

مانزد بهين سمينار ملى مهندسي تنطح

پژوهشگاه مواد و انرژی ۲۹ و ۳۰ مهرماه ۱۳۹۳

# بررسی خواص نوری و ساختاری لایه نازک کربن شبه الماسی آمورف (a:DLC) ایجاد شده با روش انباشت توسط کندوپاش پرتو یونی(IBSD)

الهام محقق پور'، مرجان رجبی'، رضا غلامی پور'،شهاب شیبانی'، سیامک عظیمی نام'، مجید ملک"

۱. سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران ( به ترتیب دانشجوی دکترای مهندسی مواد، استادیار، استادیار، مربی)
۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها (دانشیار)
۳. پژوهشکده شتابگرها(کارشناس)

چکیدہ

در تحقیق حاضر رشد لایه نازک کربن شبه الماسی آمورف با استفاده از روش IBSDبر زیرلایه آلیاژی نیکل -مس انجام و خواص نوری و ساختاری آنبوسیله طیف سنجی رامان، میکروسکوپ نیروی اتمی و طیف سنجی UV-visible مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بررسی طیف رامان لایه های نازکبیانگر آنستکهجریان و ولتاژ شتابدهنده بر نسبت شدت باند D به G اثر گذار است، به طوریکه با افزایش ولتاژ شتابدهنده از X/۲ به kV متابدهنده بر نسبت (I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub>) از ۲/۹ به ۸۷ اثر گذار است، به طوریکه با افزایش ولتاژ شتابدهنده از ۲/۲ به ۲/۲ نور از ۲۴٪ در ناحیه مرئی را به کمتر از ۳۰٪ در ناحیه فرابنفش (۲۵٪ در طول موج mm ۲۰۰۳) نشان می دهد. بر این اساس، گاف انرژی نوریلایه های نازک کربن شبه الماسی آمورف با زبری سطح mm-۲۰۲۳ برابر با ۲۷۷ محاسبه شده است.

**واژدهای کلیدی:**لایه نازک، کربن شبه الماسی آمورف، کندوپاش پرتو یونی، گاف انرژی نوری، مورفولوژی.

<sup>&#</sup>x27;. Elham'mohaghegh@yahoo.com

مقدمه

کربن شبه الماسی آمورف<sup>(</sup>(a:DLC) ساختاری نیمه پایدار از کربن آمورف است که حاوی درصد بالایی از پیوندهای<sup>\*</sup>sp می باشد و خواص ساختاری و نوری شبیه به الماس دارد [۲و۱]. به علت خواص ویژهی a:DLC مانند خنثایی شیمیایی، سختی مکانیکی و مقاومت سایشی بالا، مقاومت الکتریکی زیاد، جذب پایین نور در محدوده فروسرخ، شفافیت در محدوده نور مرئی و گاف انرژی نوری کوچک، لایه های نازک این ماده در دو دهه اخیر به طور گسترده برای کاربرد در زمینه های مختلف اپتیک، الکترونیک، مکانیک، پزشکی مانند ابزارهای میکروالکترومکانیکی، پوششهای محافظ دریچه های نوری ، دیسکهای ذخیره مغناطیسی مطالعه و

رشد این ساختار که اولین بار توسط آیزنبرگ<sup>۲</sup> و چابت<sup>۳</sup> در سال ۱۹۷۱ و به روش انباشت پرتو یونی[۳] گزارش شده، به روشهای فیزیکی و شیمیایی مختلفی مانند کندوپاش<sup>۲</sup>، انباشت به وسیله لیزر<sup>۵</sup>، انباشت با استفاده از تبخیر شیمیایی همراه با پلاسما<sup>۲</sup>، انباشت توسط قوس فیلتر شده<sup>۷</sup> و انباشت با استفاده از پرتو یونی<sup>۸</sup> نیز انجام شده است [۱۰–۷و ۵و۳و۱]. در میان روشهای فوق، روش کندوپاش پرتو یونی به علت وجود امکان کنترل انرژی یونها و دانسیته جریان یون به صورت مستقل برای ایجاد لایه های نازک کربن آمورف به صورت گسترده ای استفاده در بدن می شود [۵]. یکی از کاربردهای مهم پوششهای کربنی به عنوان لایه محافظ در ایمپلنتهای مورد استفاده در بدن جهت جلوگیری از ایجاد حساسیت و آزادسازی یونهای فلزی و سایش در استفاده طولانی مدت فلزات می باشد[۱۰–۱۷].

