فصلنامه‌ی علمی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۱۱، شماره‌ی ۲، تابستان ۱۴۰۱

# بررسی اثر ولتاژ بایاس بر مشخصه‌های ساختاری و مکانیکی لایه نازک کربن شبه الماس اعمال‌شده توسط فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی

نوع مقاله: علمی پژوهشی

**مسعود سروری، سید حجت اله حسینی*، محمدرضا ابراهیمی فردوئی، سعید مرساق دزفولی**

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

* nnshosseini@mut.ac.ir

**اطلاعات مقاله:**

**دریافت:** ۱۷ بهمن ۱۴۰۰

**پذیرش:** ۴ تیر ۱۴۰۱

صفحه ۵۸ تا صفحه ۶۹

**در دسترس در نشانی:**
www.ijcse.ir

**زبان نشریه:** فارسی

**شاپا چاپی:** ۲۳۵۲-۲۳۲۲

**شاپا الکترونیکی:**
۲۷۸۳-۳۰۰۳

**چکیده:**

*در این پژوهش اثر ولتاژ بایاس بر تغییرات ساختاری لایه نازک کربن شبه الماس ایجاد شده توسط فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، پارامتر ولتاژ بایاس در مقادیر ۰ V، ۵۰- V، ۱۰۰- V و ۱۵۰- V روی زیرلایه آلیاژ آلومینیوم AA5083 در نظر گرفته شد. جهت ارزیابی تغییرات ساختاری از طیف‌سنجی رامان استفاده شد. همچنین جهت تاثیر ولتاژ بایاس بر ضخامت و زبری سطح پوشش های اعمالی، از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) نیز استفاده گردید. سختی و مدول الاستیک توسط آزمون نانوسختی‌سنجی اندازه‌گیری شد. نتایج آنالیز رامان نشان‌دهنده بیش‌ترین میزان پیوندهای $sp^3$ در لایه نازک کربن شبه الماس در ولتاژ بایاس ۵۰- V بود و با افزایش ولتاژ بایاس، مقدار پیوندهای $sp^3$ کاهش پیدا کرد. نتایج آنالیز AFM گویای کم‌ترین میزان زبری سطح لایه (۱۰ nm) در ولتاژ بایاس ۵۰- V بود. با توجه به این که میزان پیوندهای $sp^3$ در ولتاژ بایاس ۵۰- V در حداکثر مقدار خود قرار داشت، سختی در این مقدار ولتاژ بایاس نیز نسبت به ولتاژهای دیگر بالاتر و برابر ۱۴/۱ GPa بود.*

**کلیدواژه:**

*کربن شبه الماس، ولتاژ بایاس، رسوب‌دهی پرتو یونی، آلیاژ آلومینیوم AA5083*

**کد DOR:** 20.1001.1.23222352.1400.10.0.27.0

## ۱- مقدمه

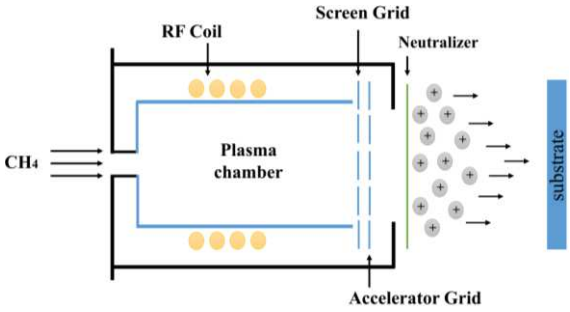
پوشش کربن شبه الماس نام دیگر پوشش‌های کربن آمورف هیدروژنه (a-c:H) و یا کربن آمورف (a-c) است که شامل شبکه‌ای از اتم‌های کربن با اتصالات عرضی از هیبریداسیون $sp^2$ (گرافیت) و $sp^3$ (الماس) می‌باشد. پوشش کربن شبه الماس دارای خواصی همچون سختی بالا، مقاومت به سایش و خوردگی بالا، ضریب اصطکاک پایین و زیست‌سازگاری می باشد. این ویژگی‌ها سبب شده است تا پوشش کربن شبه الماس به عنوان پوشش محافظ ایده‌آل در قطعات خودرو، ایمپلنت‌های پزشکی، عروق مصنوعی، صنایع هوافضا و غیره



[ Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222352.1401.11.0.1.1 ]

مورد استفاده قرار گیرد [۱، ۲]. روش‌های متفاوتی جهت لایه نشانی پوشش کربن شبه الماس وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان کندوپاش، رسوب‌گذاری لیزر پالسی، رسوب دهی قوس کاتدی فیلتر شده و رسوب‌گذاری پرتو یونی را نام برد. رسوب‌دهی پرتوی یونی روشی است که در این پژوهش جهت لایه‌نشانی پوشش کربن شبه الماس استفاده شده است. مهم‌ترین ویژگی این روش، کنترل بالای خواص پوشش از طریق کنترل دقیق پارامترهایی مانند نرخ جریان گاز، انرژی پرتو یونی و دیگر پارامترهای مرتبط است. شماتیکی از فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی در شکل ۱ نشان داده شده است.




