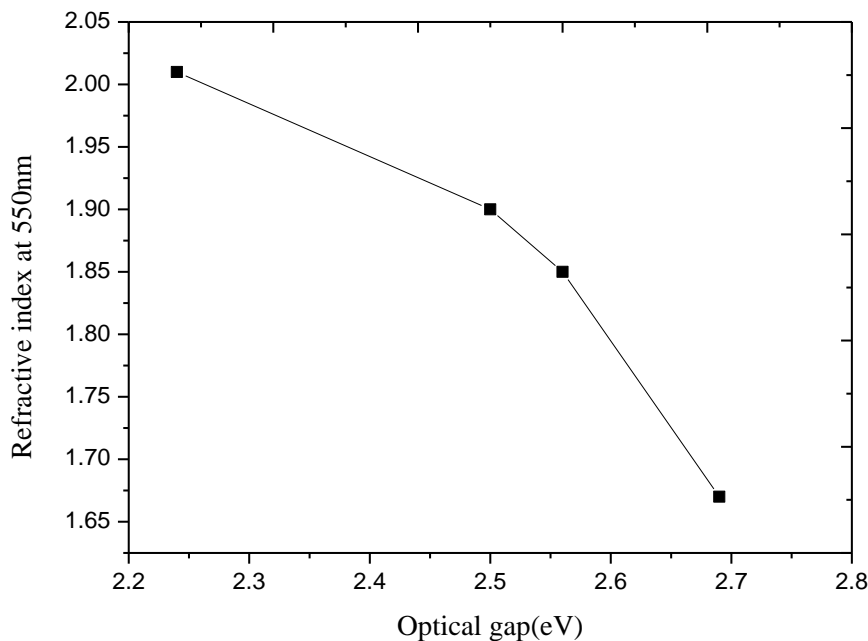
$$n_0 = 4.084 - 0.62 E_g \quad (۴-۴)$$

این روابط عموماً نشان می‌دهند که ضریب شکست و گاف نواری ارتباط عکس دارند [۴۷].

¹ Sun et al

² Moss relation

³ Ravindra and Srivastava



شکل ۴-۱۹: ارتباط میان ضریب شکست و گاف نواری

۴-۴-۲-۴ ضریب خاموشی

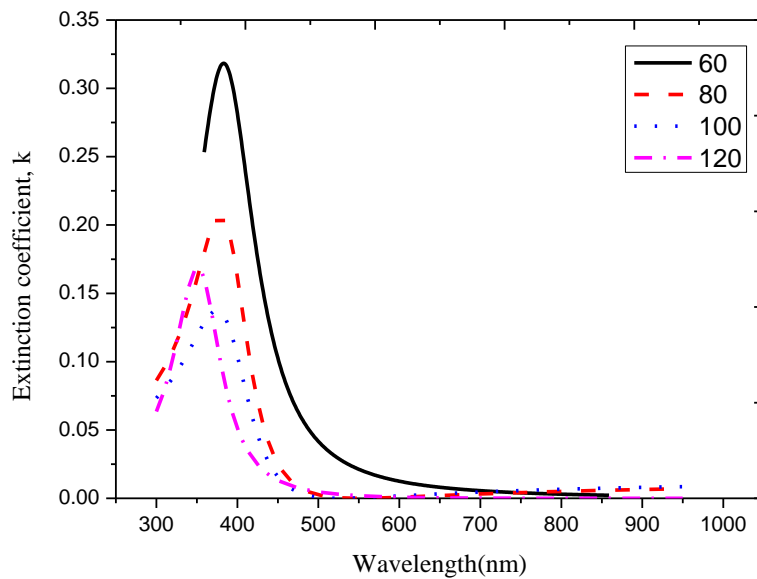
ضریب خاموشی میرایی یک موج الکترومغناطیس که در یک محیط منتشر می شود را نشان می دهد. مطابق با رابطه ی زیر ضریب خاموشی (k) برابر با قسمت موهومی ضریب شکست است.

$$n^* = n + ik \quad (۵-۴)$$

در شکل ۴-۲۰ طیف ضریب خاموشی بر حسب طول موج و برای توان های متفاوت نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش توان، ضریب خاموشی کاهش می یابد. ضریب خاموشی مطابق با رابطه ی ۴-۶ با ضریب جذب ماده رابطه ی مستقیم دارد [۴۵].

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (۶-۴)$$

در واقع با توجه به اینکه با افزایش توان، درصد پیوندهای گرافیت گونه ی sp^2 کاهش می یابد، در نتیجه جفت پیوندهای $\pi^*-\pi$ کاهش یافته و جذب اپتیکی و مطابق آن میرایی موج کاهش می یابد.



شکل ۴-۲۰: نمودار طیف ضریب خاموشی فیلم‌ها در توان‌های مختلف

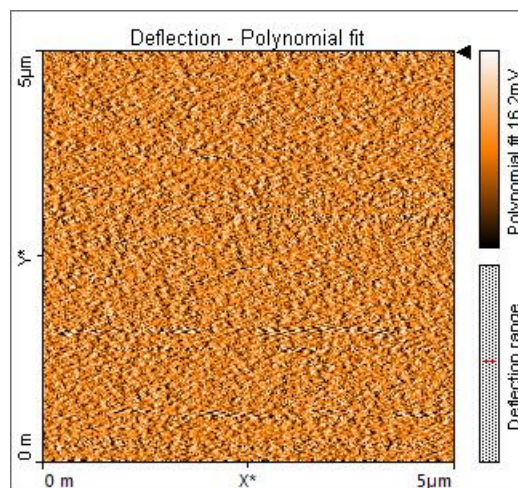
۴-۲-۵ زبری و توپوگرافی سطح

یکی از ویژگی‌های مهم فیلم‌های کربن شبه الماسی این است که می‌توانند با سطح بسیار صاف تولید و لایه نشانی شوند. برای بسیاری از کاربردهای صنعتی، توپوگرافی دقیق سطح اهمیت بسیار زیادی دارد. برای مثال بسیاری از کاربردهای اپتیکی، الکترونیکی و پزشکی وجود دارند که در آن‌ها یک سطح بسیار نرم مناسب است. دلایل محکمی وجود دارد که بیان می‌کند که توپوگرافی آمورف‌های کربنی با نسبت sp^3/sp^2 رابطه‌ی کلی دارد. در این پایان‌نامه زبری فیلم‌ها و توپوگرافی سطح آن‌ها به وسیله‌ی میکروسکوپ نیروی اتمی در مد تماسی و بر حسب توان محاسبه شده‌اند. در شکل‌های ۴-۲۱ تصاویری از توپوگرافی سطح فیلم‌های لایه نشانی شده در توان‌های مختلف و در مقیاس $5 \times 5 \mu m^2$ مشاهده می‌شود. در نمودار شکل ۴-۲۲، S_q^1 (مقدار متوسط زبری) بر حسب توان‌های مختلف ترسیم شده است و مشاهده می‌شود که با افزایش توان، زبری متوسط فیلم‌ها کاهش می‌یابد. اثرات مشاهده شده را می‌توان بر اساس پدیده‌های اساسی که بر توپوگرافی سطح موثر هستند و به شرایط لایه نشانی وابسته اند توجیه کرد. در توان

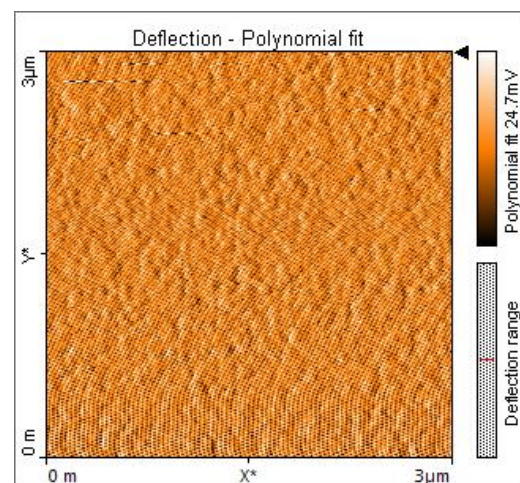
¹ Root mean square amplitude

پایین تر به دلیل اینکه انرژی ذرات و اتم‌های کربن کم است این اتم‌ها بر روی لایه‌های فیلم پخش می‌شوند و خوشه‌های بزرگ و منظم sp^2 ایجاد می‌کنند که از نظر ساختار پایدار ترمودینامیکی بسیار به فاز گرافیتی شبیه هستند. بنابراین افزایش این خوشه‌ها در توان پایین تر به دلیل پدیده‌ی پخش باعث می‌شود که فیلم‌ها در توان‌های پایین تر زبرتر باشند. از طرف دیگر زمانی که انرژی یک یون یا اتم برخوردی (E_{im}) بیشتر از انرژی جابه جایی اتم سطح (E_d) باشد این یون یا اتم می‌تواند به داخل سطح نفوذ کند. تحت این شرایط، پدیده‌ی پخش بر روی سطح فیلم اتفاق نمی‌افتد و یون یا اتم در داخل حجم نسبتاً بزرگی در سطح جای می‌گیرد. بنابراین در این حالت و با نفوذ اتم داخل سطح مورفولوژی سطح نسبتاً بدون تغییر می‌ماند و باعث ساختار چگال تر و شبه الماسی تر و نرم تر می‌گردد. این موضوع به طور الگو وار در شکل ۴-۲۳ نشان داده شده است. در واقع در توان‌های بالاتر اتم‌های کربن قابلیت نفوذ به داخل لایه‌های فیلم را دارند و زبری سطح به نسبت توان پایینتر کمتر می‌شود.