در تحقیق حاضر از لایه نازک کربن برای پوشش دهی آلیاژ نیکل-مس که به علت خواص مغناطیسی مطلوب در فرآیند گرمادرمانی مورد استفاده قرار می گیرد استفاده شده است. خواص ساختاری لایه های نازک کربن که به روشIBSD بر زیرلایه آلیاژی انباشت شده است مورد بررسی قرارگرفته است. جهت بررسی خواص نوری لایه های نازک، پوشش دهی همزمان بر زیرلایه شیشه نیز انجام و مورد مطالعه قرار گرفته است.

### مواد و روش تحقيق

در تحقیق حاضر از آلیاژ Ni-Cu با ترکیب وزنی (٪۲۹/۴–۲۹/۶) و شیشه به عنوان زیرلایه استفاده شده است. قبل ازفرآیند لایه نشانی، عملیات چربی زدایی و شستشوی نمونه ها در حمام اولتراسونیک به ترتیب با استفاده از

- ٤ sputtering
- <sup>°</sup>Pulsed Laser Deposition

<sup>1</sup> amorphous diamond like carbon films

Aisenberg

<sup>&</sup>lt;sup>°</sup> Chabot

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition

<sup>&</sup>lt;sup>v</sup>Filtered vacuum arc

<sup>&</sup>lt;sup>^</sup> Ion Beam Sputtering Deposition

پانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

شکل (۱) به صورت نمادین فرآیند انباشت به روش کندوپاش پرتویونی را نشان می دهد. یک ورق گرافیتی خالص منبع کربن است. برای انجام لایه نشانی در دمای محیط، دمای زیرلایه با سیستم آبگرد کنترل می شود. فرآیند لایه نشانی با رسیدن به خلاء تقریبی torr<sup>9</sup>-۱۰<sup>-۶</sup>۱۰×۵/۶ غاز و در محیط پلاسمای آرگون در فشار تقریبی فرآیند لایه نشانی با رسیدن به خلاء تویبی torr<sup>9</sup>-۱۰<sup>-۶</sup> مانانی نمونه های آلیاژی با توجه به وجود محدودیت در ضخامت لایه نازک قابل قبول جهت بررسی ساختاری توسط طیف رامان به مدت ۳ ساعت و شیشه به مدت مخامت لایه ناز شتابدهنده ۲/۲ کیلوولت در نظر گرفته شده است. در طول لایه نشانی با تغییر ولتاژ و جریان فیلامنت و تخلیه الکتریکی، جریان ثابت(۲۵ mA) در نظر گرفته شده است.

برای بررسی ساختارپوشش های کربنی ومطالعه پیوندها و چیدمان اتمهای کربن از طیف سنجی رامان استفاده شده است. برای این منظورازدستگاه رامان بالیزر Nd-YAG، طول موج ۵۳۲nm و توان MM ۱ استفاده شده است. ضخامت پوششهای کربنی با استفاده ازپروفایلمتر مکانیکی ۳ DekTak اندازه گیری شده است. مورفولوژی و زبری لایه های پوشش داده شده با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (C۲۶,DME,Denmark) مورد بررسی قرار گرفته است. طیف عبور لایه کربن ایجاد شده، با استفاده از طیف سنج V-۷۰۲) در بازه طول موج های ۲۰۰۳اندازه گیری شده است.