**شکل ۱- شماتیک از فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی بسامد رادیویی.**

یکی از پارامترهای اثر گذار بر خواص و ساختار پوشش کربن شبه الماس در فرایند پرتو یونی، ولتاژ بایاس اعمالی بر زیرلایه است. این پارامتر نقش بسزایی در کنترل ساختار و در نتیجه خواص پوشش کربن شبه الماس ایفا می‌کند. ریزساختار لایه ها بصورت عمده وابسته به انرژی ذرات برخوردی است و ولتاژ بایاس نقش بسزایی در انرژی جنبشی گونه‌های برخوردی دارد. ولتاژ بایاس همچنین بر نرخ رشد لایه‌ها موثر است. لذا این پارامتر مهم می‌تواند در نسبت پیوندهای $sp^2/sp^3$، زبری سطح و خواص لایه‌های کربن شبه الماس موثر باشد. مطابق تحقیق شیجا و همکارانش [۳] پوشش در ولتاژهای بالا (۷ ۰۰۰- ،۶۰۰۰- ،۵۰۰۰- ،۴۰۰۰- ،۳۰۰۰-) شامل مقادیرکم‌تری پیوند $sp^3$ نسبت به مقادیر کم ولتاژ بایاس (۰ v و ۸۵- v) است. مطابق گزارش آن‌ها، پوشش اعمالی با ولتاژ بایاس ۸۵- v ، حداکثر میزان پیوندهای $sp^3$ را در لایه‌های کربن شبه الماس دارد [۳]. همچنین شیجا و همکارانش گزارش دادند که افزایش ولتاژ بایاس سبب افزایش اندازه‌ی خوشه‌های گرافیتی در پوشش کربن شبه الماس شده و درنتیجه سبب افزایش زبری سطح می‌شود. افزایش اندازه‌ی خوشه‌های گرافیتی بیان‌کننده‌ی افزایش میزان پیوند $sp^2$ در پوشش است. مطابق گزارشات منتشر شده [۳-۵]، پوشش کربن شبه الماس اعمالی در ولتاژ ۱۰۰ V- دارای حداکثر مقدار پیوندهای $sp^3$ می‌باشد. در این میان آلیاژ آلومینیوم AA5083 در بین آلیاژهای سری 5000، بالاترین خواص مکانیکی را دارد. این آلیاژ همچنین مقاومت بالایی در مقابله با مواد شیمیایی خورنده داشته و در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما به دلیل سختی پایین و مقاومت به سایش کم در کاربردهای تریبولوژیکی بصورت محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با توجه به گزارشات بسیار اندک از تاثیر ولتاژ بایاس بر خواص پوشش کربن شبه الماس توسط فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی و اعمال این پوشش‌ها برروی آلیاژ AA5083، در این پژوهش تاثیر ولتاژ بایاس بر ساختار و خواص پوشش کربن شبه الماس اعمال شده برروی سطح آلیاژ آلومینیوم AA5083 توسط فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی مورد ارزیابی قرار گرفته است.



[ Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222352.1401.11.0.1.1 ]

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از آلیاژ آلومینیوم AA5083 در ابعاد ۵ mm × ۱۰ × ۳۰ به عنوان زیرلایه استفاده شد. نمونه‌ها توسط سمباده‌های ۸۰ تا ۳۰۰۰ صیقل داده شده و سپس در حمام التراسونیک به مدت ۲۰ دقیقه با دمای ۴۰°C و فرکانس ۴۰kHz در محلول استون شستشو شدند. جهت رسوب‌دهی لایه‌های نازک کربن شبه الماس از فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی با منبع رادیو فرکانس استفاده شد. منبع هیدروکربنی پوشش کربن شبه الماس مورد استفاده جهت لایه‌نشانی، گاز متان با خلوص ۹۹/۹۹٪ بود.

برای اعمال ولتاژ بایاس از منبع تغذیه پالسی ۱۲kW ساخت شرکت بووکید استفاده شد. مقادیر ولتاژ بایاس شامل ۰ V، ۵۰ V-، ۱۰۰ V- و ۱۵۰ V- در نظر گرفته شد. دیگر پارامترهای فرایندی در جدول ۱ آورده شده است.

**جدول ۱- پارامترهای ثابت لایه‌نشانی در فرایند رسوب دهی پرتو یونی**

| | |
|---|---|
| زمان لایه‌نشانی | 50 Min |
| توان | 113 W |
| شار گاز ورودی | 9 Sccm |
| فاصله زیرلایه از چشمه‌ی یون | 18 Cm |

جهت بررسی تغییرات ساختاری پوشش کربن شبه الماس از دستگاه طیف‌سنجی رامان مدل تاکرام، ساخت شرکت تکسان استفاده شد. همچنین جهت تاثیر ولتاژ بایاس بر ضخامت و زبری سطح پوشش‌های اعمالی، از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) نیز استفاده گردید. جهت بررسی سختی و مدول الاستیک پوشش‌های اعمالی از دستگاه نانوسختی‌سنجی، مدل کامپکت پلتفورم سوییس واقع در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده شد.

## ۳- نتایج و بحث

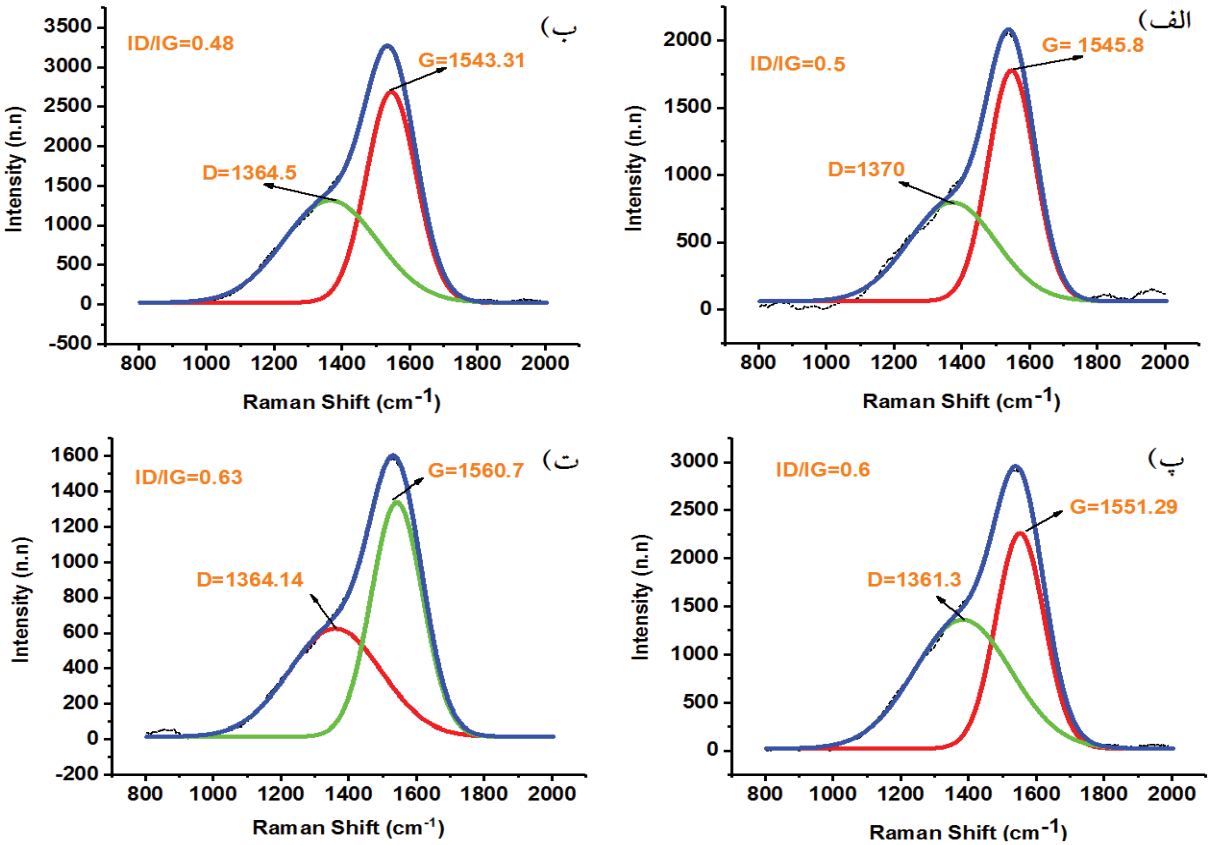
نتایج حاصل از طیف‌سنجی رامان برای پوشش کربن شبه الماس ایجاد شده با ولتاژهای بایاس مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. طیف رامان، تغییرات نظم بلوری در پوشش های کربن شبه الماس را بر اساس شکل طیف و میزان تغییرات شدت پیک‌ها و محل پیک‌های D و G بیان می‌کند. موقعیت و شدت هرکدام از این پیک‌ها مشخصات جالب توجهی از ساختار کربنی را ارائه می دهند. پیک G مربوط می شود به پیوندهای $sp^2$ هم به شکل حلقه و هم به شکل شاخه، در حالی که پیک D مربوط به عیوب بین صفحه‌ای در ساختار گرافیت و حضور حلقه‌های شش ضلعی در خوشه‌های گرافیتی است [۱]. در طیف رامان به علت حساسیت بیشتر آنالیز به مکان‌های پیوندی $sp^2$ نسبت به پیوندهای $sp^3$ در کربن شبه الماس، کاهش پیوندهای $sp^2$ به عنوان معیاری برای افزایش پیوندهای $sp^3$ در نظر گرفته می‌شود [۱، ۵، ۶]. موقعیت‌های پیک G نسبت به ولتاژ بایاس، جهت مقایسه‌ی بهتر در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌طور مشاهده می‌شود، در ولتاژ بایاس ۰V، موقعیت پیک G برابر با $1545/8\ cm^{-1}$ است.