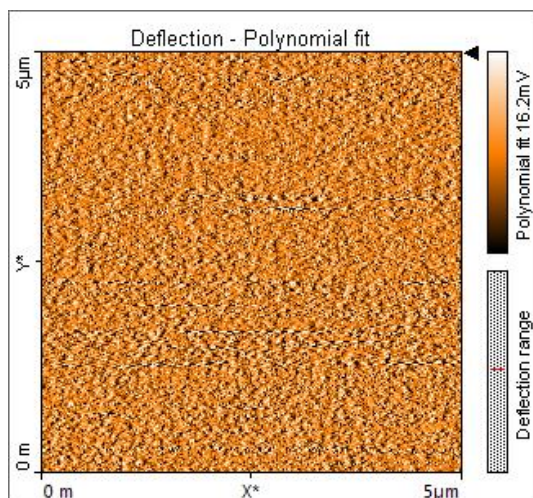
(ب)



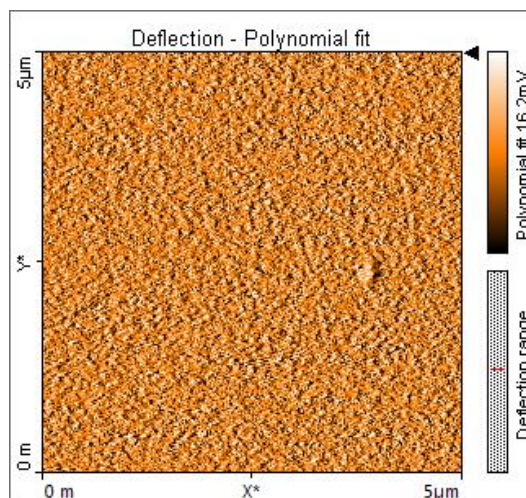
(الف)



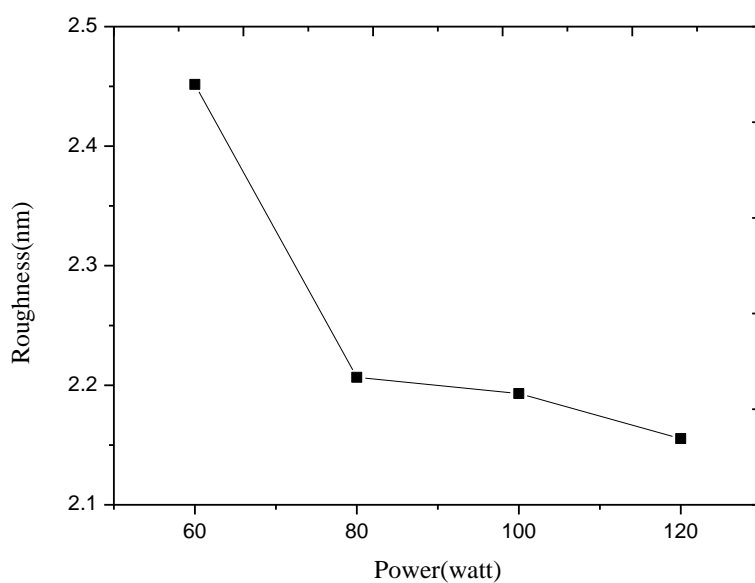
(د)



(ج)



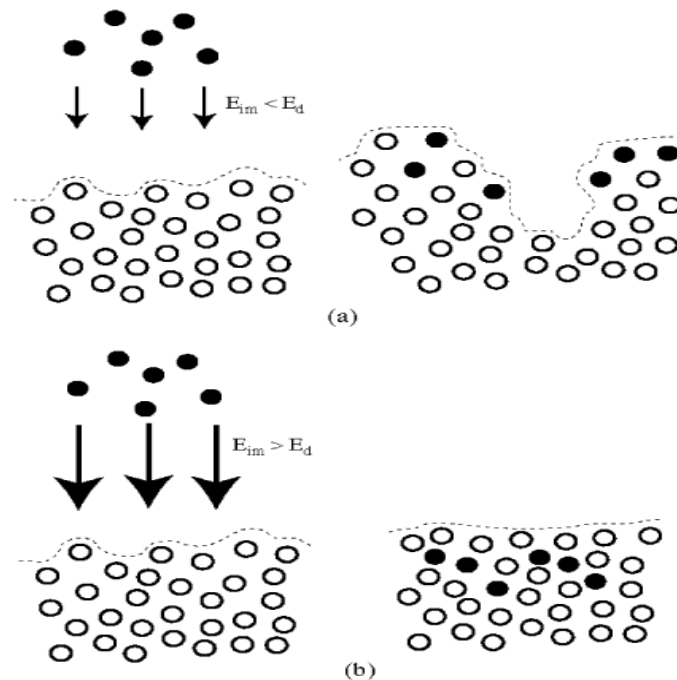
شکل ۴-۲۱: الف) توپوگرافی ۶۰ وات، ب) توپوگرافی ۸۰ وات، ج) توپوگرافی ۱۰۰ وات، د) توپوگرافی ۱۲۰ وات



شکل ۴-۲۲: زبری متوسط فیلمها بر حسب توان

پدیده‌ی دیگری که بر روی مورفولوژی سطح فیلمها اثر گذار است حکاکی و کندوپاش خود سطح فیلم است. این پدیده به خصوص در لایه نشانی به روش کندوپاش اثر زیادی دارد. اتمها و یونهای دارای انرژی می‌توانند لایه‌های نازک لایه نشانی شده‌ی ابتدایی را کندوپاش کرده و از طرفی یونهای آرگون باز پراکنده شده نیز می‌توانند برآمدگی‌های روی سطح را از بین ببرند. این پدیده باعث نرم تر شدن

سطح فیلم می‌گردد. با افزایش توان لایه نشانی کندوپاش، برخوردها و انرژی جنبشی ذرات و یون‌های داخل محفظه بیشتر می‌شود و در نتیجه نرخ کندوپاش خود سطح فیلم نیز افزایش می‌یابد و طی آن زبری فیلم‌ها کاهش می‌یابد [۴۸].



شکل ۴-۲۳: (a) انرژی ذرات فرودی از انرژی جابجایی اتم‌های سطح کمتر است و اتم‌ها بر روی سطح پخش شده و با افزایش خوشه‌های sp^2 زبری سطح افزایش می‌یابد. (b) انرژی ذرات فرودی بیشتر از انرژی جابجایی سطح است و اتم‌ها به داخل سطح نفوذ کرده و مورفولوژی سطح تغییر زیادی نمی‌کند. [۴۸]

۴-۳ بررسی اثر شار گاز آرگون

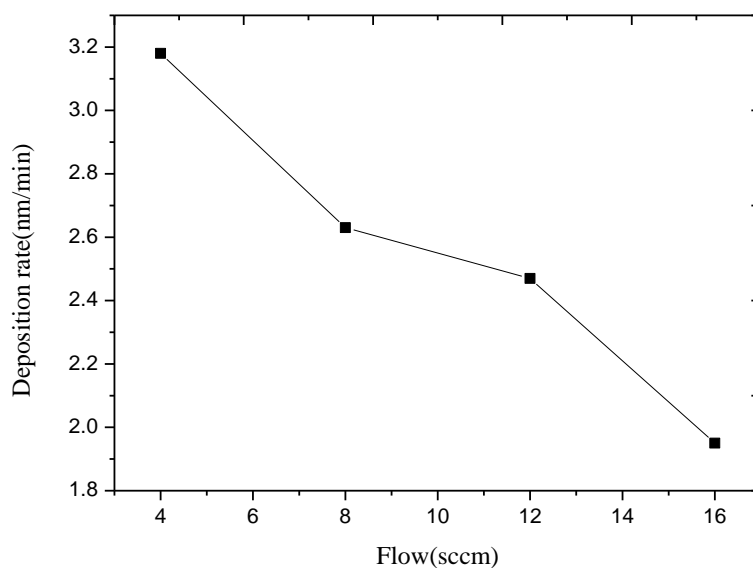
۴-۳-۱ آهنگ لایه نشانی

در این قسمت پژوهش اثر شار گاز آرگون بر خواص اپتیکی و ساختاری فیلم‌ها بررسی شده است. فیلم‌های نازک در شارهای ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ sccm و در توان ۱۰۰ وات لایه نشانی شده‌اند. محدوده‌ی ضخامت فیلم‌ها در حدود ۱۷۰-۱۳۷ نانومتر است. در جدول ۴-۲، شار، توان، ضخامت، زمان و فشار لایه نشانی آورده شده است. در شکل ۴-۲۴ آهنگ لایه نشانی برای شارهای متفاوت ترسیم شده است و مشاهده می‌شود که با افزایش شار، نرخ لایه نشانی فیلم‌ها کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش شار گاز

آرگون، تعداد ذرات و گازهای درون محفظه افزایش یافته و برخوردهای میان اتم‌های کندوپاش شده‌ی کربن با ذرات و اتم‌های درون محفظه افزایش می‌یابد. این موضوع باعث می‌شود که در واحد زمان اتم‌های کمتری به سطح زیرلایه برسند و نرخ لایه نشانی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش شار، در ولتاژ ثابت جریان پلاسما افزایش می‌یابد. این موضوع به این دلیل است که با افزایش شار، برخوردها درون محفظه و طی آن فرایند یونیزاسیون گاز افزایش می‌یابد. و در نتیجه با افزایش شار تولید الکترون‌ها برای ورود به مدار و جریان الکتریکی افزایش می‌یابد.

جدول ۴-۲: توان، شار، فشار، زمان و ضخامت هر آزمایش در پارامتر شار گاز آرگون

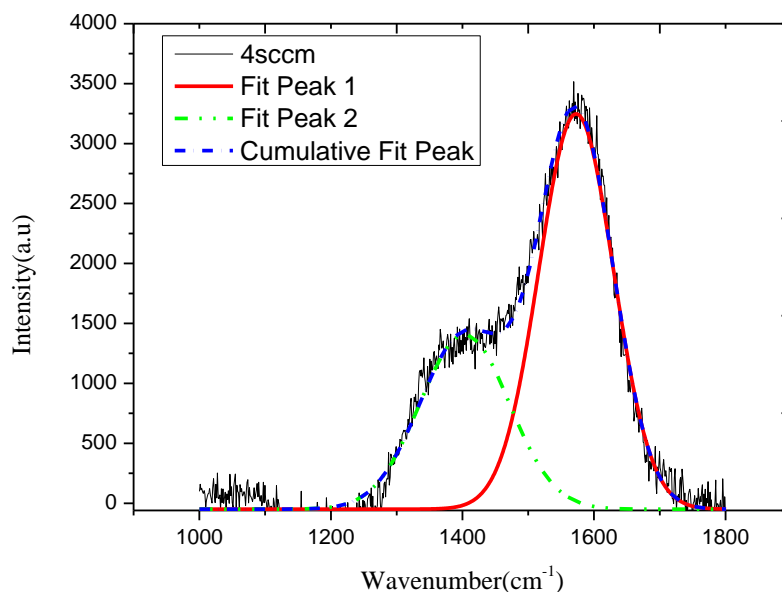
ضخامت (نانومتر)	زمان (دقیقه)	توان (watt)	فشار (میلی تور)	شار (sccm)	فیلم
۱۶۹/۱۳	۵۳	۱۰۰	۳۱	۴	۱
۱۶۱/۰۶	۶۱	۱۰۰	۴۵	۸	۲
۱۶۱/۷۱	۶۵	۱۰۰	۵۹	۱۲	۳
۱۳۷/۳۴	۷۰	۱۰۰	۷۳	۱۶	۴



