

## بررسی اثر دمای زیرلایه بر خواص ساختاری و فیزیکی لایه نازک کربن انباشت شده به روش کندوپاش پرتویونی

الهام محقق پور<sup>۱\*</sup>، مرجان رجبی<sup>۲</sup>، رضاغلامی پور<sup>۳</sup>، مجید مجتهدزاده لاریجانی<sup>۴</sup>، شهاب شیبانی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مواد، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

۲- استادیار، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

۳- دانشیار، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

۴- دانشیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، تهران، ایران

\*elham1mohaghegh@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۰۴)

### چکیده

در تحقیق حاضر اثر دمای زیرلایه در محدوده  $36-400^{\circ}\text{C}$  بر خواص ساختاری و فیزیکی لایه نازک کربن ایجاد شده بر سطح شیشه به روش کندوپاش پرتویونی بررسی شده است. خواص نوری و ساختاری لایه به ترتیب به وسیله طیف سنجی UV-visible، طیف سنجی رامان و میکروسکوپ نیروی اتمی مورد مطالعه قرار گرفته است. اندازه گیری طیف عبور نمونه ها کاهش میزان عبور نور در محدوده مرئی با افزایش دمای انباشت را نشان می دهد. طیف رامان لایه ها نشان می دهد که ساختار لایه نازک کربن آمورف با افزایش دمای انباشت به سمت کربن آمورف گرافیتی تغییر می کند. بررسی لایه های انباشت شده در دمای بالاتر از  $100^{\circ}\text{C}$  نشان دهنده روند کاهشی مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده توسط روش چهار کاوه و انرژی نوار ممنوعه با افزایش دمای انباشت می باشد. در حالی که نتایج بررسی مورفولوژی سطح، افزایش زبری سطح در اثر افزایش دمای زیرلایه را نشان می دهد. در نمونه های انباشت شده در دمای  $100^{\circ}\text{C}$ ، حداقل اندازه خوشه های کریستالی گرافیتی با پیوندهای  $sp^2$  برابر با  $0.36\text{ nm}$  و حداکثر انرژی نوار ممنوعه برابر با  $3\text{ eV}$  می باشد.

### واژه های کلیدی:

لایه نازک، کربن آمورف، دمای زیرلایه، کندوپاش پرتویونی.

### ۱- مقدمه

الکتریکی زیاد و قابلیت کنترل نوار ممنوعه دارد. ویژگی های مذکور منجر به استفاده گسترده لایه نازک کربن آمورف در زمینه های مختلف اپتیک، الکترونیک، مکانیک و پزشکی مانند

کربن آمورف مخلوطی از اتم های کربن با پیوندهای هیبریدی مختلف  $sp^2$  و  $sp^3$  می باشد که ویژگی های مطلوبی مانند خنثایی شیمیایی، سختی مکانیکی و مقاومت سایشی بالا، مقاومت

در محدوده  $50^{\circ}\text{C}$  -  $200^{\circ}\text{C}$  بررسی کردند. نتایج حاکی از آن است که مقدار پیوندهای  $\text{sp}^3$ ، ضریب شکست، انرژی نوار ممنوع و مقاومت الکتریکی با افزایش دمای زیرلایه از  $50^{\circ}\text{C}$  به  $100^{\circ}\text{C}$  افزایش و سپس کاهش پیدا می کند.

با توجه به تاثیر مستقیم روش انباشت بر نوع پیوندهای شیمیایی اتم های کربن به علت نقش حیاتی انرژی اتم های کربن در طول انباشت بر خواص لایه نازک کربن آمورف [۱۱-۱۲] و وجود گزارشات متفاوت در دمای تحولات ساختاری و فیزیکی لایه های انباشت شده با روش های مختلف [۶-۱۰]، روش انباشت به عنوان یک پارامتر موثر بر خواص ساختاری و فیزیکی لایه نازک کربن آمورف مورد توجه است.

در میان روش های انباشت، روش کندوپاش پرتو یونی به علت وجود امکان کنترل پارامترهای انباشت شامل انرژی یون ها، دمای زیرلایه و چگالی جریان یون به صورت مستقل برای ایجاد لایه های نازک کربن آمورف به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. علاوه بر آن سرعت کم انباشت منجر به انتقال تدریجی تنش از زیرلایه به فیلم انباشت شده می شود بنابراین پایداری لایه در نتیجه ایجاد چسبندگی مطلوب لایه و زیرلایه افزایش می یابد [۴].

در مقاله حاضر در ادامه تحقیقات گذشته [۱۳] که تاثیر ضخامت بر خواص ساختاری و فیزیکی لایه نازک کربن آمورف و ارتباط بین آنها بررسی شده است، تاثیر دمای انباشت از دمای محیط تا  $400^{\circ}\text{C}$  بر خواص ساختاری و فیزیکی مانند: موفولوژی، مقاومت الکتریکی و خواص نوری لایه نازک کربن آمورف انباشت شده با استفاده از روش کندوپاش پرتو یونی مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش انجام تحقیق

در تحقیق حاضر عملیات لایه نشانی به روش کندوپاش پرتو یونی بر شیشه به عنوان زیرلایه با زبری  $0.73/1 \pm 31 \text{ nm}$  انجام شده است. قبل از فرآیند لایه نشانی، عملیات چربی زدایی و شستشوی نمونه ها در حمام اولتراسونیک به ترتیب با استفاده از استن به

ابزارهای میکروالکترومکانیکی، پوشش های محافظ دریچه های نوری، دیسکهای ذخیره مغناطیسی شده است [۱-۴]. رشد این ساختار که اولین بار توسط آیزنبرگ<sup>۱</sup> و چابت<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۱ و به روش انباشت پرتو یونی گزارش شده، به روش های فیزیکی و شیمیایی مختلفی مانند کندوپاش، انباشت به وسیله لیزر، انباشت با استفاده از تبخیر شیمیایی همراه با پلاسما، انباشت توسط قوس فیلتر شده و انباشت با استفاده از پرتو یونی نیز انجام شده است [۱-۳].