زمانی که ولتاژ بایاس از ۰ V به ۵۰ V- تغییر می‌کند، پیک G به مقدار $1543/31\ cm^{-1}$ می‌رسد. شیف پیک به سمت اعداد کم‌تر، نشان‌دهنده‌ی کاهش درصد پیوندهای گرافیته موجود در پوشش است. این کاهش می‌تواند به دلیل افزایش انرژی جنبشی ناشی از اعمال ولتاژ بایاس باشد که باعث فشرده شدن بیش‌تر پوشش شده و مقدار پیوندهای $sp^3$ را افزایش داده است.



[ Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-27 ]

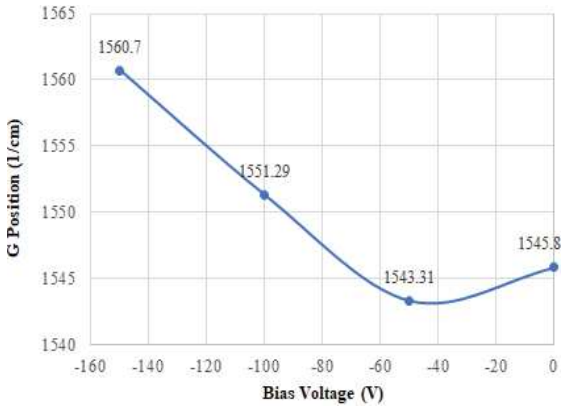
[ DOR: 20.1001.1.23222352.1401.11.0.1.1 ]




**شکل ۲- طیف‌های رامان پوشش کربن شبه‌الماس ایجاد شده با ولتاژ بایاس الف) ۰ V ب) ۵۰- V پ) ۱۰۰- V ت) ۱۵۰- V.**

بدین ترتیب که یون‌های با انرژی بالا به داخل سطح نفوذ کرده و به یک موقعیت زیر سطحی وارد می‌شوند. این امر باعث افزایش چگالی موضعی می‌شود. سپس پیوند موضعی حول آن یون‌ها، بر طبق چگالی جدید اصلاح می‌شود.

مطابق تحقیق وی دای[1] [۴] مشخص شده است که در شرایط بمباران یونی با انرژی یونی بالا در زمان رشد لایه، هیبریداسیون‌های اتمی به سادگی برای تغییر در چگالی موضعی تنظیم می‌شوند به طوریکه اگر چگالی کم باشد، بیشتر به حالت $sp^2$ تبدیل شده و اگر چگالی زیاد باشد بیشتر به حالت $sp^3$ تبدیل می‌شود [۵].




**شکل ۳- تغییرات موقعیت پیک G پوشش کربن شبه الماس در ولتاژ بایاس ۰ V، ۵۰- V، ۱۰۰- V و ۱۵۰- V.**

[1] Wei dai



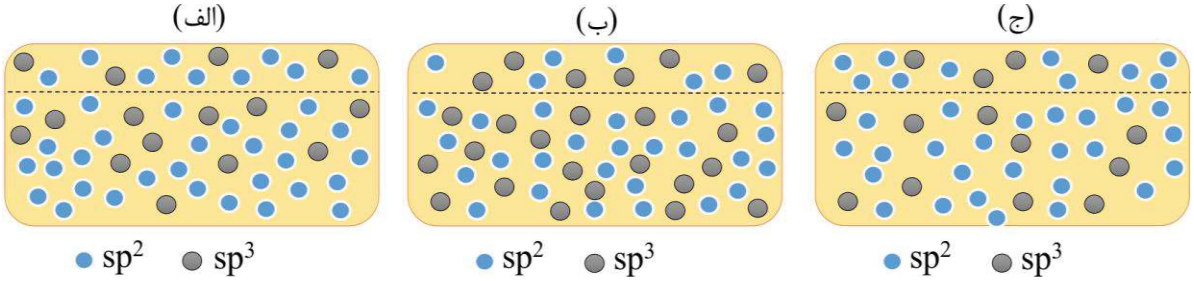
[ Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222352.1401.11.0.1.1 ]

