

ارزیابی لایه نازک کربن شبه الماسی اعمال شده به روش رسوب شیمیایی بخار تقویت شده با پلازما بر عملکرد سلول خورشیدی سیلیکونی

اکبر اسحاقی^{۱*}، فخرالدین مجیری^۲ و اسماعیل کرمی^۲

چکیده

در این بررسی لایه نازک کربن شبه الماسی بر سلول خورشیدی سیلیکونی پلی کریستال نوع P با استفاده از دو گاز هیدروژن و متان به روش رسوب شیمیایی بخار تقویت شده به کمک پلازما با منبع تغذیه فرکانس رادیویی (RF-PECVD) اعمال گردید. سپس چسبندگی پوشش به زیرلایه، ساختار کریستالی، نوع پیوندها، نسبت هیبریداسیون SP^2 به SP^3 ، توپوگرافی و مورفولوژی سطح پوشش به ترتیب به وسیله روش‌های آزمون نوار چسب، پراش پرتو ایکس، طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز، طیف سنجی رامان، میکروسکوپ نیروی اتمی و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه منحنی‌های ولتاژ-جریان نمونه‌های سیلیکونی در دو حالت بدون پوشش و با پوشش کربن شبه الماسی به وسیله I-V meter اندازه‌گیری شد و بازدهی تعیین شد. نتایج نشان داد با اعمال پوشش کربن شبه الماسی رافنس سطح کاهش یافته است. همچنین، نتایج آزمون اندازه‌گیری جریان-ولتاژ نشان داد با اعمال لایه نازک کربن شبه الماسی بازدهی سلول خورشیدی حدود ۳۷٪ مقدار اولیه افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: لایه نازک، کربن شبه الماسی، سلول خورشیدی، PECVD.

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، ایران.
 ۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، ایران.
 * - نویسنده مسئول مقاله: eshaghi.akbar@gmail.com

پیشگفتار

امروزه، بحران‌های سیاسی، اقتصادی و مسائلی نظیر محدودیت دوام ذخایر فسیلی، نگرانی‌های زیست محیطی، ازدحام جمعیت، رشد اقتصادی و ضریب مصرف، همگی مباحث جهان شمولی هستند که با گستردگی تمام، فکر اندیشمندان را دریافتن راهکارهای مناسب در حل معضلات انرژی درجهان، بویژه بحران‌های زیست محیطی، به خود مشغول داشته است. خوشبختانه، بیش‌تر کشورهای جهان به اهمیت و نقش منابع گوناگون انرژی، بویژه انرژی‌های تجدیدپذیر(نو) در تأمین نیازهای حال و آینده پی برده و به گونه گسترده، در توسعه بهره برداری از این منابع لایزال، پژوهش‌های گسترده و سرمایه گذاری‌های اصولی می‌کنند. بدیهی است امروزه، پشتوانه اقتصادی و سیاسی کشورها، بستگی به مقدار بهره وری آن‌ها از منابع فسیلی دارد و تهی شدن منابع فسیلی، نه تنها تهدیدی است برای اقتصاد کشورهای صادرکننده بلکه نگرانی عمده‌ای را برای نظام اقتصادی کشورهای وارد کننده بوجود آورده است. بنابراین، امروزه تمام کشورهای جهان در رابطه با مسائل تأمین امنیت انرژی و گرم شدن زمین، افزایش در استفاده از انرژی تجدیدپذیر را راه مقابله با این مشکلات می‌دانند. یکی از انواع منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی می‌باشد. خورشید به عنوان یک منبع بی پایان انرژی می‌تواند حلال بسیاری از مشکلات موجود در مورد انرژی و محیط زیست باشد. انرژی خورشیدی که به زمین می‌تابد هزاران بار بیش‌تر از آن مقداری است که بشر نیاز دارد. از انرژی خورشیدی می‌توان به عنوان یک انرژی تمیز و قابل دسترس، استفاده‌های مهم و کاملاً مفید کرد [۱]. سلول‌های خورشیدی سیلیکونی مورد استفاده در بهره‌گیری از انرژی خورشیدی به دلیل ضریب شکست بالا، از بازدهی پایینی برخوردارند. از این‌رو، استفاده از پوشش‌های ضد بازتاب در افزایش بازدهی آن‌ها اهمیتی بسزا دارد [۲]. ترکیبات زیادی هستند که به عنوان پوشش ضد بازتاب بر سلول‌های خورشیدی سیلیکونی اعمال می‌شوند که از آن جمله می‌توان به Si_3N_4 , TiO_2 , ZnO , MgF_2 , ZnS , SiO_2 اشاره کرد. [۳]. این پوشش‌ها محدودیت‌هایی را به همراه دارند برای مثال، فیلم‌های SiO_2 از شاخص بازتاب بالایی برخوردار بوده و مقاومت به سایشی پایینی دارند و یا