## نتايج و بحث

شکل (۲) طیف رامان بدست آمده از سطح پوشش کربنی لایه نشانی شده درشرایط مختلف را نشان می دهد. طیف در محدودهٔ جابه جایی رامان در بازه <sup>(۳</sup> ۲۰۰۰ دm<sup>-1</sup> اندازه گیری شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می شود طیف از قله ای در نزدیکی<sup>(۳</sup> mo ۱۵۵۰ و پله ای در حدود <sup>(۳</sup> mo ۱۳۶۰ تشکیل شده است که حاصل همپوشانی دو قله است. لذا برای بررسی دقیقتر جزییات طیف لازم است دو قله از هم تفکیک شوند. تفکیک این دوقله با استفاده ازنرم افزار Origin وبه روش گوسین انجام شده است. موقعیت، شدت و پهنای کامل در نیمهٔ بیشینه (FWHM) قله ها در جدول (۱) گزارش شده است. قله نخست در طیفهای رامان در نزدیکی <sup>(۳</sup> mo ۱۵۵۰ به باند G معروف است و مربوط به پیوندهای <sup>۲</sup> gP در ساختار گرافیت می باشد. قله دیگر که در محدوده <sup>(۳</sup> mo ۱۵۵۰ به باند G معروف است و مربوط به پیوندهای <sup>۲</sup> gP در ساختار گرافیت می باشد. قله دیگر کوافیت و حضور حلقه های شش ضلعی در فازهای گرافیتی بی نظم است. موقعیت، شدت و پهنای هر کدام از این پیک ها مشخصات جالب توجهی از ساختار کربنی را ارائه می دهند [۱۹ ۹ – ۱۳] .در طیف رامان به علت حساسیت بیشتر آنالیز به مکانهای پیوندی <sup>۲</sup> gP نسبت به پیوندهای <sup>۳</sup> gP در کربن، کاهش پیوندهای <sup>۲</sup> gP به عنوان معیاری برای افزایش پیوندهای <sup>۳</sup> gP در نظر گرفته می شود [۱۷] با توجه به تعریف پیکهای D و G در طیف رامان

Mix Beam Modification

بررسي خواص نوري و ...

با کاهش I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> تعداد حلقه ها در هر خوشه کاهش می یابد یعنی اندازه گروههای زنجیره ای کم می شود که این پدیده همراه با افزایش مقدار پیوندهای Sp<sup>T</sup> در ساختار است [۱۷و۱۴].همانطور که در جدول(۱) ملاحظه می شودمقدارI<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> بدست آمده از ساختار لایه نازککربن،همخوانی خوبی با مقادیر گزارش شده در مقالات در مورد ساختار شبه الماسی دارندبنابراین می توان نتیجه گرفت که ساختار کربنی انباشته شده، a:DLCمی باشد[۱۶و۲۰].

شکل(۳) طیف عبوری لایه ناز کa:DLC را بر زیرلایه شیشه نشان می دهد. بررسی طیف عبور، کاهش میزان عبور نور از ۸۴٪ در ناحیه مرئی را به کمتر از ۳۰٪ در ناحیه فرابنفش (۲۵٪ در طول موج ۳۰۰ ۳۰۰) نشان می دهد که نزدیک به مقادیر گزارش شده در تحقیقات دیگر می باشد. این خود دلیل دیگری بر ایجاد a:DLC در شرایط موجود در تحقیق حاضر است[۶و ۱۸]. در ادامه با استفاده از رابطه زیرگاف انرژی لایه کربن محاسبه می شود [۱۸]:

در این رابطه α ضریب جذب لایه نازک، h ثابت پلانک، v فرکانس فوتون تابشی به لایه نازک، A یک مقدار ثابت وE<sub>g</sub> گافانرژیاپتیکی می باشد. همانطور که در شکل (۴) ملاحظه می شود مقدار گاف انرژی لایه نازک کربن شبه الماسی آمورف انباشت شده بر شیشه تقریباً ۲eV می باشد که قابل مقایسه با تحقیقات دیگر دراین زمینه است [۶و۸۸].