از این تغییر می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ولتاژ بایاس بعنوان عامل کنترل‌کننده ساختار، نقش بسزایی دارد و می توان با کنترل بهینه‌ی آن خواصی مانند سختی و مقاومت به سایش را تحت تاثیر قرار داد. در ادامه با افزایش بیش‌تر ولتاژ بایاس تا مقدار ۱۰۰ V- موقعیت پیک G به مقدار $cm^{-1}$ ۱۵۵۱/۲۹ می‌رسد. در این ولتاژ بایاس برخلاف دو ولتاژ بایاس ۰ V و ۵۰ V-، موقعیت پیک G افزایش پیدا کرده است. علت این امر این است که با افزایش ولتاژ بایاس، انرژی یون، حد لازم برای نفوذ را رد کرده و آسیب ناشی از تصادم شبکه‌ی کربنی که در تمام توده‌ی پوشش رخ می دهد، روند افزایش چگالی را مختل می‌کند و در نتیجه باعث گرافیته شدن و افزایش زبری پوشش می‌شود و به نوعی انرژی اضافی موجود می‌تواند با ایجاد پدیده‌ی کندوپاش مجدد باعث کاهش میزان چگالی و مقدار پیوندهای $sp^3$ شود. در ادامه با افزایش ولتاژ بایاس تا مقدار۱۵۰ V- موقعیت قله‌ی G مطابق آنچه انتظار می‌رفت افزایش یافته و به $cm^{-1}$ ۱۵۶۰/۷ می‌رسد که علت آن افزایش بیش از حد ولتاژ بایاس است که روند افزایش چگالی را مختل کرده و موجب گرافیته شدن بیش‌تر پوشش شده است.

با توجه به تاثیر ولتاژ بایاس بر انرژی ذرات و گونه‌های برخوردی، مدل کاشت زیرسطحی در رشد پوشش کربن شبه الماس در شکل ۴ ارائه شده است [۱، ۵]. با توجه به انرژی یون‌های برخوردی به سطح ($E_i$)، سه حالت رشد برای پوشش قابل تصور است. زمانی که انرژی یون برخوردی ($E_{ion}$) از مقدار بحرانی انرژی ($E_c$) کم‌تر باشد، به دلیل غلبه‌ی فعل و انفعالات سطحی، افزایش زبری سطح رخ می‌دهد. علت این پدیده انرژی پایین یون برخوردی است که باعث می‌شود نفوذ در سطح، بیش از نفوذ به بالک پوشش رخ دهد. این مسئله باعث می‌شود روی سطح خوشه‌هایی از جنس $sp^2$ ایجاد شود و زبری سطح افزایش یابد.

زمانی که انرژی یون برخوردی با انرژی بحرانی ($E_c$) برابر است رادیکال‌های کربن شروع به نفوذ به زیر سطح می‌کنند. در این حالت یون‌های برخوردی به مکان‌های بین‌نشینی رفته و حالت کاشت زیر سطحی به پدیده‌ی نفوذ سطحی غلبه می کند. در این حالت مقدار پیوندهای $sp^3$ نسبت به $sp^2$ بیش‌تر می‌شود. جهت تاثیر ولتاژ بایاس بر نسبت $I_D/I_G$ که رابطه‌ی مستقیمی با نسبت پیوندهای $sp^2/sp^3$ دارد در شکل ۵ نشان داده شده است.

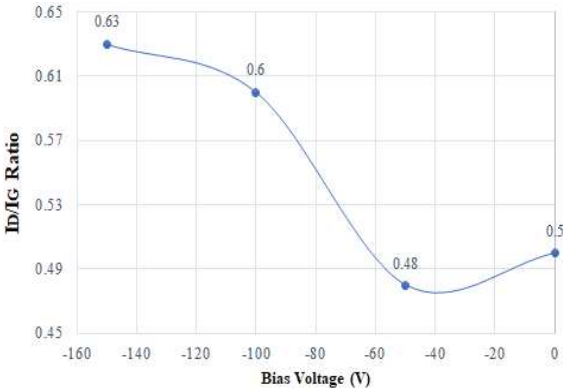



**شکل ۴- شماتیکی از اثر انرژی یون بر رشد پوشش کربن شبه‌الماس: الف) $E_p > E_{ion}$، نفوذ سطحی غالب است ب) $E_p > E_{ion}$، گونه های کربنی به عمق نفوذ می‌کنند و مقدار $sp^3$ زیاد می‌شود ج) $E_p << E_{ion}$، آسیب ناشی از تصادم شبکه‌ی کربنی رخ می‌دهد و مقدار $sp^2$ زیاد می‌شود [۸].**



[ Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222352.1401.11.0.1.1 ]

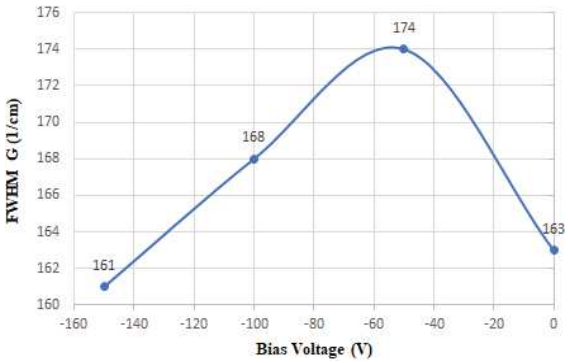



**شکل ۵- تغییرات نسبت $I_D/I_G$ مربوط به پوشش کربن شبه الماس در ولتاژ بایاس ۰ V، -۵۰ V، -۱۰۰ V و -۱۵۰ V.**

در ولتاژ بایاس ۰ V مطابق با نمودار، این نسبت برابر با ۰/۵ است و با افزایش ولتاژ بایاس تا مقدار ۵۰V- این نسبت کاهش یافته و به ۰/۴۸ می‌رسد. این کاهش در مقدار نسبت $I_D/I_G$ نشان‌دهنده‌ی کاهش پیوندهای $sp^2$ است، چرا که اعمال ولتاژ بایاس باعث ایجاد پوشش چگال‌تری شده است. با افزایش ولتاژ بایاس بدلیل افزایش انرژی جنبشی ذرات، فشردگی پوشش افزایش، و در نتیجه مقدار پیوندهای $sp^3$ نیز افزایش یافته است. اما با افزایش ولتاژ بایاس تا مقدار ۱۰۰V- این نسبت به ۰/۶ رسیده است.