اگرچه نتایج تعداد زیادی از تحقیقات گذشته موید وابستگی شدید ساختار و خواص فیلمهای کربن آمورف به پارامترهای انباشت مانند: دمای انباشت، فشار انباشت، انرژی یون و مانند آن می باشد [۵ و ۱]، از میان این پارامترها، دمای زیرلایه پارامتری مهم است که بر مویلیته ذرات در حال انباشت بر زیرلایه اثر می گذارد. نتایج تحقیقات اسچلز<sup>۳</sup> و همکارانش [۶] که تاثیر دمای زیرلایه ( $25-800^{\circ}\text{C}$ ) بر خواص لایه نازک کربن آمورف انباشت شده به روش PVD را نشان می دهد حاکی از آن است که افزایش دما همراه با باریک شدن پیک ها در طیف رامان می باشد که نشان دهنده افزایش کریستالیتی است. همچنین بیسولد<sup>۴</sup> و همکارانش [۷] که از یک گان الکترونی جهت تبخیر گرافیت و انباشت بر روی سطح شیشه و اکسید سیلیسیم استفاده کردند، روند کاهش مقاومت الکتریکی پوشش با افزایش دما را نشان می دهند به گونه ای که انرژی نوار ممنوعه پوشش نهایی  $0.2 \text{ eV}$  می باشد. البته در لایه های انباشت شده بر سطح تفلون و با استفاده از روش تبخیری فلش<sup>۵</sup> که توسط هوباسک<sup>۶</sup> و همکارانش [۸] در سال ۲۰۱۰ انجام شد، روند مذکور گزارش شده است. همچنین نتایج تحقیقات آقای لاری و همکارانشان [۹] در سال ۲۰۱۲ که با استفاده از روش مگنترون اسپاترینگ انباشت کربن بر فولاد زنگ نزن را انجام دادند حاکی از کاهش مقاومت الکتریکی سطح و تمایل به گرافیتی شدن با افزایش دمای سطح در حین انباشت می باشد. دای<sup>۷</sup> و همکارانش [۱۰] نیز در سال ۲۰۱۵ خواص ساختاری، نوری و الکتریکی لایه نازک کربن آمورف انباشت شده با روش پاشش مگنترونی را

شکل ۱ طیف رامان بدست آمده از لایه کربن انباشت شده در دماهای مختلف انباشت را نشان می دهد. طیف در محدوده جابه جایی رامان در بازه  $1000-2000 \text{ cm}^{-1}$  اندازه گیری شده است. همانگونه که در شکل ها مشاهده می شود همه ی طیف ها از قله ای در محدوده  $1550-1600 \text{ cm}^{-1}$  که به باند G معروف است و مربوط به پیوندهای  $sp^2$  در ساختار گرافیت می باشد و پله ای در حدود  $1360 \text{ cm}^{-1}$  که باند D نامیده می شود و مربوط به عیوب بین صفحه ای در ساختار گرافیت و حضور حلقه های شش ضلعی در فازهای گرافیتی بی نظم است، تشکیل شده است که حاصل همپوشانی دو قله است [۱۴و۱۵]. لذا برای بررسی دقیقتر جزییات طیف، تفکیک این دو قله با استفاده از نرم افزار origin و به روش گوسین انجام شده است. جهت بررسی نوع تحولات ساختاری لایه های انباشت شده بر اساس شکل طیف رامان از طبقه بندی صورت گرفته توسط فراری<sup>۸</sup> و روبرتسون<sup>۹</sup> استفاده شد که برای همه ساختارهای کربن از گرافیت تا کربن آمورف تراهدرال انجام شده است [۱ و ۱۵]. بنابراین بررسی شکل طیف رامان، موقعیت پیک G و نسبت  $I_D/I_G$  که در شکل و جدول گزارش شده است، نشان دهنده تحول ساختاری لایه نازک کربن آمورف در اثر افزایش دمای انباشت است. به این صورت که تحول ساختاری لایه های انباشت شده تا دمای  $100^\circ \text{C}$  از کربن گرافیتی نانو کریستالی به سمت کربن آمورف است در حالی که در لایه های انباشت شده در دمای  $200^\circ \text{C}$  و بالاتر از آن با توجه به جدایش پیک های D و G، در محدوده کربن گرافیتی-گرافیتی نانو کریستالی قرار دارند. به طوری که در لایه انباشت شده در دمای  $400^\circ \text{C}$  پیک D کاملاً از بین می رود و ساختار تقریباً گرافیتی می شود. همان طور که در جدول ۱ ملاحظه می شود با افزایش دمای زیرلایه از  $200^\circ \text{C}$  به  $400^\circ \text{C}$  نسبت  $I_D/I_G$  و عدد مربوط به مکان پیک G کاهش پیدا می کند که این امر نشان دهنده تمایل ساختار به سمت گرافیتی شدن است.