لایه‌های نیتريد سيليسيم به دليل جذب بالایی که در ناحیه امواج مرئی دارند کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲، ۳ و ۴]. در سال‌های اخیر لایه نازک کربن شبه الماسی به دلیل خواص محافظتی و ضد بازتابی نظیر ضریب اصطکاک پایین، خنثی بودن از نظر شیمیایی، پهنای باند عریض و تنظیم‌پذیر، ضریب شکست کم و تنظیم‌پذیر و ... توانسته توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کند [۵].

در این مطالعه لایه نازک کربن شبه الماسی به روش رسوب شیمیایی بخار تقویت شده به کمک پلاسما با منبع تغذیه فرکانس رادیویی^۱ (RF-PECVD) بر سطح سلول خورشیدی سیلیکونی نوع P اعمال گردید. منحنی‌های جریان - ولتاژ سلول خورشیدی سیلیکونی در دو حالت بدون پوشش و پوشش داده شده با کربن شبه الماسی به وسیله دستگاه I-V meter اندازه‌گیری شد و سپس بازدهی سلول‌های خورشیدی محاسبه گردید.

مواد و روش پژوهش

مواد

در این پژوهش از دو گاز هیدروژن و متان با خلوص ۹۹/۹۹٪ برای ساخت لایه نازک کربن شبه الماسی استفاده شد. همچنین، زیر لایه خام از جنس سلول خورشیدی سیلیکونی پلی کریستال نوع p (بدون هیچ گونه پوششی) با ابعاد 50×50 میلی متر ساخت شرکت هدایت نور (از گروه شرکت‌های صنایع شهید قندی) تهیه گردید.

لایه نشانی

در ابتدا تمامی نمونه‌ها با آب و صابون و الکل به دقت شستشو شدند. سپس نمونه‌ها در الکل به مدت ۲۰ دقیقه زیر امواج آلتراسونیک قرار گرفتند. همچنین، فرآیند پلاسما اسپینگ هیدروژن به عنوان فرآیندی تکمیلی جهت رفع آلودگی‌های ناخواسته احتمالی و فعال‌سازی سطح زیر لایه‌ها بمنظور افزایش چسبندگی پوشش به سطح زیر لایه

^۱ - Radio Frequency Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition

برای بررسی ساختار لایه نازک کربن شبه الماسی از روش پراش پرتو ایکس استفاده شد [۵]. در این پژوهش الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌ها با استفاده از پراش سنج پرتو ایکس مدل D8 Advance از شرکت Bruker ساخت کشور آلمان و با تابش K_{α} مس، در بازه 2θ بین 10° - 80° بدست آمد.

برای مشخصه‌یابی ویژگی‌های پیوند در لایه نازک کربن شبه الماسی طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز با تکنیک بازتاب کلی تضعیف شده استفاده شد [۸]. مدل دستگاه استفاده شده در این پژوهش FTIR- Tensor27 از شرکت Bruker ساخت کشور آلمان است.

از طیف سنج رامان برای مشخصه‌یابی ساختار پوشش کربن شبه الماسی به دلیل قابلیت تشخیص آن در نوع هیبریداسیون‌های اوربیتالی (sp^2 و sp^3) استفاده شد [۹]. دستگاه طیف سنجی رامان که در این پژوهش استفاده شده است، مدل (2009) SENTERRA از شرکت Bruker ساخت کشور آلمان است. این طیف سنجی در محدوده طول موجی $4000 - 700 \text{ cm}^{-1}$ انجام شد.