در حالی که انتظار می‌رفت کاهش پیدا کند. دلیل این اتفاق این است که افزایش ولتاژ بایاس باعث افزایش انرژی ذرات برخوردی و ایجاد پدیده‌ی کندوپاش مجدد شده و در نتیجه روند افزایش چگالی را مختل کرده است و همچنین قابل ذکر است که افزایش بیش از حد انرژی ذرات، بدلیل اتلاف انرژی مازاد بصورت گرما، واهلش یون‌های نفوذکننده به پایه‌های $sp^2$ رخ داده و ساختار به سمت گرافیته شدن می‌رود. درست به همین دلیل افزایش بیش‌تر ولتاژ بایاس تا مقدار ۱۵۰ V- باعث افزایش نسبت $I_D/I_G$ شده است. البته قابل ذکر است که در تمامی مقادیر ولتاژ بایاس، نسبت $I_D/I_G$ پایین بوده است.

پارامتر مهم دیگر در طیف رامان، پهنا در نصف بیشینه‌ی پیک G است (FWHM)، که به نظم ساختاری ناشی از زاویه و طول پیوند وابسته است. کاهش پهنا در نصف بیشینه‌ی پیک G نشانه‌ی کاهش درجه‌ی آمورف شدن و افزایش نظم لایه‌ها است. حضور خوشه‌های $sp^2$ بدون نقص و عاری از تنش موجب کاهش پهنا در نصف بیشینه‌ی طیف رامان لایه‌های کربن شبه الماس می‌شود. داده‌های پهنا در نصف بیشینه در چهار ولتاژ بایاس مورد بررسی قرار گرفته و در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.




**شکل ۶- تغییرات مقدار FWHM (G) طیف رامان لایه کربن شبه الماس در چهار ولتاژ بایاس ۰ V، -۵۰ V، -۱۰۰ V و -۱۵۰ V.**

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌ای که تحت ولتاژ بایاس ۰ V لایه‌نشانی شده دارای پهنا در نصف بیشینه‌ای معادل ۱۶۳ $cm^{-1}$ است و با افزایش ولتاژ بایاس تا ۵۰ V- این پارامتر به عدد ۱۷۴ $cm^{-1}$ نزدیک می‌شود، این موضوع نشان می‌دهد که از ولتاژ ۰ V تا ۵۰ V- مقدار $sp^2$ موجود در پوشش کاهش یافته و پوشش چگال‌تر شده است. زمانی که ولتاژ بایاس از ۵۰ V- به ۱۰۰ V- می‌رسد، روند آن دچار تغییر شده و به دلیل افزایش ولتاژ بایاس و بالا بودن انرژی جنبشی ذرات



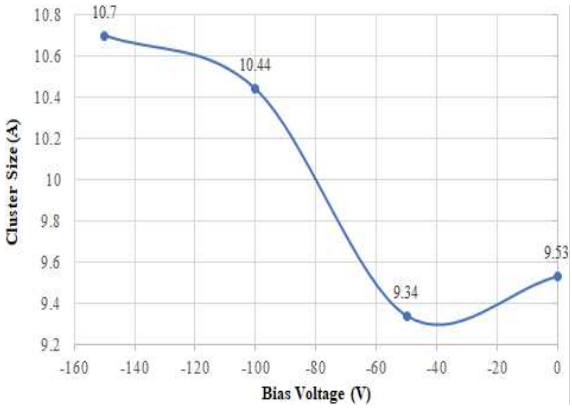
[ Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222352.1401.11.0.1.1 ]

و هم‌چنین ایجاد پدیده‌ی کندوپاش مجدد، چگالی پوشش کاهش و باعث افزایش مقدار پیوندهای $sp^2$ موجود در پوشش می‌شود و در نتیجه کاهش مقدار پهنا در نصف بیشینه را رقم زده است. دقیقا با همین استدلال زمانی که ولتاژ بایاس از ۱۰۰ V- به ۱۵۰ V- تغییر می‌کند، مقدار $sp^2$ افزایش می‌یابد و پهنا در نصف بیشینه نیز کاهش می‌یابد. با داشتن نسبت $I_D/I_G$ می‌توان جهت محاسبه‌ی اندازه‌ی خوشه‌های $sp^2$ در لایه‌های کربن شبه الماس از رابطه زیر استفاده کرد [۶]:

$$I_D/I_G = C(\lambda)L^2$$

در این رابطه L اندازه‌ی خوشه‌های $sp^2$ و $C(\lambda)$ یک عدد ثابت بوده که به طول موج لیزر وابسته است و مقدار آن برابر با ۰/۰۰۵۵ $A^{o-2}$ می‌باشد [۶]. اندازه‌ی خوشه‌های $sp^2$ طبق رابطه ذکر شده محاسبه و برحسب ولتاژ بایاس در شکل ۷ ارائه شده است. مطابق نمودار در ولتاژ بایاس ۵۰ V- و ۰ V اندازه‌ی خوشه‌های گرافیتی به ترتیب برابر است با ۹/۳۴ $A^o$ و ۹/۰۴ $A^o$، اما در ولتاژ بایاس ۱۰۰ V- اندازه خوشه‌ها به عدد ۱۰/۴۴ $A^o$ می‌رسد.