مورفولوژی لایه ناز ک a:DLC در نمودارهای شکل (۵) نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود با استفاده از روش لایه نشانی مذکور به مدت ۲۰ دقیقه، لایه ای باضخامت INTR و زبری بالاتری دارد [۹۹وهو۴]. شده است که در مقایسه با گزارشات صورت گرفته در مقالات دیگر ضخامت و زبری بالاتری دارد [۹۹وهو۴]. نتیجه مذکور از طریق بررسی عوامل موثر بر زبری سطح قابل تحلیل می باشد. انرژی یونهای اعمالی و مقدار تنش باقیمانده در لایه ناز ک عوامل موثر بر زبری سطح است. بمباران ذرات پرانرژی باعث افزایش تحرک<sup>۱</sup> اتمهای کربن در سطح لایه ناز ک در حال رشد می شود که جاهای خالی موجود در لایه ناز ک و در نتیجه زبری سطح را کاهش و چگالی لایه را افزایش می دهد. البته این نکته باید در نظر گرفته شود که افزایش زیاد انرژی سطح را کاهش و چگالی لایه را افزایش می دهد. البته این نکته باید در نظر گرفته شود که افزایش زیاد انرژی سطح را کاهش و در ایه ناز ک در حال رشد می شود که جاهای خالی موجود در لایه ناز ک و در نتیجه زبری سطح را کاهش و در ایه ناز ک در حال رشد می شود که جاهای خالی موجود در لایه ناز ک و در نتیجه زبری نازک را افزایش دید می تواند منجر به انجام فرآیند کندوپاش مجدد<sup>۲</sup> در سطح لایه ناز ک و در نتیجه تخریب سطح شود که نتیجه آن افزایش زبری سطح می باشد. علاوه بر آن تنش باقیمانده بالا در لایه ها انرژی آزاد لایه ناز ک را افزایش می دهد که افزایش آشفتگی سطحی می تواند باعث کاهش انرژی آزاد لایه ناز ک شود بنابراین زبری سطح تحت تاثیر اتم های نفوذی با انرژی بالاتر از کندوپاش مجدد و افزایش انرژی آزاد لایه ناز ک در افزایش محمانت، افزایش می یابد [۹۹]. در تحقیق حاضر با توجه به ضخامت بالای لایه ناز ک ناز ک تری ریاد یونهای اعمالی در مقایسه با تحقیقات دیگرافزایش زبری سطح قابل قبول می باشد [۹۹وه].

mobility resputtring

پانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

ایجاد پیوندهای الماسی به صورت تئوری توسط مدل میله های حرارتی ٔقابل بررسی می باشد. بر اساس مدل مذکوردر لایه نشانی توسط پرتو یونی، از برخورد یون با انرژی E بـه سطح زیرلایـه یـا فیلم در حـال رشـد، در فاصله r از محل برخورد یون و بعد از گذشت زمان t بر اساس معادله زیر دمای T حاصل می شود[۱۳]:

$$T = \frac{E}{\frac{\lambda(\pi K t)^{\frac{\gamma}{\gamma}}}{\varepsilon_{Kt}}} (C_{\rho})^{1/\gamma} \exp\left(-\frac{C_{\rho} r^{\gamma}}{\varepsilon_{Kt}}\right)$$

که E انرژی فراهم شده به وسیله ذرات، K هدایت گرمایی فیلم یا زیرلایه، C ظرفیت گرمایی و ρ دانسیته می باشد. با استفاده از رابطه فوق یون با انرژی ۱۰۰eV در فاصله شعاعی ۷۵nm دما را حداقل تا ۳۸۲۳k بالا می بردو در بازه زمانی S<sup>1-1</sup>۰۱×۷ پایدار نگه می دارد که این زمان در مقایسه با دوره ار تعاش بدست آمده از دمای دمای در یازه زمانی S<sup>1-1</sup>۰۱×۷ پایدار نگه می دارد که این زمان در مقایسه با دوره ار تعاش بدست آمده از دمای دمای دری الماس که S<sup>1-1</sup>۰۱×۷ پایدار نگه می دارد که این زمان در مقایسه با دوره ار تعاش بدست آمده از مای دمای دری در بازه زمانی S<sup>1-1</sup>۰۱×۷ پایدار نگه می دارد که این زمان در مقایسه با دوره ار تعاش بدست آمده از دمای دمای دری الماس که S<sup>1-1</sup>۰۱×۷ پایدار نگه می دارد که این زمان در مقایسه با دوره ار تعاش بدست آمده از دمای دمای دری در ملاس که S<sup>1-1</sup>۰۱×۲/۰ طولانی است. علاوه بر آن افزایش فشار حاصل از شوک اعمالی یون در سطح در حد ملله ماس که S<sup>1-1</sup>۰۱×۲ می باشد. هر چند فرضیات مذکور بسیار ساده هستند اما امکان ایجاد فشار و دمای بالا به مقدار مورد نیاز برای تشکیل پیوندهای الماسی را در ابعاد اتمی تایید می کند[۳]. نتایج حاصل از فرآیند پوشش دهی در تحقیق حاضر که مورد بررسی قرار گرفت و گزارشهای محققان دیگر مساله مذکور را به لحاظ پوشش دهی در تحقیق حاضر که مورد بررسی قرار گرفت و گزارشهای محققان دیگر مساله مذکور را به لحاظ آزمایشگاهی تایید می نماید [ ۸–10].