مدت ۱۰ دقیقه، اتانول ۵ دقیقه و آب مقطر، انجام شد. یک ورق گرافیتی خالص در ابعاد  $15 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$  منبع کربن است که با سطح زیرلایه زاویه  $45^\circ$  می سازد. عملیات لایه نشانی بر ۵ نمونه در محدوده دمایی  $36^\circ \text{C}$ – $400^\circ \text{C}$  انجام شد. به این صورت که بعد از ایجاد خلاء تقریبی  $10^{-5}$  Torr، هیتر روشن شده و بعد از تثبیت دمای مورد بررسی فرآیند لایه نشانی در محیط پلاسمای آرگون در فشار تقریبی  $10^{-5}$ – $3 \times 10^{-5}$  Torr انجام شده است. ولتاژ شتابدهنده و مدت زمان انباشت به ترتیب  $2/2 \text{ kV}$  و  $30 \text{ min}$  در همه نمونه های مورد بررسی در نظر گرفته شده است.

ضخامت و مورفولوژی لایه ها به ترتیب با استفاده از دستگاه ضخامت سنج بازتابی (AvaSpec-2048) و میکروسکوپ نیروی اتمی (DS 95; Denmark) که با فرکانس  $3 \text{ Hz}$  و نیروی  $0.1 \text{ nN}$  سطح  $1 \times 1 \mu\text{m}^2$  را به صورت غیر تماسی روبش می کند، محاسبه و بررسی شده است. برای بررسی ساختار پوشش کربنی و مطالعه پیوندها و چیدمان اتم های کربنی در پوشش های اعمال شده از طیف سنجی رامان استفاده شده است. برای این منظور از دستگاه رامان با لیزر Nd:YLF، طول موج  $532 \text{ nm}$  و توان  $30 \text{ mW}$  استفاده شده است. طیف عبور لایه کربن ایجاد شده، با استفاده از طیف سنج UV-Vis (Cary500) در بازه طول موج های  $300-800 \text{ nm}$  اندازه گیری شده است. از روش چهار کاوه با مدل FPP5000 جهت اندازه گیری مقاومت الکتریکی لایه نازک کربن آمورف استفاده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا تحولات ساختاری لایه نازک کربن آمورف در اثر افزایش دمای انباشت مورد بررسی قرار می گیرد و سپس مورفولوژی و خواص فیزیکی لایه ها با رویکرد بررسی وابستگی بین تحولات ساختاری و فیزیکی لایه نازک کربن آمورف انجام می شود.

#### ۳-۱- بررسی خواص ساختاری و مورفولوژی لایه های انباشت شده

پیک  $G$  در این مرحله که نشان دهنده کاهش پیوندهای  $sp^2$  در ساختار است، افزایش پیوندهای  $sp^3$  را تایید می کند.

جدول (۱): گزارش نتایج بررسی خواص ساختاری و الکتریکی لایه نازک کربن آمورف در دمای مختلف

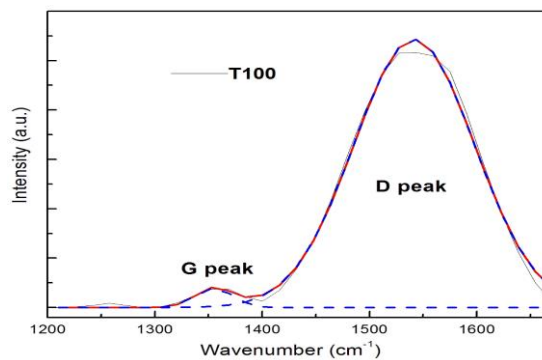
	ضخامت لایه (nm)	مکان پیک $G$ ( $cm^{-1}$ )	$I_D/I_G$	زبری سطح (nm)
T36	$6 \pm 134$	۱۵۵۱/۵	۰/۴۶	$8/0 \pm 44/60$
T100	$6 \pm 121$	۱۵۴۱/۷	۰/۰۷	$2/0 \pm 6/22$
T200	$6 \pm 119$	۱۵۸۸/۶	۱/۷۸	$5/1 \pm 4/00$
T300	$6 \pm 155$	۱۵۷۷/۳	۱/۵۰	$5/2 \pm 55/34$
T400	$6 \pm 173$	۱۶۱۷/۰	-	$6/6 \pm 63/29$

علاوه بر آن در این مرحله اندازه خوشه های کریستالی گرافیت از  $0/91$  nm به  $36/36$  nm کاهش می یابد. جهت محاسبه اندازه نانو کریستالهای گرافیتی با پیوندهای  $sp^2$  از معادله گزارش شده توسط فراری و روبرتسون [۱۵] استفاده شد:

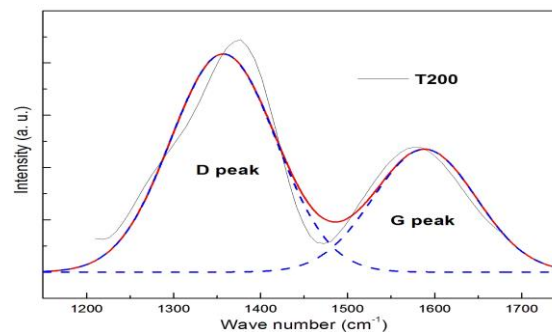
$$\frac{I_D}{I_G} = cL_a^2 \quad (1)$$

در معادله (۱)،  $c$  ثابت و تقریباً برابر با  $0/0055$  و  $L_a$  اندازه ی خوشه های کریستالی گرافیت می باشد. روند کاهشی نسبت  $I_D/I_G$  و مکان پیک  $G$  با افزایش دمای زیر لایه از دمای محیط به  $100^\circ C$  در توافق با نتایج گزارش شده توسط دای و همکارانش [۱۰] می باشد که با استفاده از روش پاشش مگنترونی انباشت لایه نازک کربن آمورف را انجام دادند.