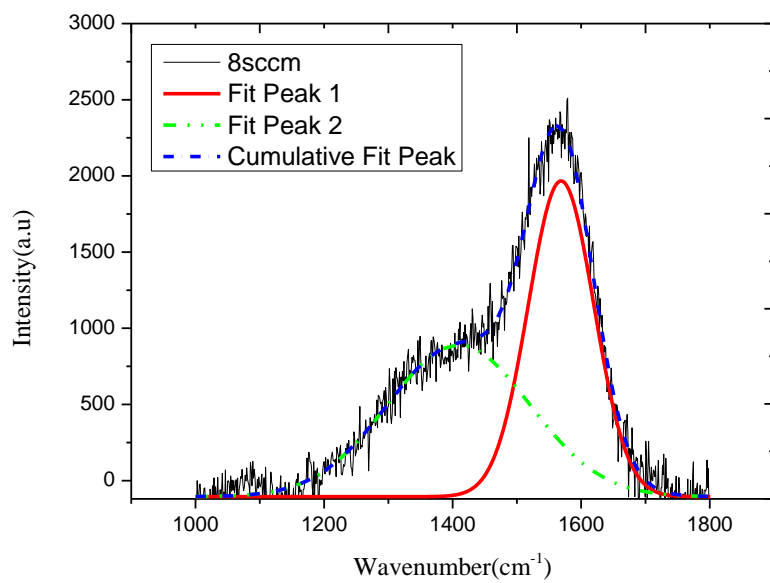
شکل ۴-۲۴: نرخ لایه نشانی برای شارهای مختلف

۴-۳-۲ آنالیز رامان

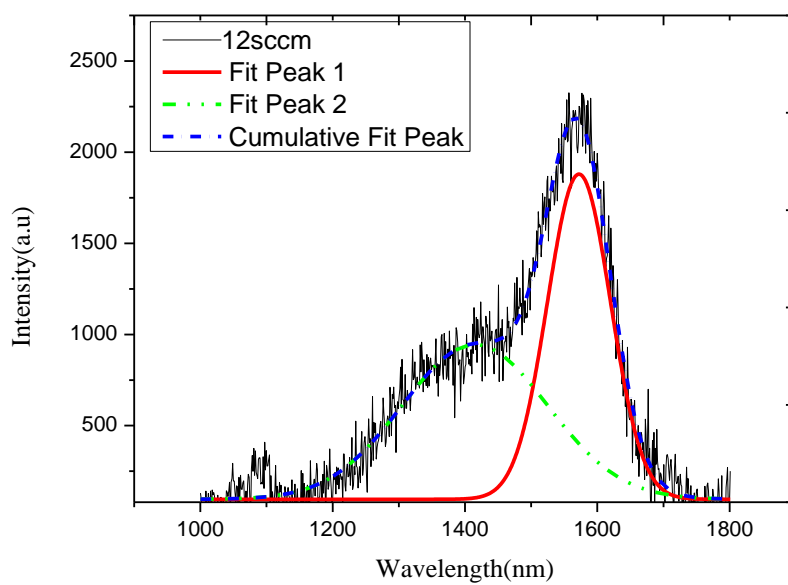
با استفاده از طیف سنجی رامان نمونه‌های آماده شده می‌توان تغییرات ساختار و پیوندهای sp^2 و sp^3 فیلم‌ها را بررسی کرد. با بررسی ساختار آمورف‌های کربنی می‌توان بسیاری از ویژگی‌های اپتیکی و الکترونیکی و همچنین مکانیکی این فیلم‌ها را مورد بررسی قرار داد. طیف سنجی رامان برای نمونه‌های آماده شده در شارهای ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ sccm نشان می‌دهند که با افزایش شار گاز آرگون نسبت شدت $\frac{I_D}{I_G}$ و همچنین مکان پیک G افزایش می‌یابد که این موضوع نشان دهنده‌ی کاهش پیوندهای sp^3 و به نوعی افزایش مقدار پیوندهای گرافیت گونه‌ی sp^2 می‌باشد. همانطور که در قسمت‌های قبلی بحث شد با افزایش پیوندهای sp^2 ترازهای $\pi-\pi^*$ که مسئول کنترل گاف نواری هستند افزایش می‌یابند و همچنین خوشه‌های گرافیتی نیز افزایش می‌یابند که این موضوع منجر به کاهش گاف نواری می‌گردد. در شکل-های زیر نمودار طیف‌های رامان نمونه‌ها در شارهای مختلف مشاهده می‌گردد.



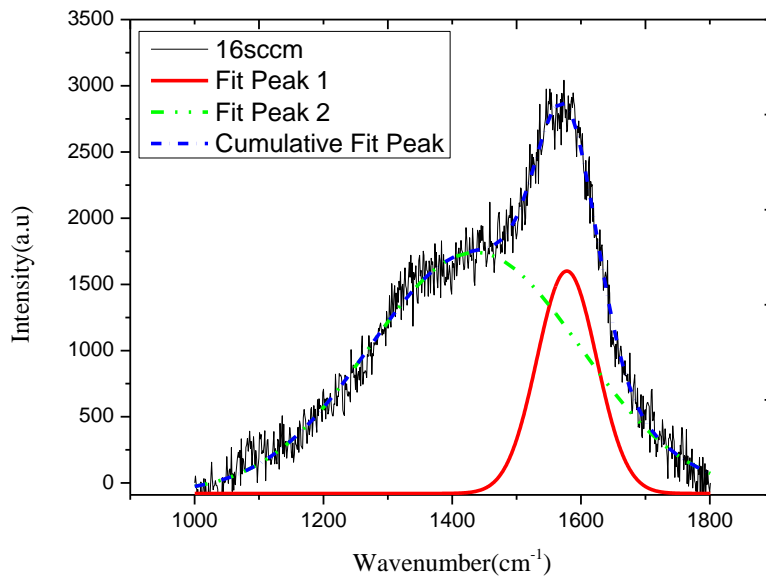
شکل ۴-۲۵: نمودار طیف رامان ۴ sccm



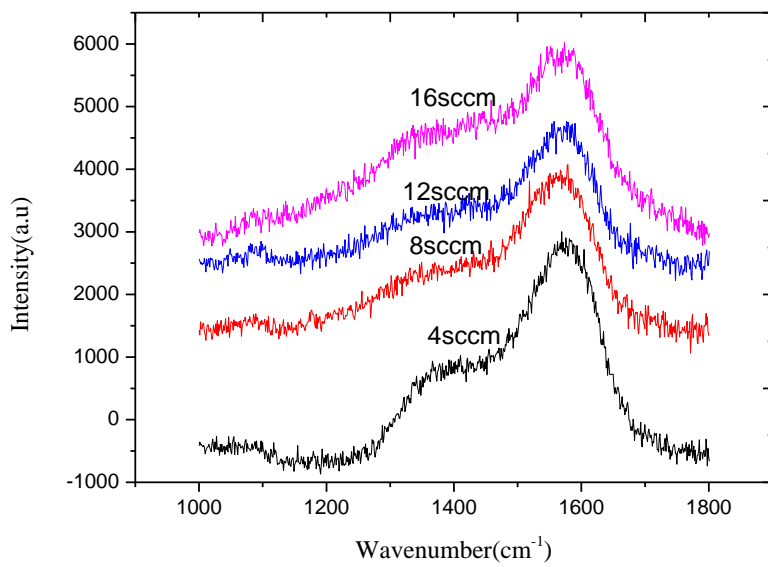
شکل ۴-۲۶: طیف رامان ۸ sccm



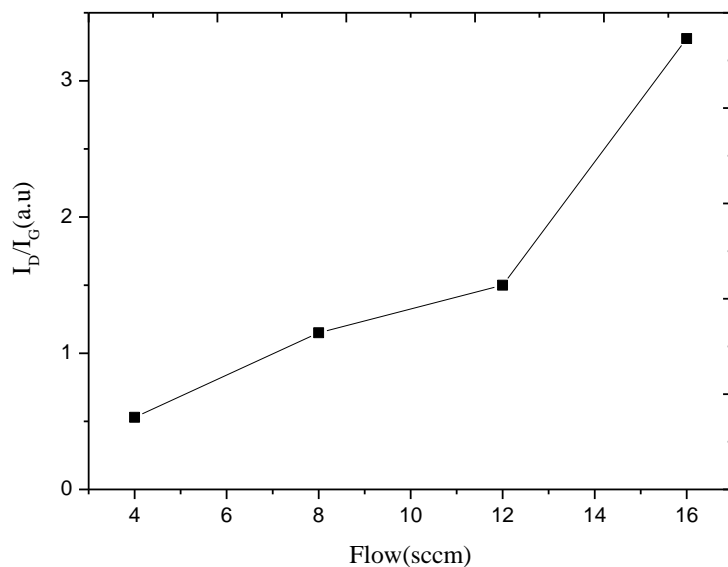
شکل ۴-۲۷: طیف رامان ۱۲ sccm



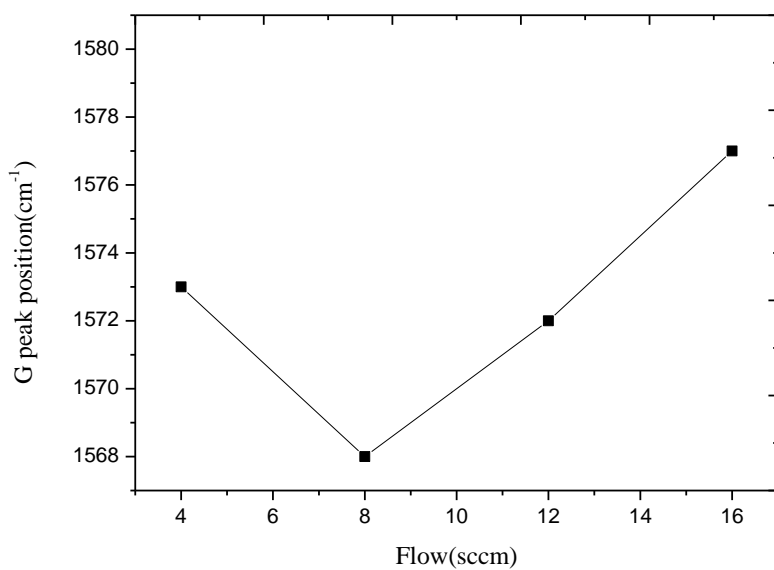
شکل ۴-۲۸: طیف رامان ۱۶ sccm



شکل ۴-۲۹: طیف رامان در شارهای مختلف



شکل ۴-۳۰: شدت نسبی I_D/I_G ، افزایش این شدت نشان دهنده‌ی کاهش مقادیر sp^3 است.