برای بررسی توپوگرافی، با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی تصاویر سه بعدی از سطح سلول‌های خورشیدی پیش و پس از اعمال لایه نازک کربن شبه الماسی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی مدل Veeco CPR USA در حالت تماسی و مد نیرو ثابت تهیه شد.

بمنظور تعیین ریخت شناسی پوشش، تصویر برداری از سطح نمونه سیلیکونی، به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی انجام شد. در این پژوهش از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل S4160 Hitachi با ولتاژ کاری 20 kv و بزرگنمایی 300 ، 3000 و 15000 برابر استفاده شد.

بازدهی سلول‌های خورشیدی از منحنی‌های ولتاژ-جریان بدست می‌آید. برای بدست آوردن منحنی‌های ولتاژ-جریان از دستگاه شبیه‌ساز خورشیدی مدل Sun 2000 از شرکت ABET TECHNOLOGIES ساخت آمریکا استفاده شده است.

انجام گرفت [۶]. پارامترهای این فرآیند در جدول ۱ آورده شده است. پس از فرآیند تمیزکاری، فرآیند لایه نشانی با استفاده از روش رسوب شیمیایی بخار تقویت شده با پلاسما صورت گرفت. پارامترهای این فرآیند در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای فرآیند پلاسما اچینگ هیدروژن.

پارامتر (واحد)	مقدار
فشار اولیه (Torr)	10^{-6}
توان فرکانس (W)	۱۰۰
دبی گاز هیدروژن (SCCM)	۵۰
فشار محفظه (Torr)	۱
زمان اچینگ (min)	۱۰
دمای فرآیند ($^{\circ}\text{C}$)	۲۰

جدول ۲- شرایط فرآیند لایه نشانی لایه نازک کربن شبه الماسی.

پارامتر (واحد)	مقدار
توان فرکانس (W)	۱۰۰
دبی گاز هیدروژن به متان (SCCM)	۴۰ به ۱۰
فشار محفظه (Torr)	۱
ضخامت پوشش (nm)	۸۰

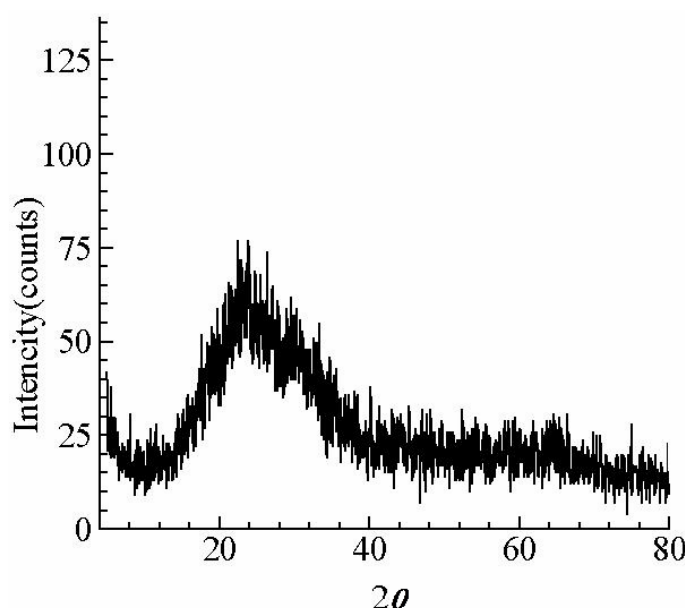
روش‌های مشخصه‌یابی

در این پژوهش بمنظور تعیین چسبندگی پوشش به زیرلایه، روش آزمون نوار انجام شد. آزمون نوار یک روش ساده جهت بررسی چسبندگی برای پوشش‌های اپتیکی است. در این روش نوار سلفونی با عرض $12/7$ میلی‌متر بر سطح پوشش چسبانده شده و سپس کاملاً عمودی و یکباره از سطح پوشش جدا می‌شود. این روش با استانداردهای L-T-90 نوع ۱ منطبق است و صرفاً برای کاربردهای اپتیکی قابل قبول می‌باشد و برای کاربردهای مکانیکی لازم است از سایر روش‌های تعیین چسبندگی استفاده شود [۷].