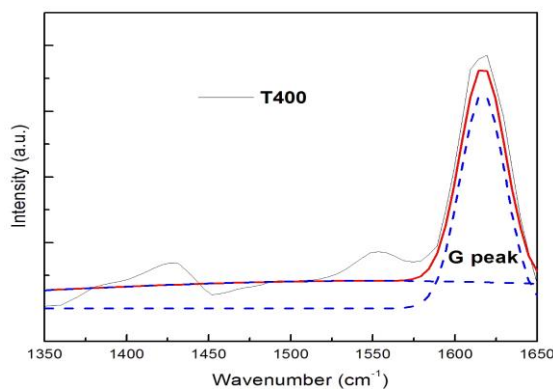
در جدول ۱ مقادیر عددی ضخامت لایه های انباشت شده در دماهای مختلف و در نمودار شکل ۲ روند تغییرات ضخامت لایه ترسیم شده است. همان طور که ملاحظه می شود با پارامترهای ثابت و فقط تحت تاثیر افزایش دمای زیر لایه کاهش ضخامت در محدوده دمایی  $36-200^\circ C$  و سپس افزایش ضخامت در محدوده  $200-400^\circ C$  ملاحظه می شود.



(الف)



(ب)



(ج)

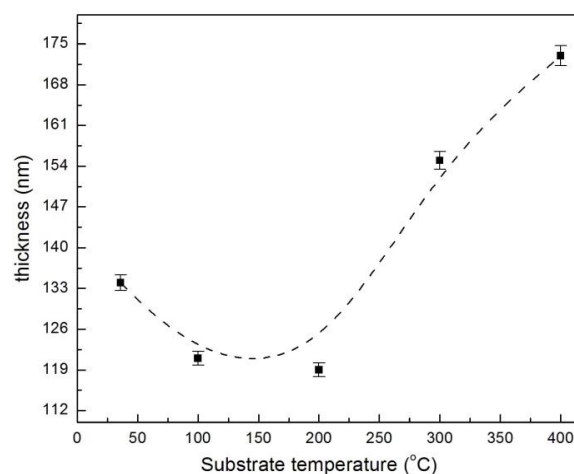
شکل (۱): نمایش طیف رامان لایه های انباشت شده در محدوده دمایی:

(الف):  $100^\circ C$ ، (ب):  $200^\circ C$  و (ج):  $400^\circ C$

هرچند که نسبت  $I_D/I_G$  و مکان پیک  $G$  با افزایش دمای زیر لایه از دمای محیط به  $100^\circ C$  نیز روند کاهشی دارد اما با توجه به تحول ساختاری لایه های مذکور از کربن گرافیتی نانوکریستالی به سمت کربن آمورف، کاهش نسبت  $I_D/I_G$  در این مرحله نشان دهنده کاهش تعداد حلقه های شش وجهی و افزایش رشته های موجود در ساختار کربن آمورف و احتمالاً افزایش پیوندهای  $sp^3$  در ساختار می باشد [۱ و ۱۴ و ۱۶-۱۸]. البته کاهش مکان

عبارت دیگر، پوشش های کربنی لایه نشانی شده در دماهای پایین به اندازه کافی متراکم و فشرده هستند. برعکس، در پوششهای لایه نشانی شده در دماهای بالا تشکیل عیوب سطحی تراکم در ساختار پوشش را کاهش می دهد. البته روند تغییر ضخامت لایه تحت تاثیر افزایش دمای زیرلایه علاوه بر آنکه با تغییر انرژی جنبشی اتم های انباشت شده قابل بررسی و توجیه است به تغییرات ساختاری لایه نازک ناشی از دمای انباشت ارتباط دارد [۱۹]. به این صورت که افزایش پیوندهای  $sp^3$  در ساختار با افزایش دمای انباشت تا  $100^\circ C$  منجر به افزایش چگالی لایه نازک و در نتیجه کاهش ضخامت لایه می شود و در مرحله بعد در نتیجه افزایش میزان عیوب در طول انباشت که به علت افزایش پیوندهای  $sp^2$  رخ می دهد، چگالی لایه نازک کربن آمورف کاهش و ضخامت افزایش می یابد. البته روند افزایشی زبری سطح (جدول ۱) از  $2/0 \pm 6/22 \text{ nm}$  برای نمونه انباشت شده در  $100^\circ C$  به  $6/6 \pm 63/29 \text{ nm}$  برای نمونه انباشت شده در  $400^\circ C$  موید افزایش عیوب سطحی و مقدار پیوندهای  $sp^2$  در نتیجه افزایش دمای انباشت می باشد. این روند در توافق با نتایج تحقیقات مدبر اصل<sup>۱</sup> و همکارانش می باشد [۱۱] با این تفاوت که زبری سطح با افزایش دمای زیرلایه از دمای محیط تا  $100^\circ C$  به علت افزایش توانایی نفوذ اتم های انباشت شده روند کاهشی و بعد از آن افزایش می یابد. البته نتایج گزارش شده در تحقیقات دیگر به ارتباط زبری سطح با اندازه و نظم خوشه های گرافیتی در ساختار لایه نازک اشاره دارند [۲۰-۲۱]. در شکل ۳ تصاویر سه بعدی تعدادی از نمونه های انباشت شده در دماهای مختلف با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی نمایش داده شده است.

پدیده تغییر ضخامت لایه های کربنی با دمای لایه نشانی بسیار جالب است زیرا در شرایطی که سایر عوامل، به ویژه شار اتم های کربن که به سطح زیرلایه می رسند، ثابت نگه داشته می شود، افزایش دما تا دمای  $200^\circ C$  باعث کاهش ضخامت و بعد از آن منجر به افزایش ضخامت شده است.