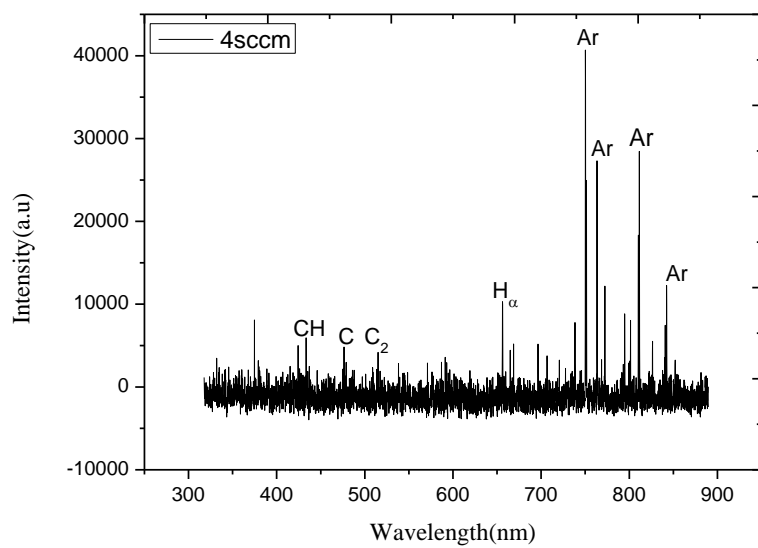
شکل ۴-۳۱: تغییرات پیک G در شارهای مختلف

با توجه به نمودارهای شدت I_D/I_G و همچنین مکان پیک G مشاهده می‌گردد که با افزایش شار گاز آرگون مقدار پیوندهای sp^3 کاهش و پیوندهای sp^2 افزایش می‌یابند. این موضوع را نیز به خوبی می‌توان بر اساس مدل زیر کاشت توصیف و توجیه نمود. در شارهای کمتر مثلا ۴ sccm برخوردها در محفظه‌ی

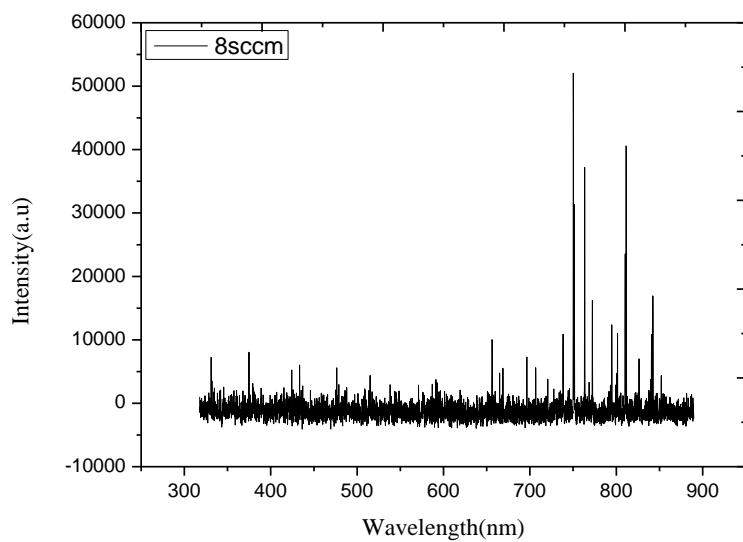
لایه نشانی بسیار کم است. برخوردهای کمتر میان ذرات باعث افزایش انرژی جنبشی ذرات می‌گردد و گونه‌های کربنی با انرژی بیشتری به سطح فیلم برخورد می‌کنند و اگر انرژی این ذرات به حدی باشد که از انرژی آستانه‌ی نفوذ سطح فیلم بیشتر باشد این گونه‌های کربنی به داخل سطح فیلم نفوذ می‌کنند. با نفوذ اتم‌ها به سطح زیرین فیلم با انرژی زیاد چگالی موضعی افزایش یافته و این موضوع باعث تبدیل پیوندهای sp^2 به sp^3 می‌گردد. اما با افزایش شار گاز آرگون فشار درون محفظه بیشتر شده و طی آن برخوردهای بین ذرات افزایش می‌یابد و انرژی جنبشی ذرات کاهش می‌یابد. این ذرات کم انرژی قادر به نفوذ به سطح زیرین فیلم نیستند و در همان حالت کمینه‌ی انرژی خود یعنی پیوندهای sp^2 باقی می‌مانند و خوشه‌هایی از پیوندهای گرافیت گونه‌ی sp^2 بر روی سطح فیلم ایجاد می‌کنند.

۴-۳-۳ طیف سنجی نشر نوری

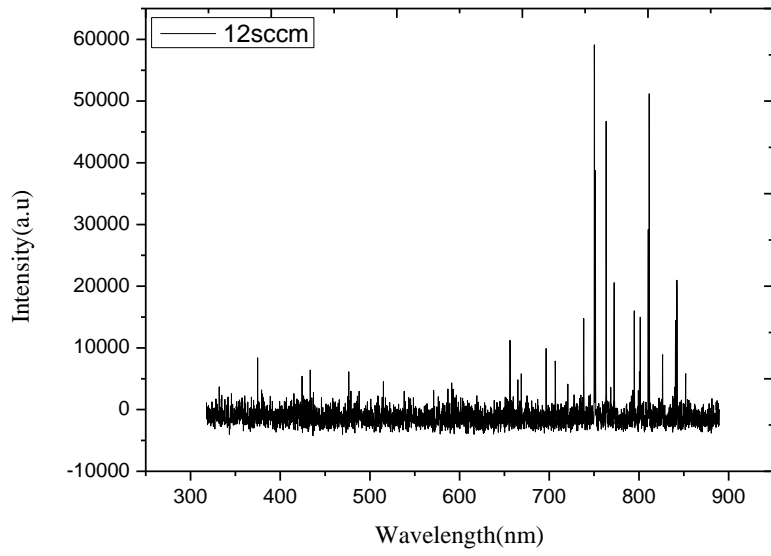
با استفاده از طیف سنجی نشر نوری پلاسما می‌توان پیوندهای غالب و ترکیبات درون پلاسما و متعاقب آن فیلم را بررسی نمود. در شکل‌های زیر نمودار طیف سنجی نوری پلاسما که در شارهای ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ sccm تولید شده اند مشاهده می‌گردد. با افزایش شار گاز آرگون برخوردهای میان اتم‌ها افزایش یافته و شدت یونیزاسیون گاز آرگون افزایش می‌یابد. این موضوع باعث افزایش شدت طیف گاز آرگون در پلاسما می‌گردد. مطابق با نمودار شکل ۴-۳۶ مشاهده می‌شود که با افزایش شار گاز درون محفظه شدت نسبی پیوندهای C-H درون پلاسما نسبت به آرگون کاهش می‌یابد. این کاهش نسبی پیوندهای هیدروژن دار در پلاسما بطور قطع بر ساختار و پیوندهای فیلم‌ها تاثیر مستقیم دارد و باعث افزایش چگالی فیلم‌ها و طی آن افزایش ضریب شکست فیلم‌ها می‌گردد. یعنی می‌توان گفت که فیلم‌های لایه نشانی شده در شار کمتر بیشتر ساختار پلیمری دارند و این فیلم‌ها حاوی مقادیر بیشتری از پیوندهای sp^3 به خصوص از نوع C-H می‌باشند.



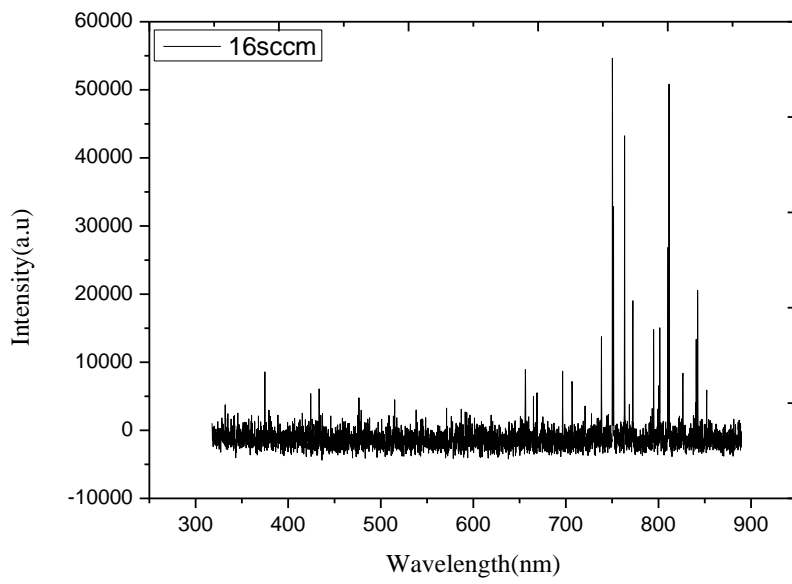
شکل ۴-۳: طیف نشر نوری پلاسما در شار ۴ sccm



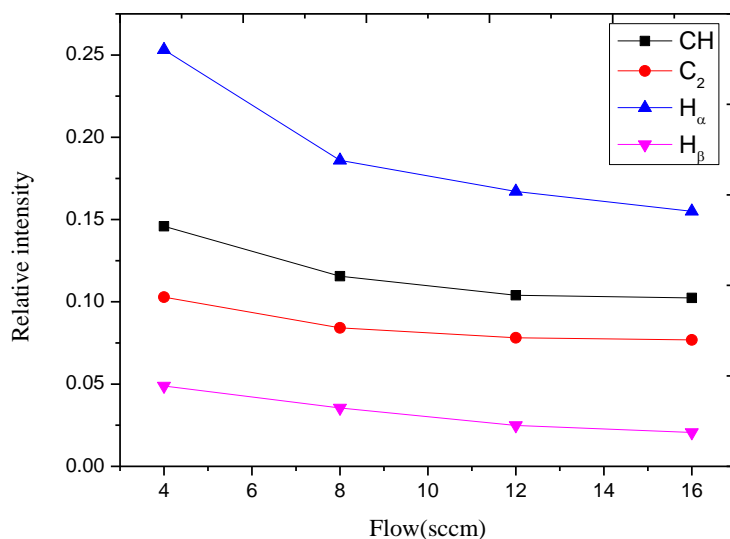
شکل ۴-۳: طیف نشر نوری پلاسما در شار ۸ sccm



شکل ۴-۳۴: طیف نشر نوری پلاسما در شار ۱۲ sccm



شکل ۴-۳۵: طیف نشر نوری پلاسما در شار ۱۶ sccm

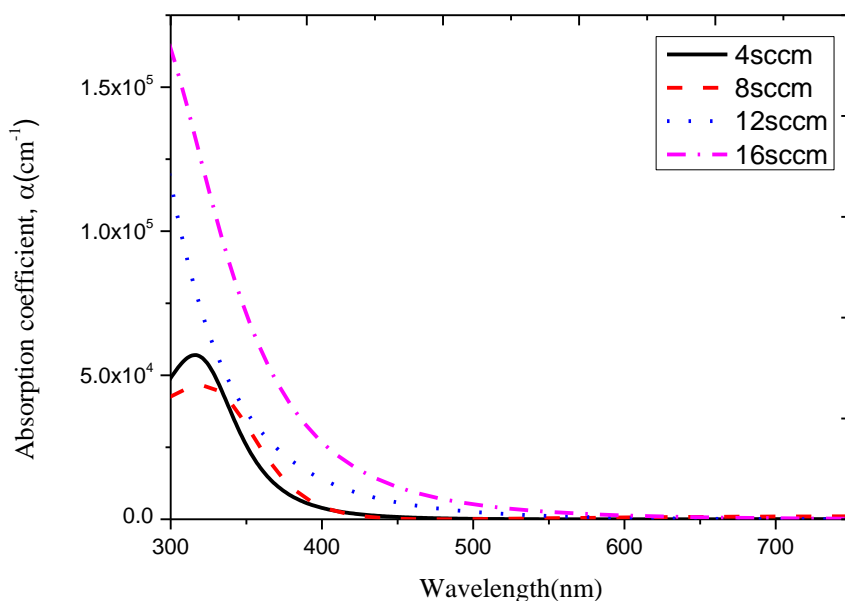


شکل ۴-۳۶: شدت نسبی برخی پیوندهای هیدروژن دار، مشاهده می‌شود که با افزایش شار گاز آرگون شدت نسبی پیوندهای هیدروژن دار کاهش می‌یابد. این موضوع می‌تواند باعث کاهش پیوندهای CH درون فیلم‌ها شود.