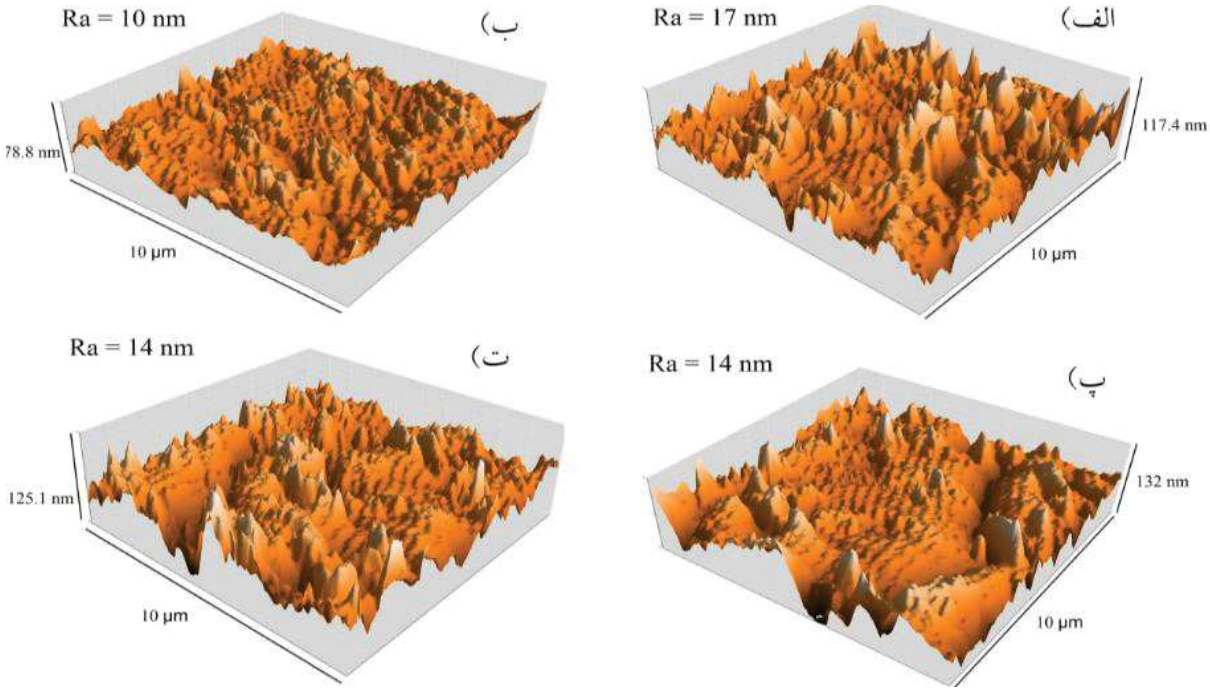

**شکل ۷- اندازه خوشه‌های نانوگرافیتی پوشش کربن شبه‌الماس در ولتاژ بایاس ۰ V، ۵۰ V-، ۱۰۰ V- و ۱۵۰ V-.**

تغییر ولتاژ بایاس از ۵۰V- به ۱۰۰V- منجربه گرافیتی شدن ساختار شده که علت آن افزایش بیش از حد انرژی ذرات ناشی از افزایش ولتاژ بایاس است، که این امر سبب واهلش یون‌های نفوذی به پایه‌های $sp^2$ شده است. به عبارت دیگر در ولتاژ بایاس ۵۰ V- در هنگام بمباران یونی و رشد لایه، چگالی افزایش یافته و یون‌های بیش‌تری در زیر سطح باقی می‌مانند و در نتیجه مقدار یون‌های کم‌تری به سطح بازگشته و این امر سبب کاهش رشد خوشه‌های گرافیتی و در نتیجه کاهش تعداد حلقه‌های شش ضلعی در خوشه‌ها که متناسب با شدت پیک D بوده، و در نهایت کاهش نسبت $I_D/I_G$ مشاهده می‌شود. تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی از سطح پوشش کربن شبه الماس در ولتاژهای بایاس مختلف جهت بررسی تأثیر ولتاژ بایاس بر زبری سطح پوشش در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق نتایج، زبری سطح پوشش با افزایش ولتاژ بایاس ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است. به طوری که در ولتاژ بایاس ۰ V زبری سطح پوشش حدودا ۱۷ nm و در ولتاژ بایاس ۵۰ V- به حدود ۱۰ nm می‌رسد و سپس با افزایش بیش‌تر ولتاژ بایاس تا مقادیر ۱۰۰ V- و ۱۵۰ V-، زبری در حدود ۱۴ nm ثابت می‌شود. افزایش ولتاژ بایاس تا مقدار معینی حرکت اتم‌ها در سطح لایه‌های در حال رشد را افزایش داده و منجر به کاهش حفره‌های درون صفحه‌ای می‌شود و چگالی را افزایش می‌دهد و سبب کاهش زبری سطح لایه می‌شود [۷]. هم‌چنین زمانیکه ولتاژ بایاس بیش از حد معمول افزایش یابد، سطح لایه آسیب دیده و منجر به افزایش زبری سطح می‌شود. بر اساس مدل کاشت زیرسطحی در شکل ۴ [۵]، برای رشد پوشش کربن شبه‌الماس سه حالت رشد قابل تصور است. زمانی که انرژی یون برخوردی ($E_{ion}$) از مقدار بحرانی انرژی ($E_c$) کم‌تر باشد، بنابر غلبه‌ی فعل و انفعالات سطحی، افزایش زبری سطح رخ می‌دهد.



[ Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222352.1401.11.0.1.1 ]




**شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی در ولتاژ بایاس الف) V ۰ ب) V ۵۰- پ) V ۱۰۰- ت) V ۱۵۰-.**

به دلیل انرژی پایین یون‌های برخوردی، گونه‌های تبخیری صرفا جذب سطح می‌شوند و به بالک پوشش نفوذ نمی‌کنند. این مسئله باعث می‌شود برروی سطح، خوشه‌هایی از جنس $sp^2$ ایجاد شود و زبری سطح را افزایش دهد. به همین دلیل است که پوشش اعمال شده در ولتاژ بایاس ۰V دارای زبری سطح بالایی نسبت به پوشش اعمال شده در بایاس ۵۰V- است. تصاویر FESEM از مقطع پوشش‌های کربن شبه الماس در دو ولتاژ بایاس ۵۰ V- و ۱۰۰ V- در شکل ۹ آورده شده است.

تصاویر ریزساختاری، چسبندگی و تراکم خوبی از لایه‌ها را نشان می‌هد که این امر گویای انتخاب مناسب پارامترهای فرایندی در این پژوهش و تعامل خوب پوشش با زیرلایه است. با توجه به تصاویر، با افزایش ولتاژ بایاس ضخامت پوشش کربن شبه الماس افزایش یافته است. این پدیده نشان دهنده تاثیر ولتاژ بایاس بر نرخ رسوب و وابستگی نرخ رسوب به ولتاژ بایاس در لایه‌های کربن شبه الماس است. با تغییر ولتاژ بایاس از ۵۰ V- به ۱۰۰ V- نرخ رسوب لایه کربنی افزایش یافته است [۵]. در واقع با افزایش ولتاژ بایاس، گونه های کربنی بیش‌تری به سمت زیرلایه حرکت می‌کند. این عامل به نوعی در افزایش نرخ رسوب نقش ایفا می‌کند و در نتیجه ضخامت پوشش نیز افزایش می‌یابد [۸].