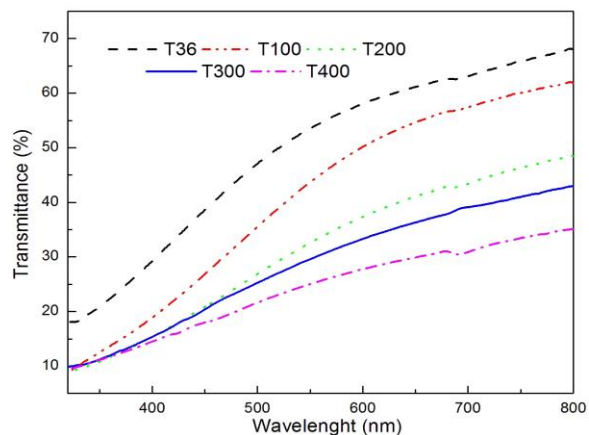


شکل (۲): نمایش تغییرات ضخامت لایه در دماهای مختلف انباشت

به نظر می رسد که در مرحله اول تا دمای  $200^\circ C$  افزایش دما منجر به افزایش انرژی اتم های انباشت شده و در نتیجه حرکت و نفوذ بیشتر در ساختار و افزایش تراکم می شود. از دمای  $200^\circ C$  به بعد با افزایش دمای زیرلایه، قدرت تحرک اتم های کربنی به دام افتاده در لایه های زیرین سطح افزایش پیدا می کند به طوری که اتم های کربن توانایی مهاجرت از لایه های زیرین به سطح لایه یعنی جایی که فرآیند رشد در حال انجام شدن است پیدا می کنند و باعث کاهش چگالی و افزایش ضخامت می شوند [۱۰]. این پدیده می تواند ناشی از تشکیل عیوب سطحی در پوشش باشد به این صورت که با افزایش دما، چگالی عیوب سطحی افزایش می یابد. بنابراین، در صورتی که فرض شود مقدار اتم های کربن که به سطح زیرلایه می رسند با تغییر دما تغییر نکند، واضح است که ضخامت پوشش بدست آمده افزایش خواهد یافت زیرا در ضخامت پوشش ایجاد شده علاوه بر اتم های کربن، تخلخل های ساختاری حضور دارند. به

۳-۲- بررسی خواص فیزیکی لایه های انباشت شده

شکل ۴ طیف عبور نمونه‌ها در محدوده طول موج ۸۰۰-۳۰۰ را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش دمای انباشت، میزان عبور از لایه کاهش پیدا می‌کند که این امر با تغییرات ضخامت و خواص ساختاری لایه‌ها همخوانی دارد.

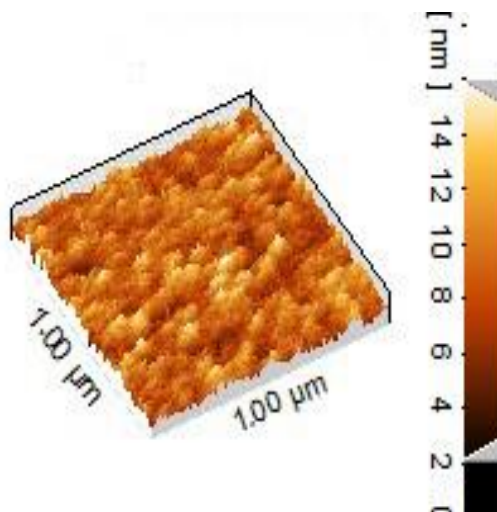


شکل (۴): طیف عبور نمونه‌های انباشت شده با دمای انباشت متفاوت

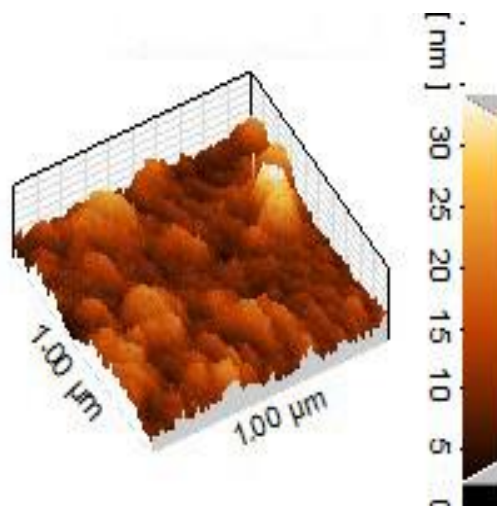
جهت محاسبه انرژی نوار ممنوعه براساس مطالب بیان شده در مورد خواص لایه نازک کریستالین آمورف که موید انتقال الکترونی غیرمستقیم بین باند ظرفیت و باند رسانشی می‌باشد [۲۲] از معادله تاک<sup>۱۱</sup> استفاده شد. معادله مذکور در تعدادی از مقالات به صورت زیر می‌باشد [۱ و ۲۳-۲۷]:

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

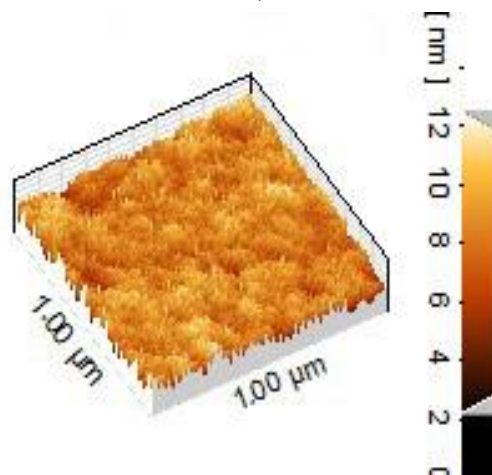
که در این رابطه  $\alpha$  ضریب جذب لایه نازک،  $h$  ثابت پلانک،  $\nu$  فرکانس فوتون تابشی به لایه نازک،  $B$  یک مقدار ثابت و  $E_g$  مقدار انرژی نوار ممنوعه می‌باشد. با برونیابی خط مماس نمودار  $(\alpha h\nu)^{1/2}$  نسبت به  $h\nu$  در لبه جذب و محاسبه محل برخورد خط مماس با محور انرژی، مقدار انرژی فوتون در شرایطی که مقدار جذب صفر می‌شود بدست می‌آید که برابر با اندازه ی انرژی نوار ممنوعه می‌باشد. البته بر اساس تحقیقات انجام شده توسط پاول<sup>۱۲</sup> و همکارانش [۲۸] و همچنین درواند دروچین<sup>۱۳</sup> و



T100 (الف)

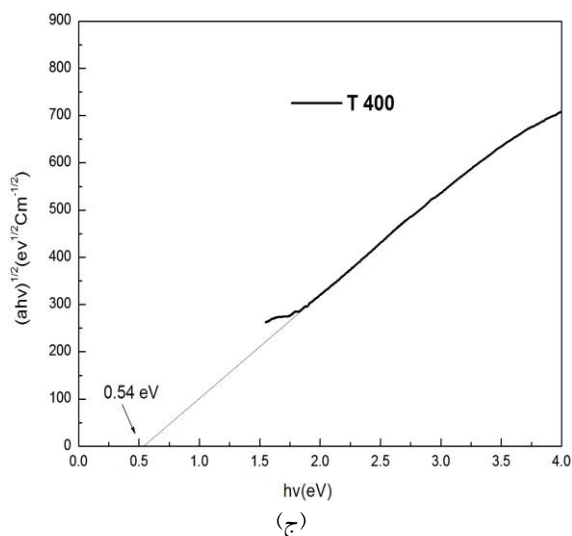


T200 (ب)



T400 (ج)

شکل (۳): نمایش توپوگرافی سطح لایه های انباشت شده در دماهای مختلف با استفاده از آنالیز AFM: (الف): ۱۰۰ °C، (ب): ۴۰۰ °C، (ج): ۴۰۰ °C



شکل (۵): انرژی نوار ممنوعه نمونه های انباشت شده در دمای متفاوت:

(الف): ۱۰۰ °C، (ب): ۲۰۰ °C و (ج): ۴۰۰ °C

جدول (۲): خواص الکتریکی و نوار ممنوعه نمونه های انباشت شده با دمای انباشت متفاوت (\* مقاومت الکتریکی نمونه بالاتر از ۴۵۰ kΩ/square)

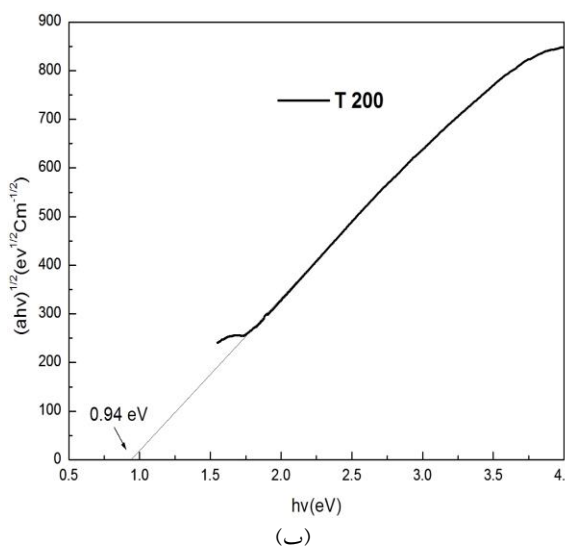
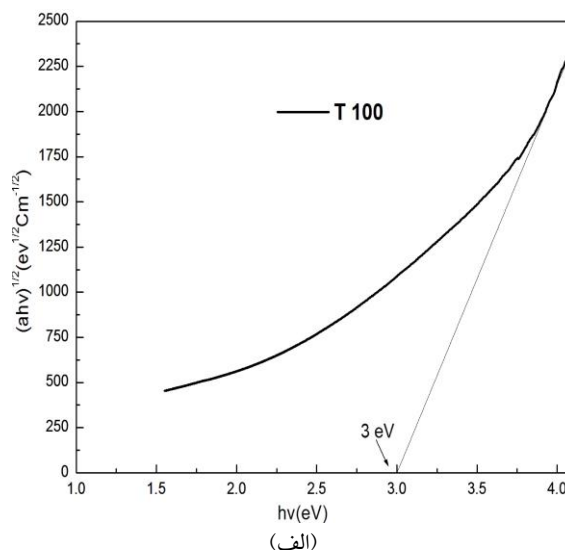
کد نمونه	$E_{Tauc}$	مقاومت الکتریکی (kΩ/square)
T36	۱/۰۶	*
T100	۳	*
T200	۰/۹۴	۸/۷۸
T300	۰/۸۴	۱/۶۷
T400	۰/۵۴	۲/۳۲