۴-۳-۴ خواص اپتیکی

۱-۴-۳-۴ ضریب جذب

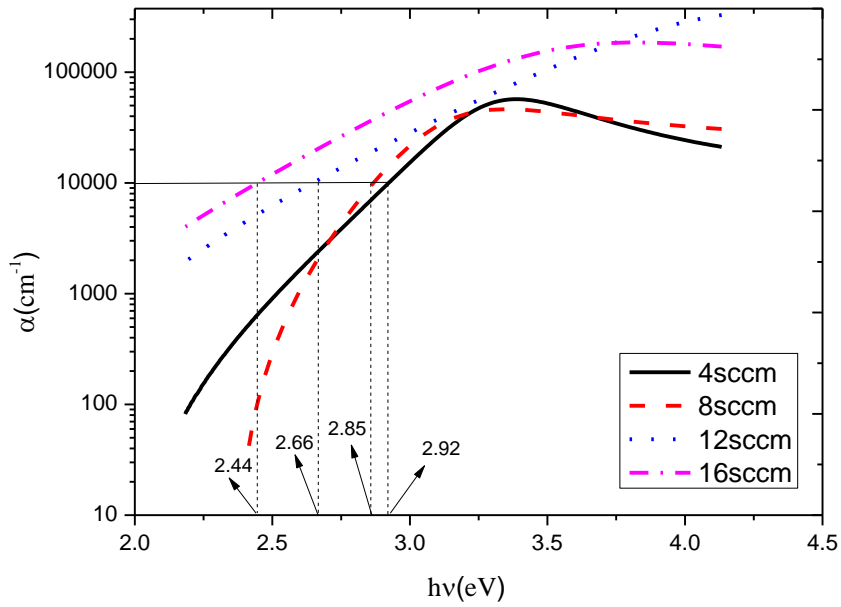
با استفاده از رابطه‌ی ۴-۶ ضریب جذب فیلم‌ها که در شارهای ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ sccm محاسبه می‌گردد. مشاهده می‌گردد که با افزایش شار گاز آرگون، ضریب جذب فیلم‌ها نیز افزایش می‌یابد. با افزایش شار گاز پیوندهای گرافیت گونه‌ی sp^2 در فیلم‌ها افزایش می‌یابند و در نتیجه پیوندهای $\pi - \pi^*$ که مسئول جذب اپتیکی در فیلم‌های کربن شبه الماسی هستند افزایش می‌یابند که این موضوع باعث افزایش جذب اپتیکی در فیلم‌ها می‌گردد.



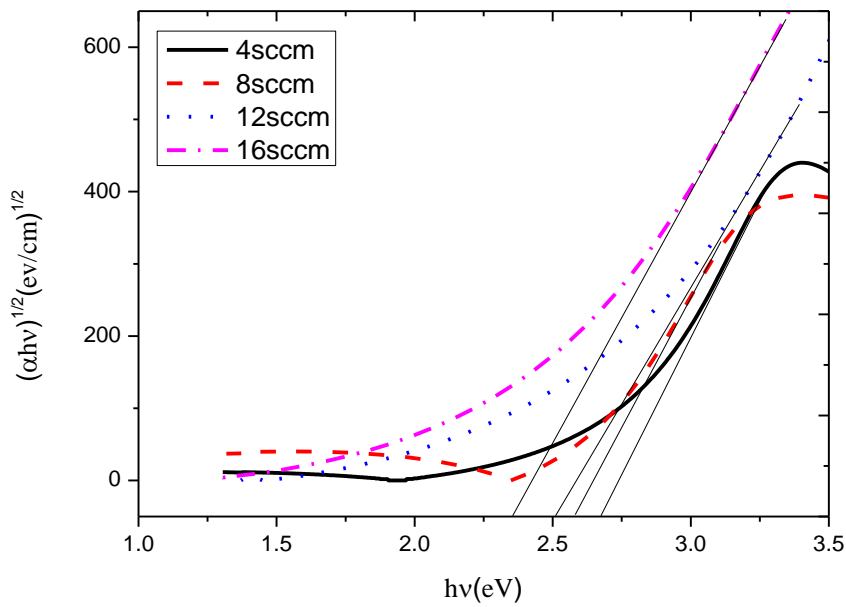
شکل ۴-۳۷: ضریب جذب اپتیکی فیلم‌ها در شارهای مختلف

۴-۳-۴ گاف نواری اپتیکی

گاف نواری E_{04} برابر است با مقدار انرژی که در آن ضریب جذب برابر با 10^4 cm^{-1} می‌باشد. مشاهده می‌گردد که با افزایش شار، گاف نواری E_{04} برای فیلم‌ها کاهش می‌یابد که این موضوع می‌تواند به افزایش پیوندهای sp^2 مرتبط باشد. گاف اپتیکی E_{04} برای شارهای ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ sccm به ترتیب برابر با ۲/۹۲، ۲/۸۵، ۲/۶۶ و ۲/۴۴ الکترون ولت است. از طرفی گاف نواری اپتیکی غیرمستقیم فیلم‌ها نیز با استفاده از برونیابی قسمت خطی نمودار رابطه‌ی تاک محاسبه می‌گردد و مشاهده می‌شود که گاف نواری غیر مستقیم فیلم‌ها نیز با افزایش شار آرگون کاهش می‌یابد و برای شارهای ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ sccm به ترتیب برابر با ۲/۶۷، ۲/۵۸، ۲/۵۱ و ۲/۳۵ الکترون ولت است.



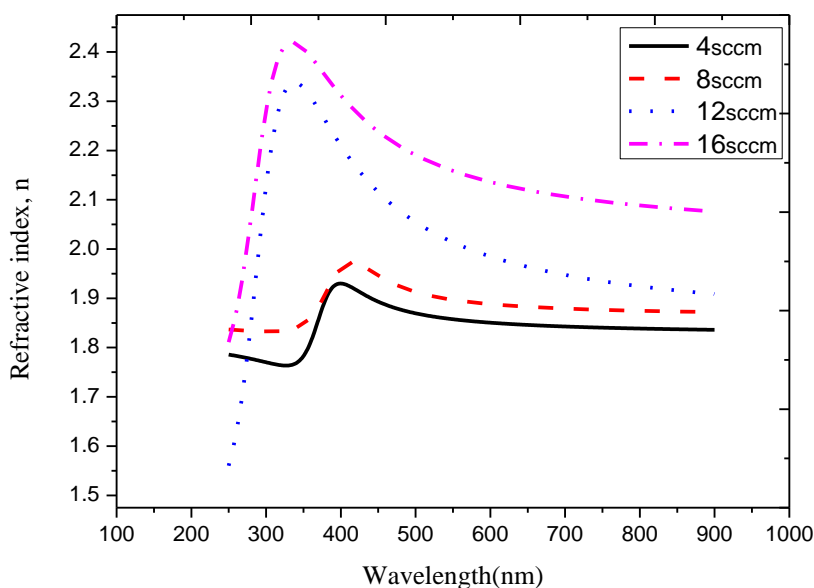
شکل ۳۸-۴: گاف نواری E₀₄ در شارهای متفاوت



شکل ۳۹-۴: نمودار تاک برای محاسبه‌ی گاف نواری غیر مستقیم در شار گاز آرگون مختلف

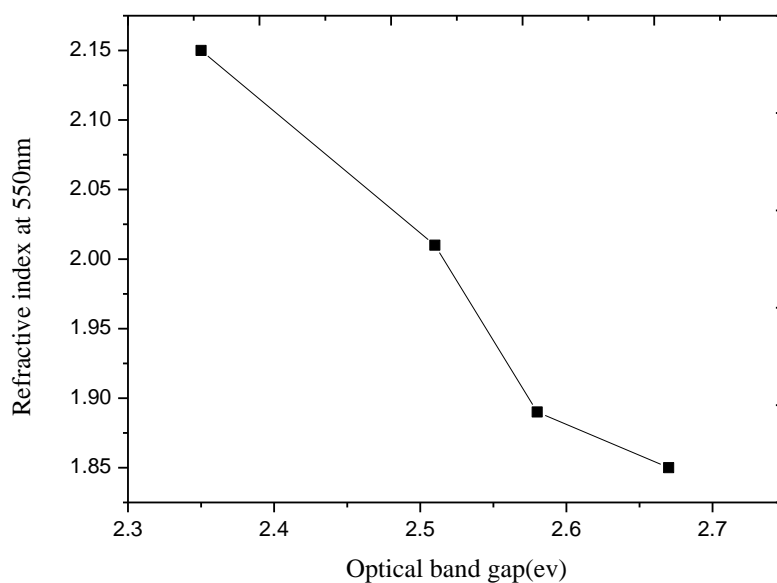
۳-۴-۳-۴ ضریب شکست

با استفاده از روش بیضی سنجی و فیت کردن مناسب دیتاها طبق مدل فروهی بلومر ضریب شکست فیلمها به صورت تابعی از طول موج محاسبه شده است. نمودار شکل ۴-۴۰ طیف ضریب شکست فیلمها را در شارهای ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ sccm به ترتیب نشان می‌دهد. مطابق با نمودار با افزایش شار گاز آرگون ضریب شکست فیلمها نیز افزایش می‌یابد. ضریب شکست فیلمها در طول موج ۵۵۰ نانومتر و در شارهای ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ sccm به ترتیب برابر با ۱/۱۸۵، ۱/۱۸۹، ۲/۰۱ و ۲/۱۵ است. این افزایش ضریب شکست می‌تواند ناشی از افزایش پیوندهای sp^2 و ساختار گرافیتی و افزایش ترازهای $\pi - \pi^*$ فیلمها باشد [۴۵] (در طول موج ۵۵۰ نانومتر ضریب شکست گرافیت در حدود ۲/۷۱ و الماس در حدود ۲/۴۲ است). از طرفی با افزایش شار گاز، مقدار هیدروژن نسبی درون پلاسما و همچنین درون فیلمها کاهش یافته و این موضوع باعث کاهش پیوندهای C-H در ساختار فیلمها می‌گردد. (کاهش نسبی مقادیر هیدروژن درون پلاسما در قسمت طیف سنجی پلاسما مورد بحث قرار گرفته است). کاهش مقادیر هیدروژن در فیلمها باعث افزایش چگالی و طی آن افزایش ضریب شکست فیلمها می‌گردد [۵۱].