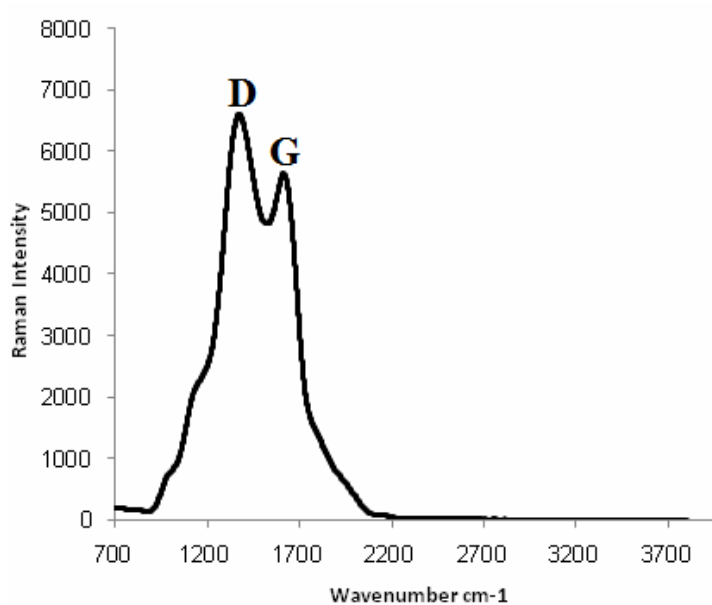
نتایج و بحث

شکل ۲ نتایج بدست آمده از آزمون طیف سنجی رامان را نشان می‌دهد. طیف رامان از پوشش‌های کربن شبه الماسی عموماً با یک پیک G در حدود ناحیه $\frac{1}{cm}$ ۱۵۵۰ و یک پیک D در حدود ناحیه $\frac{1}{cm}$ ۱۳۶۰ همراه است [۱۱-۱۴].

بمنظور تعیین چسبندگی پوشش به زیرلایه، از روش آزمون نوار استفاده شد. با توجه به این روش، لایه نازک کربن شبه الماسی اعمال شده بر سطح زیرلایه سیلیکونی کاملاً چسبیده بود [۷].
شکل ۱ الگوی پراش پرتو ایکس از لایه نازک کربن شبه الماسی را نشان می‌دهد. نتایج نشان دادند که پوشش ساختار آمورف دارد [۵ و ۱۰].



شکل ۱- الگوی پراش پرتو ایکس از لایه نازک کربن شبه الماسی.



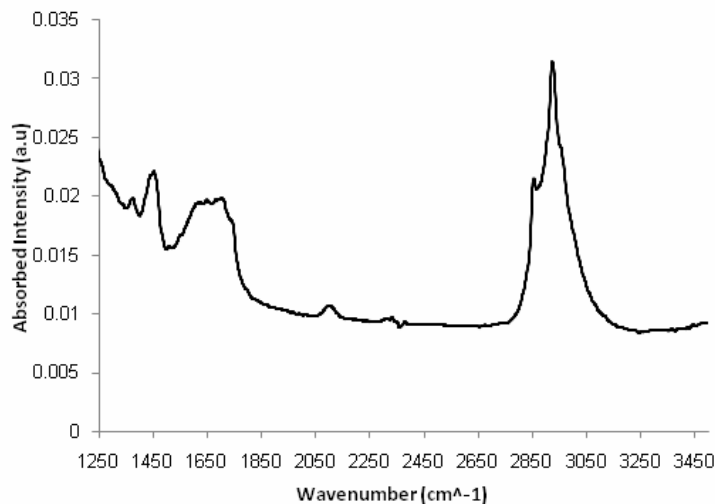
شکل ۲- نمودار طیف سنجی رامان از لایه نازک کربن شبه الماسی.