همچنین فرض دیگر این است که با افزایش ولتاژ بایاس گونه های کربنی با انرژی جنبشی بیش‌تری به سطح لایه در حال رشد برخورد کرده و بر نرخ جوانه‌زنی و رشد نیز اثر گذار می باشد.

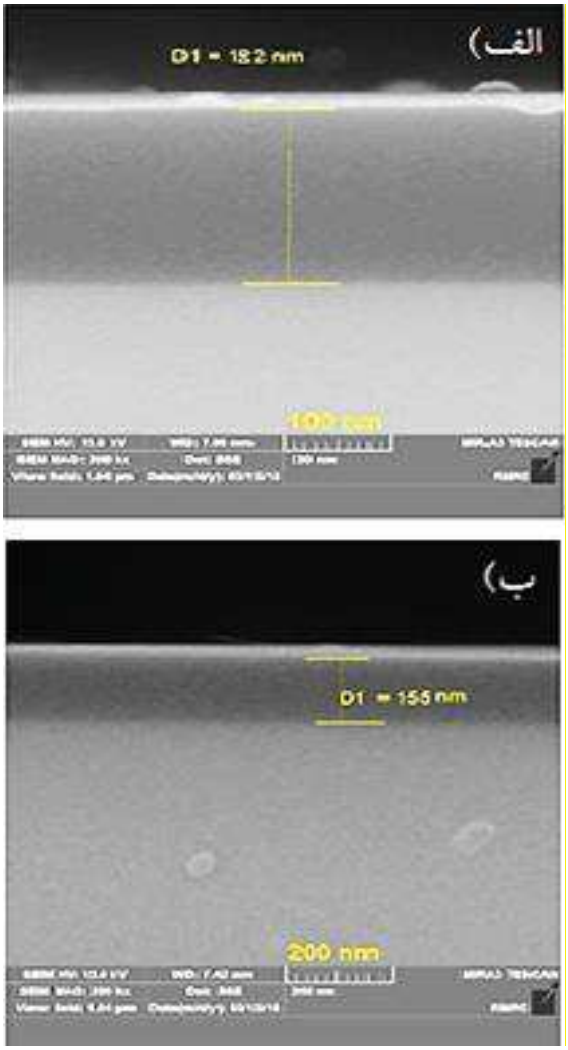
شکل ۱۰ نمودار سختی و مدول الاستیک بر حسب ولتاژ بایاس برای چهار نمونه‌ی لایه‌نشانی شده در ولتاژهای



[ Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-27 ]

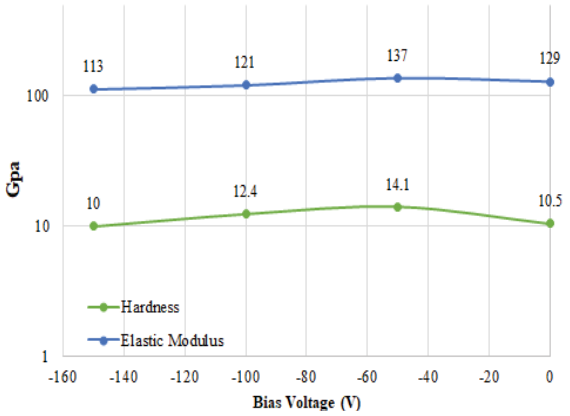
[ DOR: 20.1001.1.23222352.1401.11.0.1.1 ]

بایاس ۰ V، ۵۰ V-، ۱۰۰ V- و ۱۵۰ V- را نشان می‌دهد.




**شکل ۹- تصاویر مقطعی FESEM از پوشش کربن شبه الماس ایجاد شده در ولتاژ بایاس الف) ۱۰۰ V- و ب) ۵۰ V-.**

در ولتاژ بایاس ۰ V میزان سختی پوشش برابر ۱۰/۵ GPa بود. با افزایش ولتاژ بایاس تا ۵۰ V- ، مشاهده شد که سختی تا عدد ۱۴/۱ GPa افزایش یافت. دلیل این افزایش، به درصد فاز $sp^3$ موجود در پوشش برمی‌گردد.




**شکل ۱۰- نمودار از مدول الاستیک و سختی پوشش DLC بر حسب ولتاژ بایاس برای چهار نمونه‌ی لایه‌نشانی شده در ولتاژهای بایاس ۰ V-، ۵۰ V-، ۱۰۰ V- و ۱۵۰ V-.**

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، در ولتاژ بایاس ۵۰ V- انرژی جنبشی یون‌ها ناشی از اعمال ولتاژ بایاس افزایش و بدلیل غلبه نفوذ حجمی، یون‌ها در یک موقعیت زیر سطحی وارد می‌شوند. این امر باعث افزایش چگالی موضعی پوشش می شود و لذا تشکیل پیوندهای $sp^3$ ناشی از افزایش چگالی موضعی، تسهیل می‌شود و در نتیجه چگالی افزایش و همچنین سختی پوشش کربنی شبه الماس نیز افزایش می یابد. واضح است که هر چه مقدار پیوندهای $sp^3$ در ساختار پوشش کربن شبه الماس بیشتر باشد، سختی و مدول الاستیک نیز افزایش می‌یابد [۹ و۱۰]. با افزایش ولتاژ بایاس تا ۱۰۰ V- سختی پوشش با کاهش مواجه شده و به عدد ۱۲/۴ GPa می‌رسد. این کاهش به دلیل افزایش ولتاژ بایاس و تاثیر منفی بر انرژی ذرات است. با افزایش بیش از حد ولتاژ بایاس، انرژی گونه‌ها از مقداری که برای نفوذ لازم است فراتر رفته و کندوپاش پوشش نیز رخ خواهد داد و روند افزایش چگالی بدلیل فرایند واهلش، مختل و در نتیجه باعث کاهش فاز $sp^3$ در پوشش می‌شود، در نتیجه سختی و مدول الاستیک



[ Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222352.1401.11.0.1.1 ]

پوشش کاهش می‌یابد. در ولتاژ بایاس ۱۵۰ V- نیز همین اتفاق رخ داده و سختی با کاهش بیشتری روبرو است، در این ولتاژ بایاس سختی پوشش برابر ۱۰ GPa است.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تاثیر ولتاژ بایاس بر تحولات ساختاری و خواص مکانیکی پوشش کربن شبه الماس ایجاد شده توسط فرایند پرتو یونی پرداخته شد. نتایج بدست آمده از این مطالعه به شرح زیر است:

۱) با تغییر ولتاژ بایاس از ۰ V تا ۵۰ V- میزان فاز $sp^3$ افزایش یافته و پس از آن با افزایش بیش‌تر ولتاژ بایاس تا مقادیر ۱۰۰ V- و ۱۵۰ V-، میزان پیوندهای $sp^3$ کاهش یافته است که آن را می‌توان به پدیده‌ی کندوپاش مجدد و کاهش روند افزایش چگالی بدلیل افزایش انرژی ذرات و پدیده واهلش مربوط دانست.