شکل ۴-۴۰: طیف ضریب شکست فیلمها در شارهای مختلف

مطابق آن چه که در بخش ۴-۲-۳-۴ بیان شد طبق مدل‌ها و روابطی مانند موس و راویندرا معمولاً در فیلم‌های نازک نیمه رسانا ضرایب شکست و گاف نواری اپتیکی با یکدیگر ارتباط عکس دارند که در قسمت قبل و در بحث پارامتر توان این موضوع بررسی شد. مطابق نمودار ۴-۴۱ مشاهده می‌گردد که ضرایب شکست و گاف نواری در این قسمت یعنی بررسی پارامتر شار گاز آرگون نیز با یکدیگر رابطه‌ی معکوس دارند.

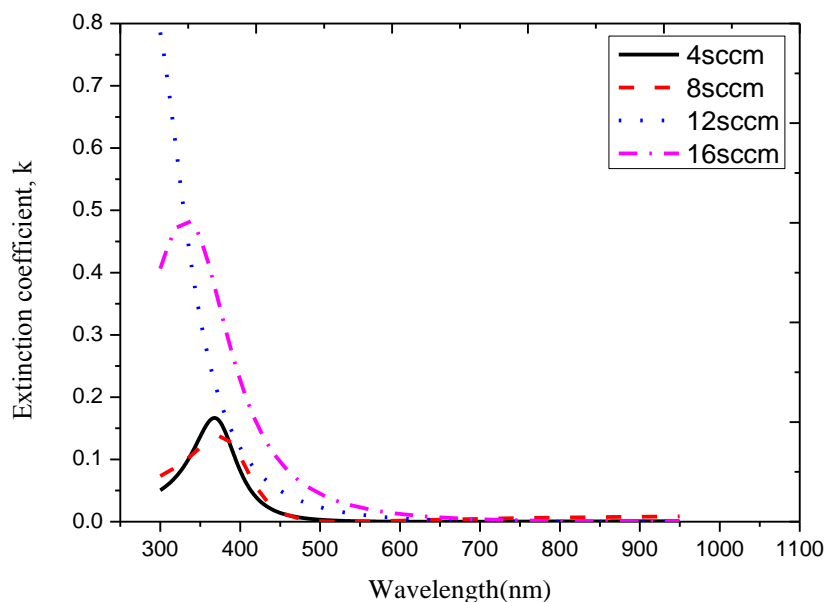


شکل ۴-۴۱: ارتباط میان ضریب شکست و گاف نواری

۴-۳-۴-۴ ضریب خاموشی

ضریب خاموشی فیلم‌ها نیز مانند ضریب شکست با استفاده از روش بیضی سنجی محاسبه می‌شود. در شکل ۴-۴۲ طیف ضریب خاموشی فیلم‌ها در شارهای ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ sccm رسم شده است و مشاهده می‌گردد که ضریب خاموشی فیلم‌ها با افزایش شار گاز آرگون رفتاری تقریباً صعودی دارند. این موضوع یعنی افزایش ضریب جذب فیلم‌ها با افزایش شار می‌تواند ناشی از افزایش پیوندهای گرافیت مانند sp^2 باشد که این موضوع به خوبی با نتایج رامان نیز سازگاری دارد. با استفاده از ضریب خاموشی فیلم‌ها و

رابطه‌ی ۴-۶ می‌توان α (ضریب جذب) فیلم‌ها را محاسبه کرده و سپس سایر خواص و ویژگی‌های اپتیکی فیلم‌ها مانند گاف نواری را محاسبه کرد.



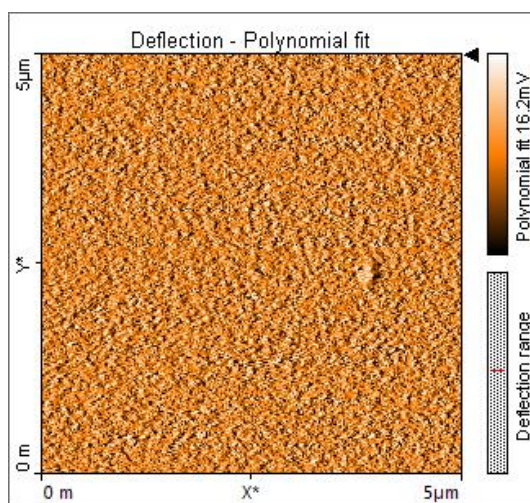
شکل ۴-۴: طیف ضریب خاموشی فیلم‌ها در شارهای مختلف

۴-۳-۵ زبری و توپوگرافی سطح

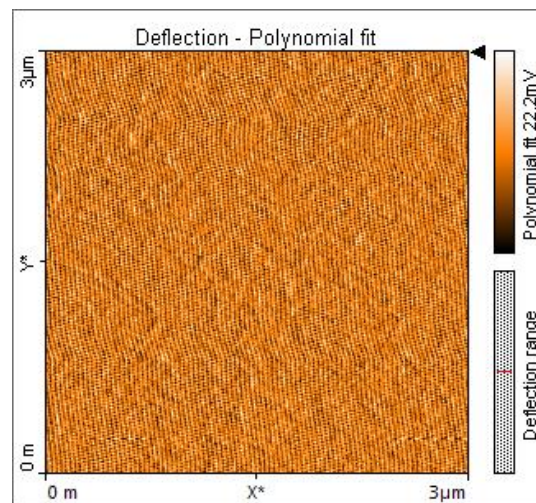
شار گاز آرگون نیز یکی از عوامل تاثیر گذار بر توپوگرافی و زبری فیلم‌های لایه نشانی شده است. در شکل ۴-۴۳ توپوگرافی سطح فیلم‌ها که به وسیله‌ی میکروسکوپ نیروی اتمی تصویرسازی شده است مشاهده می‌گردد. در نمودار شکل ۴-۴۴ زبری متوسط فیلم‌ها بر حسب شار گاز و برای شارهای ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ sccm ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش شار زبری متوسط فیلم‌ها از ۱/۸۷ نانومتر تا ۳/۹۱ نانومتر افزایش می‌یابد. زبری و توپوگرافی سطح وابستگی زیادی به شرایط لایه نشانی مانند شار و فشار گاز دارند. با افزایش شار گاز آرگون، برخوردها میان ذرات در محفظه افزایش می‌یابد، بنابراین اتم‌های کربن اندکی از انرژی جنبشی خود را قبل از رسیدن به سطح زیرلایه از دست می‌دهند. این موضوع باعث ایجاد پدیده‌ی پخش بر روی سطح فیلم می‌گردد. به دلیل اینکه اتم‌های کربن کم

انرژی توانایی نفوذ بر روی سطح فیلم را ندارند، پخش بر روی سطح لایه‌ها منجر به تولید خوشه‌های منظم با مقادیر زیاد sp^2 می‌گردد. این فاز یک فاز ترمودینامیکی پایدار از گرافیت است. خوشه‌هایی از پیوندهای sp^2 بر روی سطح فیلم شکل گرفته و این خوشه‌ها باعث افزایش زبری سطح می‌گردد. همچنین یون‌ها و اتم‌های کربن و یون‌های آرگون با انرژی کمتر از انرژی آستانه‌ی جابجایی اتم‌ها بر روی سطح فیلم باقی می‌مانند و این مکانیزم باعث افزایش خوشه‌های گرافیتی sp^2 شده و زبری سطح را افزایش می‌دهد. از طرفی اگر انرژی اتم‌های کربن و یا یون‌های آرگونی که پس از برخورد به سطح تارگت باز پراکنده می‌شوند به حد کافی زیاد باشد می‌تواند فیلم را اندکی ساییده کرده و این موضوع می‌تواند باعث نرمی سطح فیلم گردد. در شار کمتر با توجه به این که انرژی ذرات بازپراکنده شده بیشتر است بنابراین این ذرات سطح فیلم رشد یافته را ساییده می‌کنند و باعث نرمی فیلم‌ها می‌گردد.

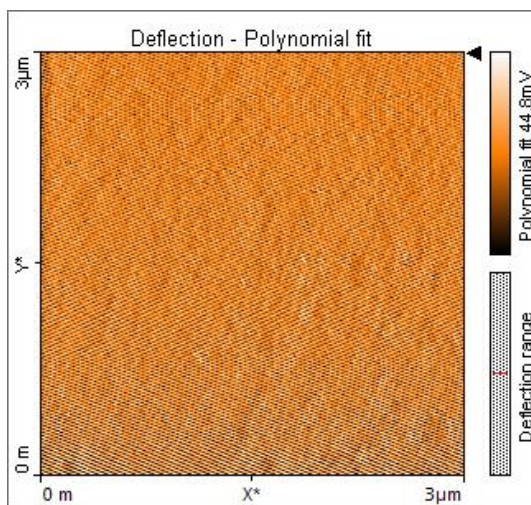
(ب)



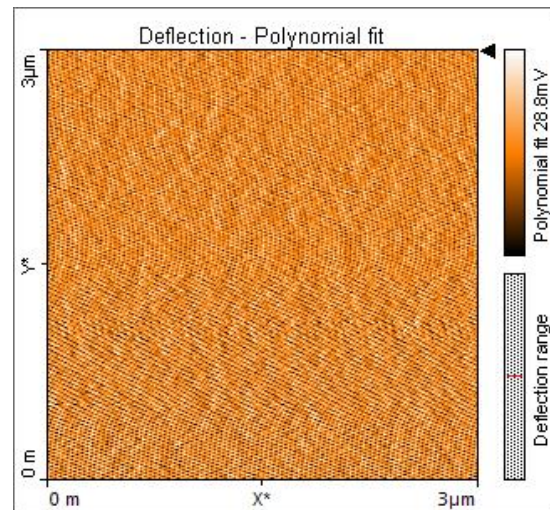
(الف)



(د)