باند افزایش و ضریب خاموشی (K) کاهش می‌یابد زیرا هیبریداسیون اوربیتالی SP^2 کاهش یافته است [۲۴].
گفتنی است شدیدتر بودن پیک D نسبت به پیک G، نشأت گرفته از میزان هیدروژن‌های اتمی است. با افزایش گاز هیدروژن نسبت به گاز متان، هیدروژن‌های اتمی، با رادیکال‌های آزاد (غیر پیوندی) واکنش می‌دهد و آن‌ها را غیر فعال می‌کند. این پدیده باعث تشکیل بیش‌تر هیبریداسیون اوربیتالی SP^3 نسبت به SP^2 می‌شود [۲۵].
شکل ۳ طیف ATR-FTIR از لایه نازک کربن شبه الماسی را نشان می‌دهد. در طیف سنجی ATR-FTIR پیوندهای گوناگون، فرکانس‌های ارتعاشی متفاوتی دارند و در نتیجه، هر کدام در فرکانس مشخصه خود، نوار جذبی معینی در طیف زیر قرمز دارند که باعث شناسایی آن پیوند شیمیایی می‌شود.

پیک‌های G و D مربوط به مشخصات هیبریدهای sp^2 در پوشش‌های کربنی می‌باشد. پیک G مربوط به هیبریدهای پیوسته sp^2 به هر دو صورت حلقه‌ای و زنجیره‌ای و پیک D مربوط به هیبریدهای گسسته sp^2 به صورت حلقه‌ای می‌باشد [۱۰-۲۱]. از عدد موج و شدت پیک‌های G و D، می‌توان کسر هیبریدهای sp^3 موجود در پوشش را محاسبه نمود. شدت پیک G را I_G و شدت پیک D را I_D می‌نامند [۲۲]. شدیدتر بودن پیک D نسبت به G بیانگر بیشتر بودن هیبریداسیون اوربیتالی SP^3 نسبت به هیبریداسیون اوربیتالی SP^2 است [۲۳]. این مطلب در رابطه ۱ با نسبت I_D/I_G نیز مشهود است.

$$I_D / I_G = 6610 / 5650 = 1/17 \quad (1)$$

نسبت I_D/I_G بیانگر خواص پوشش است. هر چه این نسبت افزایش یابد خواص شبه الماسی پوشش مانند پهنای



شکل ۳- طیف ATR-FTIR لایه نازک کربن شبه الماسی.

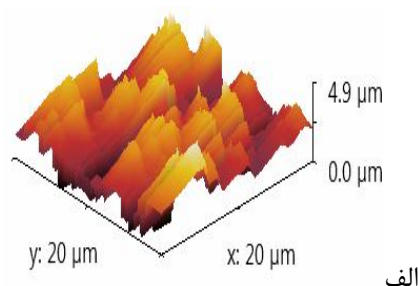
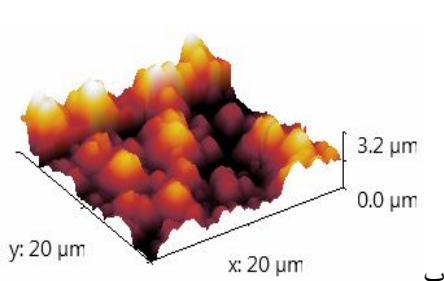
1600 cm^{-1} نشان دهنده اتصال $C=C$ است [۲۶].
حالت‌های گوناگون بسط $C-H$ در طول موج‌های گوناگون در جدول ۳ مشخص شده است.

در این طیف، جذبی که در ناحیه $3000 \pm 150 \text{ cm}^{-1}$ قرار دارد مربوط به ارتعاشات کششی $C-H$ در مولکول است. نوار جذبی در نزدیکی 1400 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات خمشی $C-H$ و همچنین، نوار جذبی در نزدیکی

جدول ۳- تخصیص طول موج به بسط‌های C-H در لایه نازک کربن شبه الماسی [۴ و ۲۶ و ۲۷].