۲) زبری سطح پوشش در ولتاژهای بایاس ۰ V، ۵۰ V-، ۱۰۰ V- و ۱۵۰ V- به ترتیب برابر ۱۷ nm، ۱۰ nm، ۱۴ nm و ۱۴ nm بود. کم‌ترین میزان زبری سطح پوشش در ولتاژ بایاس ۵۰ V- بدست آمد.

۳) نتایج آزمون نانو سختی‌سنجی نشان داد که در ولتاژ بایاس ۵۰ V- سختی برابر ۱۴/۱ GPa بود و در سایر ولتاژهای بایاس یعنی ۰ V، ۱۰۰ V- و ۱۵۰V- سختی مقادیر کم‌تری داشته و به ترتیب برابر ۱۰/۵ GPa، ۱۲/۴ GPa و ۱۰ GPa است.

۴) تصاویر FESEM از مقطع پوشش‌های کربن شبه الماس در دو ولتاژ بایاس ۵۰ V- و ۱۰۰ V- ریزساختاری متراکم و چسبندگی مطلوب لایه‌ها را به زیرلایه نشان می‌هد که این امر گویای انتخاب مناسب پارامترهای فرایندی در این پژوهش می‌باشد.

## مراجع


[1] Donnet, Christophe, and Ali Erdemir, eds. Tribology of diamond-like carbon films: fundamentals and applications. Springer Science & Business Media, 2007.

[2] Moriguchi, Hideki, Hisanori Ohara, and Masanori Tsujioka. "History and applications of diamond-like carbon manufacturing processes." Sei Tech Rev 82 (2016): 52-58.

[3] Sheeja, D., B. K. Tay, S. P. Lau, and Xu Shi. "Tribological properties and adhesive strength of DLC coatings prepared under different substrate bias voltages." Wear 249, no. 5-6 (2001): 433-439.

[4] Dai, Wei, He Zheng, Guosong Wu, and Aiying Wang. "Effect of bias voltage on growth property of Cr-DLC film prepared by linear ion beam deposition technique." Vacuum 85, no. 2 (2010): 231-235.

[5] R. M. Dey, S. B. Singh, A. Biswas, R. B. Tokas, N. Chand, S. Venkateshwaran, D. Bhattacharya et al. "Substrate bias effects during diamond like carbon film deposition by microwave ECR plasma CVD." Current Applied Physics 8, no. 1 (2008): 6-12.

[6] Robertson, John. "Diamond-like amorphous carbon." Materials Science and Engineering: R: Reports 37, no. 4-6 (2002): 129-281.

[7] Ward, Liam, Fabian Junge, Andreas Lampka, Mark Dobbertin, Christoph Mewes, and Marion Wienecke. "The effect of bias voltage and gas pressure on the structure, adhesion and wear behavior of Diamond like Carbon (DLC) coatings with Si interlayers." Coatings 4, no. 2 (2014): 214-230.

[8] Ritwik Kumar Roy, Sk. Faruque Ahmed, Jin Woo Yi, Myoung-Woon Moon, Kwang-Ryeol Lee, Youngha Jun, "Improvement of adhesion of DLC coating on nitinol substrate by hybrid ion beam deposition technique", Vacuum 83 (2009) 1179–1183.

[9] Kim, H., D. H. Jung, B. Park, K. C. Yoo, J. J. Lee, and J. H. Joo. "The effect of the substrate bias voltage and the deposition pressure on the properties of diamond-like carbon produced by inductively coupled plasma assisted chemical vapor deposition." Surface and Coatings Technology 193, no. 1-3 (2005):




[ Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222352.1401.11.0.1.1 ]

255-258.

[10] H. Kitsunai, K. Hokirigawa, Transitions of microscopic wear mode of silicon carbide coatings by CVD during repeated sliding observed in an SEM tribosystem, Proc. 6th Int. Congr. Tribol., Vol. 3, Budapest, Hungary, Aug. 30–Sept. 2, 1993, pp. 207–212.

[ Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222352.1401.11.0.1.1 ]

Iranian Journal of
**Ceramic Science & Engineering**
**Vol. 11, No. 2, 2022**

# Effect of Bias Voltage on Structural and Mechanical Characteristics of Diamond-Like Carbon Thin Film Applied by Ion Beam Deposition

**Masoud Sarvari, Seyed Hojatollah Hosseini*, MohammadReza Ebrahimi Fordoei, Saeid Mersagh Dezfuli**

**Department of Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran**

* nnshosseini@mut.ac.ir

**Abstract:** This study, investigates the effect of bias voltage on structural changes of diamond-like carbon thin film created by ion beam deposition is investigated. For this purpose, the bias voltage in the values of 0 V, -50 V, -100 V and -150 V on the AA5083 aluminum alloy was considered. Raman spectroscopy was used to evaluate structural. Influence of the bias voltage on the thickness and roughness of coatings by atomic force microscope (AFM) and field emission scanning electron microscope (FESEM) were investigates. Hardness and elastic modulus were measured by nanoindentation test. The results of Raman analysis showed the highest amount of $sp^3$ bonds in the diamond-like carbon thin film at bias voltage of -50 Vs. results of AFM showed the lowest of surface roughness (10 nm) at bias voltage of -50 Vs. The hardness of diamond-like carbon thin film was 14.1 GPa at the bias voltage of -50 Vs.

**Keywords:** Diamond like Carbon, Biase Voltage, ion beam deposition, AA5083 aluminum alloy.

[ Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222352.1401.11.0.1.1 ]