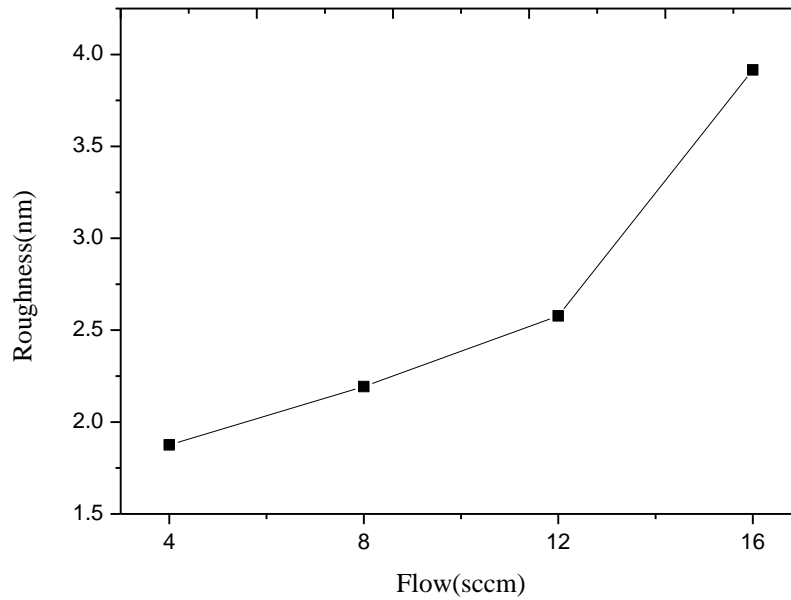


(ج)



شکل ۴-۴۳: الف) توپوگرافی سطح ۰.۴ sccm، ب) توپوگرافی سطح ۸ sccm، ج) توپوگرافی سطح ۱۲ sccm، د)

توپوگرافی سطح ۱۶ sccm



شکل ۴-۴۴: نمودار زبری متوسط سطح بر حسب شار گاز آرگون

۵- فصل پنجم

جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادات برای پژوهش های آینده

۵-۱ نتیجه گیری

در این پژوهش اثر دو پارامتر توان دستگاه کندوپاش و شار گاز آرگون بر خواص اپتیکی، ساختار و توپوگرافی سطح آمورف‌های کربنی که به روش کندوپاش مغناطیسی جریان مستقیم لایه نشانی شده بررسی شده است. نتایج حاصل به طور خلاصه به شرح زیر می‌باشند.

۵-۱-۱ اثر توان لایه نشانی

۵-۱-۱-۱ طیف سنجی رامان: طیف سنجی رامان نشان می‌دهد که با افزایش توان نسبت $\frac{I_D}{I_G}$ و همچنین مکان پیک G کاهش می‌یابد که این موضوع حاکی از افزایش پیوندهای sp^3 درون فیلم است. مطابق با مدل زیرکاشت با افزایش انرژی ذرات و گونه‌های کربنی، این ذرات توانایی نفوذ به داخل فیلم را دارند و به دلیل افزایش چگالی موضعی پیوندها از sp^2 به sp^3 تبدیل می‌گردد.

۵-۱-۱-۲ طیف سنجی نشر نوری: با استفاده از طیف نشر نوری پلاسما می‌توان بسیاری از رادیکال‌ها و پیوندهای فعال درون پلاسما را شناسایی کرده و روند تغییرات آن‌ها را با تغییرات توان پلاسما بررسی کرد. طیف سنجی پلاسما نشان می‌دهد که با افزایش توان شدت پیک C-H افزایش می‌یابد که این موضوع باعث افزایش این پیوندها درون فیلم و کاهش چگالی فیلم می‌گردد. کاهش چگالی فیلم نیز باعث کاهش ضریب شکست فیلم‌ها می‌گردد.

۵-۱-۱-۳ خواص اپتیکی: مشاهدات نشان می‌دهند که با افزایش توان لایه نشانی گاف نواری فیلم‌ها و همچنین انرژی E_{04} افزایش می‌یابد. با افزایش توان از ۶۰ وات به ۱۲۰ وات گاف نواری غیر مستقیم فیلم‌ها از ۲/۲۴ تا ۲/۶۹ الکترون ولت افزایش می‌یابد. همچنین انرژی E_{04} فیلم‌ها نیز از ۲/۱۸ تا ۲/۶۵ الکترون ولت افزایش می‌یابد. دلیل افزایش گاف نواری این است که با افزایش توان لایه نشانی مقدار پیوندهای sp^2 که مسئول گاف نواری در کربن‌های شبه الماسی هستند کاهش می‌یابد. طیف ضریب

شکست فیلم‌ها نیز با افزایش توان در طول موج ۵۵۰ نانومتر از ۱/۹۸ تا ۱/۶۶ کاهش می‌یابد. دلیل کاهش ضریب شکست فیلم‌ها با افزایش توان، کاهش پیوندهای sp^2 و همچنین افزایش مقادیر هیدروژن در فیلم‌هاست که این افزایش مقادیر هیدروژن باعث افزایش پیوندهای sp^3 از نوع CH می‌گردد. همچنین ضریب خاموشی فیلم‌ها نیز با افزایش توان کاهش می‌یابد که این موضوع نیز به دلیل کاهش پیوندهای گرافیتی sp^2 است.

۵-۱-۱-۴ زبری و توپوگرافی سطح: مطالعات AFM نشان می‌دهند که با افزایش توان زبری فیلم‌ها از ۲/۴۵ تا ۲/۱۵ نانومتر کاهش می‌یابد. افزایش توان منجر به افزایش انرژی جنبشی اتم‌های کربن می‌گردد و این اتم‌ها با انرژی بالاتر قادر به نفوذ در سطح فیلم هستند و توپوگرافی سطح فیلم را آن چنان تغییر نمی‌دهند اما اتم‌های کربن با انرژی کمتر قادر به نفوذ به داخل سطح فیلم نیستند و بر روی سطح فیلم خوشه‌های sp^2 ایجاد می‌کنند که باعث زبری سطح فیلم می‌گردد.

۵-۱-۲ اثر شار گاز آرگون

۵-۱-۲-۱ طیف سنجی رامان: طیف سنجی رامان نشان می‌دهد که با افزایش شار آرگون نسبت $\frac{I_D}{I_G}$ و همچنین مکان پیک G افزایش می‌یابد که این موضوع حاکی از کاهش پیوندهای sp^3 و در نتیجه‌ی آن کاهش گاف نواری فیلم‌ها است. مطابق با مدل زیرکاشت در شار کمتر، به دلیل کم بودن فشار و برخورد‌ها، انرژی اتم‌های کربن بیشتر است و این اتم‌ها قادر به نفوذ به داخل فیلم هستند و باعث افزایش چگالی موضعی و طی آن افزایش تشکیل پیوندهای sp^3 می‌شود.

۵-۱-۲-۲ طیف سنجی نشر نوری: طیف نشر نوری پلاسما نشان می‌دهد که با افزایش شار گاز آرگون شدت نسبی پیک C-H کاهش می‌یابد که این موضوع باعث کاهش هیدروژن در فیلم‌ها و طی آن افزایش چگالی و افزایش ضریب شکست فیلم می‌گردد.

۵-۲-۱-۳ خواص اپتیکی: مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش شار گاز آرگون از ۴ به ۱۶ sccm، گاف نواری اپتیکی فیلم‌ها از ۲/۶۷ تا ۲/۳۵ الکترون ولت کاهش می‌یابد. انرژی E₀₄ فیلم‌ها نیز از ۲/۹۲ تا ۲/۴۴ الکترون ولت کاهش می‌یابد. در واقع آنالیز رامان نشان می‌دهد که با افزایش شار گاز، پیوندهای sp² افزایش می‌یابد که این موضوع باعث کاهش گاف نواری می‌گردد. ضریب شکست فیلم‌ها نیز در طول موج ۵۵۰ نانومتر از ۱/۸۵ تا ۲/۱۵ افزایش می‌یابد که این موضوع نیز می‌تواند مرتبط با افزایش sp² و کاهش هیدروژن فیلم‌ها باشد. ضریب خاموشی فیلم‌ها نیز با افزایش شار گاز آرگون افزایش می‌یابد.

۵-۲-۱-۴: زبری و توپوگرافی سطح: مشاهدات نشان می‌دهد که با افزایش شار گاز آرگون، زبری متوسط فیلم‌ها از ۱/۸۷ تا ۳/۹۱ نانومتر افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش شار گاز برخوردی میان ذرات درون محفظه افزایش یافته و باعث کاهش انرژی ذرات و اتم‌ها می‌گردد. کاهش انرژی ذرات باعث می‌شود که ذرات توان نفوذ به داخل سطح فیلم را نداشته باشند و بر روی سطح فیلم خوشه‌های sp² تشکیل دهند که باعث افزایش زبری سطح فیلم می‌گردد. از طرفی در شار پایین تر گاز ذرات و اتم‌های باز پراکنده شده از سطح تارگت دارای انرژی کافی برای سایش سطح فیلم هستند و باعث کمتر شدن زبری و نرم شدن سطح می‌گردد.

۵-۲ پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده

در لایه نشانی کربن‌های شبه الماسی، انرژی لایه نشانی اتم‌ها یک عامل بسیار مهم در تعیین ساختار و ویژگی‌های اپتیکی فیلم‌ها است. بنابراین با استفاده از پارامترهایی که تعیین کننده انرژی اتم‌ها و ذرات هستن می‌توان به خوبی به بررسی ویژگی‌های لایه‌های نازک کربن شبه الماسی پرداخت. در زیر به برخی از پارامترهایی که می‌توانند در پژوهش‌های آتی مورد استفاده قرار بگیرند اشاره شده است.