# **نتیجه گیری** پوششهای کربنی آمورف به روش کندوپاش پرتو یونی ایجاد شده وخواص نوری و ساختاری پوشش حاصل مورد بررسی قرار گرفت که به اختصار ارائه می گردد:

- بر اساس مدل میله های حرارتی در لایه نشانی توسط پرتو یونی، افزایش انرژی یونهای اعمالی منجر به افزایش دما در محل برخورد یون به تارگت و در نتیجه لایه در حال رشد می شود که این امر شرایط تشکیل پیوندهای Sp<sup>T</sup> را تسهیل می کند.
- ۲) بررسی طیف رامان نشان می دهد که نسبت I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> لایه نازک شبه الماسی حاصل با استفاده از روش انباشت (IBSD، ۸۹/۰می باشد.
- ۳) طیف عبوری لایه ناز کیa:DLC نشان می دهد که درصد عبور نور در محدوده مرئی به سمت منطقه فروسرخ افزایش می یابد و در ۸۰۰ nm در حد ۸۴٪ می باشد و گاف انرژی اپتیکی برای لایه انباشت شده تقریبا ۲eV می باشد.
- ۴) بررسی مورفولوژی سطح با استفاده از آنالیز AFM انباشت لایه ای با ضخامت ۱۱۳nm و زبری ۴/۲۵nm را نشان می دهد.

<sup>&#</sup>x27; Thermal Spike Models of Ion Action

#### مراجع

- ). J. Robertson, "Diamond-Like Amorphous Carbon", *Materials Science and Engineering*  $R^{rry}$ ,  $r \cdot r$ ,  $r \cdot r$ ,  $r \cdot r$ .
- P. Silva, S. Ravi," properties of amorphous carbon", INSPEC, Institution of Engineering and Technology, university of surrey, Uk, ۲۰۰۳.
- ۳. S. Aisenberg, R. Chabot, "Ion-beam deposition of thin films of diamondlike carbon", J. Appl. Phys., ٤٢, ١٩٧١, ٢٩٥٣-٢٩٥٨.
- Won Seok Choi and Byungyou Hong, "Synthesis and Characterization of Diamond-Like Carbon Protective AR Coating", *Journal of the Korean Physical Society*, <sup>٤</sup>°, <sup>Υ</sup>··<sup>٤</sup>, S<sup>Λ</sup><sup>1</sup><sup>ε</sup> S<sup>Λ</sup><sup>1</sup><sup>γ</sup>.
- •. Y. Tanga, Y.S. Li b, Q. Yanga, A. Hirose, "Characterization of hydrogenated amorphous carbon thin films by end-Hall ion beam deposition", *Applied Surface Science*, YoY, Y·II, £199-£Y·•.
- SunitaKundoo, SatyajitKar," Nitrogen and Boron Doped Diamond Like Carbon Thin Films Synthesis by Electrodeposition from Organic Liquids and Their Characterization ", Advances in Materials Physics and Chemistry, ", ", ", ", ", ", ", ","."
- V. N. Savvides," Optical constants and associated functions of metastable diamondlike amorphous carbon films in the energy range ..... eV ", *Journal of Applied Physics*, o9, 1٩٨٦, ٤١٣٣-٤١٤٥.
- A. Y. F. Lu, S. M. Huang, C. H. A. Huan and X. F. Luo, "Amorphoushydrogenatedcarbon synthesized by pulsed laser deposition from cyclohexane", *Applied Physics A Materials Science & Processing*, 74, 1999, 75Y-701.