همان طور که ملاحظه می شود با افزایش دمای زیرلایه در حین انباشت، انرژی نوار ممنوعه ابتدا افزایش و سپس با افزایش دمای انباشت از ۱۰۰ °C به ۴۰۰ °C کاهش می یابد و روند تغییرات مقاومت الکتریکی یک روند کاهشی است. تحلیل و بررسی تحولات مذکور با استفاده از بررسی تحولات ساختاری، زبری سطح و ضخامت لایه نازک کربن آمورف در اثر دمای انباشت قابل توجه است. به این صورت که با توجه به کاهش ضخامت در اثر افزایش دمای انباشت تا ۱۰۰ °C و زبری سطح که منجر به افزایش میزان انعکاس در لایه نازک می شود، مقدار ضریب جذب ( معادله ۳) که رابطه مستقیم با مقدار انرژی نوار ممنوعه دارد افزایش می یابد. علاوه بر آن با توجه به اینکه کاهش نسبت

همکارانش [۲۹-۳۰] در شرایطی که انرژی فوتون بین ۶ eV - ۲ است، مقدار ضریب جذب از رابطه ذیل بدست می آید:

$$\alpha = \frac{\left\{ \text{Ln} \left[ \frac{(1-R)^2}{T} \right] \right\}}{d} \quad (3)$$

که در این رابطه T و R ترتیب درصد عبور و انعکاس می باشد و d ضخامت لایه نازک است. تغییرات  $(\alpha hv)^{1/2}$  نسبت به انرژی فوتون و همچنین مقاومت الکتریکی نمونه ها به ترتیب در شکل ۵ و جدول ۲ گزارش شده است.



نویسندگان از آقای مجید ملک به دلیل همکاری در زمینه انجام فرآیند لایه نشانی با استفاده از سیستم کندوپاش پرتو یونی صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

#### ۶- مراجع

- [1] J. Robertson, "Diamond-Like Amorphous Carbon", Materials Science and Engineering R, Vol. 37, pp. 129-281, 2002.
- [2] S. Aisenberg & R. Chabot, "Ion-beam deposition of thin films of diamondlike carbon", Journal of Applied Physics, Vol. 42, pp. 2953-2958, 1971.
- [3] 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, Vol. 257, pp. 4699-4705, 2011.
- [4] W. S. Choi & B. Hong, "Synthesis and Characterization of Diamond-Like Carbon Protective AR Coating", Journal of the Korean Physical Society, Vol. 45, pp. S864-S867, 2004.
- [5] N. Dwivedi, S. Kumar, H. K. Malik, C. M. S. Govind, O. S. Rauthan & Panwar, "Correlation of  $sp^3$  and  $sp^2$  fraction of carbon with electrical, optical and, nano-mechanical properties of argon-diluted diamond-like carbon films", Applied Surface Science, Vol. 257, pp. 6804-6810, 2011.
- [6] S. Schelz, T. Richmond, P. Kania, P. Oelhafen & H. J. Güntherodt, "Electronic atomic structure of evaporated carbon films", Surface Science, Vol. 359, pp. 227-236, 1996.
- [7] J. Besold, R. Thielsch, N. Matz, C Frenzel, R. Born & A. Mobius, "Surface and bulk properties of electron beam evaporated carbon films", Thin Solid Films, Vol. 293, pp. 62-102, 1997.
- [8] T. Hubacek, O. Lyutakov, V. Rybka & V. Svorcik, "Electrical properties of flash-evaporated carbon nanolayers on PTFE", Journal of Materials Science, Vol. 45, pp. 279-281, 2010.
- [9] M. Yaria, M. M. Larijani, A. Afshar, M. Eshghabadi & A. Shokouhy, "Physical properties of sputtered amorphous carbon coating", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 513, pp. 135-138, 2012.

ارتباط نزدیکی با افزایش پیوندهای  $sp^3$  دارد [۱ و ۶ و ۱۶-۱۸] افزایش انرژی نوار ممنوعه در این مرحله توجیه می‌شود. در مرحله بعد با افزایش دمای انباشت که ساختار به سمت گرافیتی شدن تمایل پیدا می‌کند، کاهش انرژی نوار ممنوعه و مقاومت الکتریکی قابل پیش بینی است زیرا اندازه خوشه های گرافیتی که با کاهش انرژی نوار ممنوعه افزایش می‌یابد منجر به افزایش چگالی حالت  $\pi$  و در نتیجه کاهش مقاومت الکتریکی می‌شود. افزایش مقاومت الکتریکی از  $1/67 \text{ k}\Omega/\text{square}$  به  $2/32 \text{ k}\Omega/\text{square}$  با افزایش دمای انباشت از  $300^\circ\text{C}$  به  $400^\circ\text{C}$  احتمالاً به علت افزایش زبری سطح می‌باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

پوشش های کربنی آمورف به روش کندوپاش پرتو یونی ایجاد شده و تحولات ساختاری و فیزیکی پوشش حاصل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که تحول ساختاری لایه نازک کربن آمورف در اثر افزایش دمای انباشت از دمای محیط تا دمای  $100^\circ\text{C}$  از کربن گرافیتی نانو کریستالی به سمت کربن آمورف همراه با کاهش نسبت  $I_D/I_G$ ، مکان پیک  $G$  و افزایش انرژی نوار ممنوعه است در حالی که در لایه های انباشت شده در دمای  $200^\circ\text{C}$  و بالاتر از آن ساختار در محدوده کربن گرافیتی- گرافیتی نانو کریستالی قرار دارد. به طوری که در لایه انباشت شده در دمای  $400^\circ\text{C}$  پیک  $D$  کاملاً از بین می‌رود و ساختار تقریباً گرافیتی می‌شود. درصد عبور نور در محدوده نور مرئی با افزایش دمای لایه نشانی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج وجود همبستگی میان مقادیر مقاومت سطحی و اندازه خوشه های گرافیت را نشان می‌دهند.