- دما دادن به زیرلایه‌ها در حین لایه نشانی
- استفاده از گاز هیدروژن و یا گازهای هیدروکربنی مانند متان در لایه نشانی

- تغییر فاصله‌ی زیرلایه تا تارگت
- استفاده از ولتاژ بایاس منفی بر زیرلایه‌ها در حین لایه نشانی
- استفاده از آهنربا بر روی سطح زیرلایه در حین لایه نشانی و بررسی اثر وجود میدان مغناطیسی بر زیرلایه ها

- [١]Ö.D. Coşkun, T. Zerrin, Optical, structural and bonding properties of diamond-like amorphous carbon films deposited by DC magnetron sputtering, *Diamond and Related Materials*, ٥٦(٢٠١٥) .٣٥-٢٩
- [٢]N.D. Baydoğan, Evaluation of optical properties of the amorphous carbon film on fused silica, *Materials Science and Engineering: B*, ١٠٧(٢٠٠٤) .٧٧-٧٠
- [٣]H.Y. Dai, C. Zhan, J. Du, Studies on the influence of sputtering power on amorphous carbon films deposited by pulsed unbalanced magnetron sputtering, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, ١٢٧(٢٠١٦) .٢٥١٥-٢٥١٢
- [٤]Z.W. Xiong, L.H. Cao, Structure and optical properties of conglobate hydrogenated amorphous carbon films prepared by pulsed laser-induced chemical vapor deposition, *Journal of Alloys and Compounds*, ٦٦٧(٢٠١٦) .١٠٠-٩٦
- [٥]A. Tibrewala, E. Peiner, R. Bandorf, S. Biehl, H. Lüthje, Longitudinal and transversal piezoresistive effect in hydrogenated amorphous carbon films, *Thin Solid Films*, ٥١٥ (٢٠٠٧) .٨٠٣٣-٨٠٢٨
- [٦]K. Bewilogua, R. Wittorf, H. Thomsen, M. Weber, DLC based coatings prepared by reactive d.c. magnetron sputtering, *Thin Solid Films*, ٤٤٧-٤٤٨(٢٠٠٤) .١٤٧-١٤٢
- [٧]J. Robertson, Diamond-like amorphous carbon, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, ٣٧(٢٠٠٢) .٢٨١-١٢٩
- [٨]C.V. Raman, The diamond: Its structure and properties, *Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Section A*, ٦٧(١٩٦٨) .٢٤٦-٢٣١
- [٩]J.P. Howe, Properties of Graphite, *Journal of the American Ceramic Society*, ٣٥ (١٩٥٢) .٢٨٣-٢٧٥
- [١٠]K. Bewilogua, D. Hofmann, History of diamond-like carbon films — From first experiments to worldwide applications, *Surface and Coatings Technology*, ٢٤٢(٢٠١٤) .٢٢٥-٢١٤
- [١١]J.M. Harper, Ion beam deposition, *Thin film processes*, (١٩٧٨) .٢٠٨-١٧٥

- [12] W.K. JOHN L. VOSSSEN, Thin film processes, (1978).
- [13] B.R. Appleton, R.A. Zuhr, T.S. Noggle, N. Herbots, S.J. Pennycook, G.D. Alton, Ion Beam Deposition, MRS Bulletin, 12(1987) .09-02
- [14] S. Pochon, D. Pearson, Ion Beam Deposition, Instruments, Oxford Technology, Plasma End, North, 44(2010) .9-1
- [15] I.G. Brown, Cathodic arc deposition of films, Annual Review of Materials Science, 28(1998) .269-243
- [16] H. Randhawa, Cathodic arc plasma deposition technology, Thin Solid Films, 167(1988) .186-170
- [17] D.M. Sanders, A .Anders, Review of cathodic arc deposition technology at the start of the new millennium, Surface and Coatings Technology, 133(2000) .90-78
- [18] J. Vetter, 60 years of DLC coatings: Historical highlights and technical review of cathodic arc processes to synthesize various DLC types, and their evolution for industrial applications, Surface and Coatings Technology, 207(2014) .240-213
- [19] R. Eason, Pulsed laser deposition of thin films, (2007)
- [20] G.K. Hubler, Pulsed Laser Deposition, MRS Bulletin, 29-26 (1992)
- [21] J.S. Chapin, Sputtering process and apparatus, in, Google Patents, .1979
- [22] P. Williams, The sputtering process and sputtered ion emission, Surface Science, 90(1979) .634-088
- [23] K. Bewilogua, R. Wittorf, H. Thomsen, M. Weber, DLC based coatings prepared by reactive dc magnetron sputtering, Thin Solid Films, 447(2004) .147-142
- [24] G.N. Drummond, R.A. Scholl, Enhanced reactive DC sputtering system, in, Google Patents, .1998
- [25] B.C. Yeldose, B. Ramamoorthy, Characterization of DC magnetron sputtered diamond-like carbon (DLC) nano coating, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 38(2008) .717-700
- [26] J.R. Roth, Industrial Plasma Engineering, Volume 1: Principles (.1990)
- [27] C. Lin, D. Wei, C. Chang, W. Liao ,Optical properties of diamond-like carbon films for antireflection coating by RF magnetron sputtering method, Physics Procedia, 18(2011) .00-46
- [28] N. Savvides, B. Window, Diamondlike amorphous carbon films prepared by magnetron sputtering of graphite ,Journal of Vacuum Science & Technology A, 3(1980) .2390-2386

- [۲۹]L. Ma, M. He, Z. Liu, D. Zeng, Z. Gu, G. Cheng, Structure and giant magnetoresistance of carbon-based amorphous films prepared by magnetron sputtering, *Thin Solid Films*, ۵۵۶(۲۰۱۴) . ۴۶۳-۴۶۰
- [۳۰]P.J. Kelly, R.D. Arnell, Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications, *Vacuum*, ۵۶(۲۰۰۰) . ۱۷۲-۱۵۹
- [۳۱]Appendix A - Complex Variables A ۲- Swanson, D.G, in: *Plasma Waves*, Academic Press, ۱۹۸۹, pp. .۳۷۴-۳۶۳
- [۳۲]F.F. Chen, Introduction to plasma physics and controlled fusion, Volume ۱: Plasma Physics (.۱۹۸۴)
- [۳۳]E. Mohagheghpour, M. Rajabi, R. Gholamipour, M.M. Larijani, S. Sheibani, Correlation study of structural, optical and electrical properties of amorphous carbon thin films prepared by ion beam sputtering deposition technique, *Applied Surface Science*, ۳۶۰, Part A (۲۰۱۶) . ۵۸-۵۲
- [۳۴]N. Sangiorgi, L. Aversa, R. Tatti, R. Verucchi, A. Sanson, Spectrophotometric method for optical band gap and electronic transitions determination of semiconductor materials, *Optical Materials*, ۶۴(۲۰۱۷) . ۲۵-۱۸
- [۳۵]H. fujiwara, Spectroscopic ellipsometry, Principles And Applications National institute of advanced industrial science and technology.
- [۳۶]M.D. Rovenca Pascu, Spectroscopic ellipsometry, *Romanian Reports in Physics*,, ۶۴(۲۰۱۲) . ۱۴۲-۱۳۵
- [۳۷]J. Marzi, E. Brauchle, D.A. Carvajal Berrio, S. Lee Layland, K. Schenke-Layland, Raman Spectroscopy, in: *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier, .۲۰۱۷
- [۳۸]L.H.D. Norman B. colthup, Stephen E. Wiberely, Introduction to infrared and raman spectroscopy, second edition (.۱۹۷۵)
- [۳۹]D. Rugar, P. Hansma, Atomic force microscopy, *Physics today*, ۴۳(۱۹۹۰) . ۳۰-۲۳
- [۴۰]G. Binnig, C.F. Quate, C. Gerber, Atomic Force Microscope, *Physical Review Letters*, ۵۶(۱۹۸۶) . ۹۳۳-۹۳۰
- [۴۱]J. Coburn, M. Chen, Optical emission spectroscopy of reactive plasmas: A method for correlating emission intensities to reactive particle density, *Journal of applied physics*, ۵۱(۱۹۸۰) . ۳۱۳۶-۳۱۳۴
- [۴۲]C.B.B.a.K.J. Fredeen, Concepts, Instrumentation and Techniques in Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry, (۲۰۰۴).

[43] Š. Meškiniš, A. Čiegis, A. Vasiliauskas, A. Tamulevičienė, K. Šlapikas, R. Juškėnas, G. Niaura, S. Tamulevičius, Plasmonic properties of silver nanoparticles embedded in diamond like carbon films: influence of structure and composition, *Applied Surface Science*, 317(2014) 1046-1051

[44] G.A. Tritsarlis, C. Mathioudakis, P.C. Kelires, E. Kaxiras, Optical and elastic properties of diamond-like carbon with metallic inclusions: A theoretical study, *Journal of Applied Physics*, 112(2012) 103003

[45] P. Mahtani, K.R. Leong, I. Xiao, A. Chutinan, N.P. Kherani, S. Zukotynski, Diamond-like carbon based low-emissive coatings, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(2011) 1637-1638

[46] P. Safaie, A. Eshaghi, S.R. Bakhshi, Optical properties of oxygen doped diamond-like carbon thin films, *Journal of Alloys and Compounds*, 672(2016) 432-436

[47] N.M. Ravindra, P. Ganapathy, J. Choi, Energy gap–refractive index relations in semiconductors – An overview, *Infrared Physics & Technology*, 50(2007) 29-21

[48] X.L. Peng, Z.H. Barber, T.W. Clyne, Surface roughness of diamond-like carbon films prepared using various techniques, *Surface and Coatings Technology*, 138(2001) 22-23

[49] C.H. Lui, L.M. Malard, S. Kim, G. Lantz, F.E. Laverge, R. Saito, T.F. Heinz, Observation of layer-breathing mode vibrations in few-layer graphene through combination Raman scattering, *Nano letters*, 12(2012) 5044-5039

[50] H.Y. Dai, X.R. Cheng, C.F. Wang, Y.C. Xue, Z.P. Chen, Structural, optical and electrical properties of amorphous carbon films deposited by pulsed unbalanced magnetron sputtering, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 126(2015) 864-861

[51] D. Rai, D. Datta, S.K. Ram, S. Sarkar, R. Gupta, S. Kumar, Structural, optical and secondary electron emission properties of diamond like carbon thin films deposited by pulsed-DC plasma CVD technique, *Solid State Sciences*, 12(2010) 1404-1419

Abstract

In this work, optical, structural and morphological properties of diamond-like carbon thin films deposited by DC magnetron sputtering was investigated. In this research, the effect of sputtering power and Argon gas flow rate on the properties of diamond-like carbon films as two parameter was studied and results showed that these parameters have an extensive and undeniable effect on the structural, optical and morphological properties of amorphous carbon films. The structure of the films was studied by raman spectroscopy to find graphite like (sp^2) and diamond like (sp^3) bonds. Results showed that with increasing sputtering power, sp^3 bonds was increased in 8 sccm Argon gas flow rate. Also it was observed that by increasing sputtering gas flow rate, sp^2 bonds increased in 100 watt. Optical properties of the films such as refractive index and extinction coefficient was investigated by spectroscopic ellipsometry (SE) and then indirect optical band gap was calculated. Results showed that with increasing sp^2 bonds the band gap decrease. Topography and roughness of the films surface studied by atomic force microscopy (AFM) and it was shown by increasing sp^2 graphite clusters, the roughness of the films surface increased. Optical emission spectroscopy (OES) was used to find dominant elements and reactive species in the plasma and the relation between those bonds and structure of the films was studied.

Keywords: Diamond-like carbon films, DC magnetron sputtering, band gap, refractive index



Faculty of Physics and Nuclear Engineering
M.Sc. Thesis in Atomic and Molecular Physics

Investigation of optical and structural properties of diamond-like carbon films deposited by DC magnetron sputtering

By

Saeid Khodadadi Najaf Abadi

Supervisors

Dr. Mehdi Momeni

Dr. Seyed Iman Hosseini

February 2017