- 11. Grill, "Diamond-like carbon coatings as biocompatible materials-an overview", *Diamond and Related Materials*, 17, 7..., 17–17.
- ۲۲. R. Hauer, "A review of modified DLC coatings for biological applications", *Dimondandrelatedmatherials*, ۲۲, ۲۰۰۳, ۵۸۳-۵۸۹.
- Y. C. Weissmantel, K. Bewilogua, D. Dietrich, H.-J. Erler, H.-J. Hinneberg, S. Klose, W. Nowick, G. Reisse, "Structure and Properties of Quasi-Amorphous Films Prepared by Ion Beam Techniques", *Thin Solid Films*, YY, 1966, 19-71.
- 14. A. C. Ferrari, B. Kleinsorge, G. Adamopoulos, J. Robertson, W. I. Milne, V. Stolojan b, L. M. Brown b, A. LiBassi c and B. K. Tanner, "Determination of Bonding in Amorphous Carbons by Electron Energy Loss Spectroscopy, Raman Scattering and X-Ray Reflectivity", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 777-779, 7..., 970-976.
- Yo. P. VijaiBharathy, D. Nataraj, D. Mandalaraj, M.S.R.N. Kiran, J. Silvestre-Albero, Q. Yang, "Influence of Tungesten Content in W-DLC NanocompositeThinFilms Prepared by Hybrid Target Biased Ion beam Assisted Deposition Technique", International Journal of Nanoscience, Y, Nos. 2 & o, Y, Y, AoY-Aoo.
- 17. HeonWoong Choi, Jung-Hae Choi, Kwang-Ryeol Lee, Jae-PyoungAhn, Kyu Hwan Oh, " Structure and mechanical properties of Ag-incorporated DLC films prepared by a hybrid ion beam deposition system ", *Thin Solid Films*, o17, Y.V, YEA\_Yo1.
- V. X. J. Hu, J. S. Ye, H. J. Liu, Y. G. Shen, X. H. Chen, and H. Hu," n-type conductivity and phase transition in ultrananocrystalline diamond films by oxygen ion implantation and annealing ", *Journal of Applied Physics*, 1.9, 7.11, .07075.

پانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

- 14. Sk. Faruque Ahmed ,Myoung-Woon Moon, Kwang-Ryeol Lee, "Effect of silver doping on optical property of diamond like carbon films ", *Thin Solid Films*, olv, Y...9, £.Yo\_£.YA.
- 14. L. Bai, G. Zhang, Z. Wu, J. Wang, P. Yan, "Effect of different ion beam energy on properties of amorphous carbon film fabricated by ion beam sputtering deposition (IBSD)", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 774, 7000, 1000-1000.
- Y. P. VijaiBharathya, D. Nataraja, Paul K. Chu, Huaiyu Wang, Q. Yang, M.S.R.N. Kiran, J. Silvestre-Albero, D. Mangalaraj, "Effect of titanium incorporation on the structural, mechanical and biocompatible properties of DLC thin films prepared by reactive-biased target ion beam deposition method", *Applied Surface Science*, YoY, Y.Y., 157–10.

| V <sub>Screen</sub> (kV ) | ID/IG | Position of G peak (cm <sup>-'</sup> ) | Position of D peak (cm <sup>-'</sup> ) |
|---------------------------|-------|--|--|
| ۲/۲                       | ۰/۸۹  | 1004/9                                 | 1889/8                                 |

جدول ۱: گزارش نسبتID/IG در ساختار لایه ناز ک a:DLC با استفاده از طبف رامان.





شکل ۱ : نمایش شماتیک فر آیند انباشت با استفاده از کندو پاش توسط پر تویونی

شکل ۲: نمایش طیف رامان لایه ناز ک a:DLC ایجاد شده با استفاده از روش IBSD



شکل ۳: نمایش طیف عبور لایه ناز کفa:DLC ایجاد شده با استفاده از روش IBSD در محدوده UV-Vis spectroscopy با استفاده از دستگاه UV-Vis spectroscopy



شکل ۴: نمایش تغییرات<sup>۱/۲</sup>(αhv) نسبت به hv در لایه a:DLC انباشت شده با استفاده از روش IBSD



شکل ۵: نمایش AFM لایه ناز که a:DLC انباشت شدهبا استفاده از روش IBSD به مدت ۲۰min .



شکل۵: آنالیز XRDپوشش کامپوزیتی در شرایط بهینه (دانسیته جریان اعمالی ۲۰ میلی آمپر بر سانتی متر مربع).