#### ۵- تشکر و قدردانی



- Journal of Vacuum Science & Technology, Vol. 14A, pp. 431, 1996.
- [20] Z. Tang, Z. Zhang, K. Narumi, Y. Xu, H. Naramoto, S. Nagai & K. Miyashita, "Effect of mass-selected ion species on structure and properties of diamond-like carbon films", Journal of Applied Physics, Vol. 89, pp. 1959–1964, 2001.
- [21] S. Kataria, S. Dhara, H. C. Barshilia, S. Dash & A. Tyagi, "Evolution of coefficient of friction with deposition temperature in diamond like carbon thin films", Journal of Applied Physics, Vol. 112, pp. 023525, 2012.
- [22] Alexandrou, A. J. Papworth, C. J. Kiely, G. A. J. Amaratunga & L. M. Brown, "Calculation of the bandgap and of the type of interband transitions in tetrahedral amorphous carbon using electron energy loss spectroscopy", Diamond and Related Materials, Vol. 13, pp. 1408–1411, 2004.
- [23] Sk. F. Ahmed, M. W. Moon & K. R. Lee, "Effect of silver doping on optical property of diamond like carbon films", Thin Solid Films, Vol. 517, pp. 4035–4038, 2009.
- [24] M. Pal, K. Hirota & H. Sakata, "Electrical and optical properties of as-deposited V2O5–TeO2 amorphous films and their annealing effect", physica status solidi, Vol. 196A, pp. 396–404, 2003.
- [25] M. Elena, S. Vergara, J. C. A. Huitron, A. R. Gomez & J. N. R. Burstin, "Determination of the optical gap in thin films of amorphous dilithiumpthalocyanine using the Tauc and Cody models", Molecules, Vol. 17, pp. 10000-10013, 2012.
- [26] V. Vasin, L. A. Matveeva & A. M. Kutsa, "Analysis of the fundamental absorption edge in amorphous hydrogenated carbon films", Technical Physics Letters, Vol. 25, pp. 83-87, 1999.
- [27] ا. اسحاقی، ف. مجیری، ا. کرمی و ا. ابراهیم زاده، "اثر اعمال نانو فیلم کربن شبه الماسی بر بازدهی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی"، فصلنامه علمی-پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۹، شماره ۲، صفحه ۹-۱۵، تابستان ۱۳۹۴.
- [28] P. K. Chu & L. Li, "Characterization of amorphous and nanocrystalline carbon films", Materials
- [10] 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, Vol. 126, pp. 861-64, 2015.
- [11] Modabber Asl, P. Kameli, M. Ranjbar, H. Salamati & M. Jannesari, "Correlations between microstructure and hydrophobicity properties of pulsed laser deposited diamond-like carbon films", Super lattices and Microstructures, Vol. 81, pp. 64-79, 2015.
- [12] Voevodin & M. Donley, "Preparation of amorphous diamond-like carbon by pulsed laser deposition: a critical review", Surface Coating Technology, Vol. 82, pp. 199-213, 1996.
- [13] E. Mohaghehpour, 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, Vol. 360, pp. 52-58, 2016.
- [۱۴] م. یاری، م. مجتهدزاده و ع. افشار، "تأثیر زمان لایه نشانی بر خواص ساختاری و فیزیکی پوشش‌های کربنی لایه نشانی شده با روش کندوپاش مگنترونی"، فصلنامه علمی-پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۵، شماره ۲، صفحه ۱۰-۱، تابستان ۱۳۹۰.
- [15] A. C. Ferrari & J. Robertson, "Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon", physical review, Vol. 61B, pp. 14095-14107, 2000.
- [16] C. Ferrari, "Determination of bonding in diamond-like carbon by Raman spectroscopy", Diamond and Related Materials, Vol. 11, pp. 1053-1061, 2002.
- [17] Weissmantel, H. J. Erler & G. Reisse, "Ion Beam Techniques for Thin and Thick Film Deposition", Surface Science, Vol. 86, pp. 207-221, 1979.
- [18] M. Kitabatake & K. Wasa, "Growth of diamond at room temperature by an ion-beam sputter deposition under hydrogen-ion bombardment", Journal of Applied Physics, Vol. 58, pp. 1693-1695, 1985.
- [19] M. A. Capano & N. T. McDevitt, "Characterization of amorphous carbon thin films",

[13] Durand-Drouhin

Chemistry and Physics, Vol. 96, pp. 253–277, 2006.

[29] O. Durand-Drouhin, M. Lejeune & M. Benlahsen, “Growth and bonding structure of hard hydrogenated amorphous carbon thin films deposited from an electron cyclotron resonance plasma”, Journal of Applied Physics, Vol. 91, pp. 867–873, 2002.

[30] O. Durand-Drouhin, A. Zeinert, M. Benlahsen, K. Zellama, R. Kré, G. Turban & A. Grosman, “On the microstructural, optical and mechanical properties of hydrogenated amorphous carbon films deposited in electron cyclotron resonance plasma”, Diamond and Related Materials, Vol. 9, pp. 752–755, 2000.

۲-پی نوشت

- 
- [1] Aisenberg
  - [2] Chabot
  - [3] Schelz
  - [4] Besold
  - [5] flash-evaporated
  - [6] Hubacek
  - [7] Dai
  - [8] Ferrari
  - [9] Robertson
  - [10] Modabber Asl
  - [11] Tuce
  - [12] Paul