بسط‌های C-H	طول موج (بر سانتی‌متر)
CH ₃ کششی نامتقارن	۲۹۵۵
CH ₂ کششی نامتقارن	۲۹۲۰
CH کششی نامتقارن	۲۹۲۰
CH ₂ کششی متقارن	۲۸۵۵
CH ₂ خمشی متقارن	۱۴۵۰
CH ₃ خمشی متقارن	۱۳۷۵

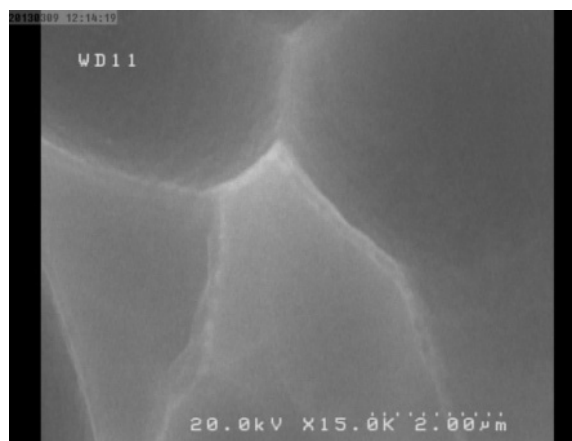
شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی از سطح سلول‌های خورشیدی پیش و پس از اعمال لایه نازک کربن شبه را نشان می‌دهد. نتایج نشان دادند که زبری سطح نمونه از ۸۶۲ نانومتر در حالت بدون پوشش به ۷۳۱ نانومتر در حالت پوشش‌دار کاهش می‌یابد. بررسی‌های بیش‌تر نشان دادند که لایه نازک کربن شبه الماسی زبری سطح زیرلایه را به مقدار ۱۵ درصد کاهش داده است. هرچه زبری سطح سلول کمتر باشد، درصد بازتاب نور از سطح سلول کاهش می‌یابد و در نتیجه، بازدهی سلول افزایش می‌یابد [۶ و ۲۹].



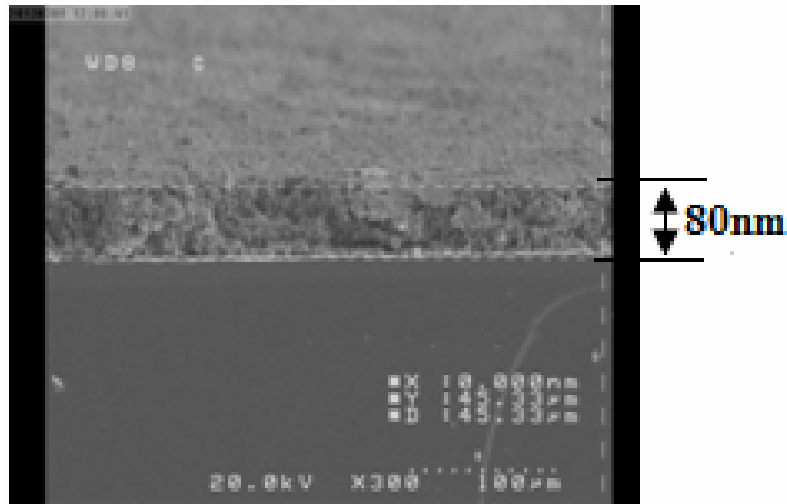
شکل ۴- تصویر سه بعدی میکروسکوپ نیروی اتمی از سطح سلول خورشیدی (الف) پیش از اعمال لایه نازک کربن شبه الماسی (ب) پس از اعمال لایه نازک کربن شبه الماسی.

الماسی را نشان می‌دهد. بررسی‌ها نشان دادند پوشش اعمال شده از یکنواختی مناسبی برخوردار است که این پارامتر در دستیابی به بازدهی‌های بالا به سبب اثر گذاری بر خواص نوری پوشش مانند درصد عبور و بازتاب نور دارای اهمیت است.

شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از سطح لایه نازک کربن شبه الماسی را نشان می‌دهد. نتایج، نبود ترک، ناپیوستگی و تخلخل در سطح پوشش را نشان داد. شکل ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از مقطع لایه نازک کربن شبه



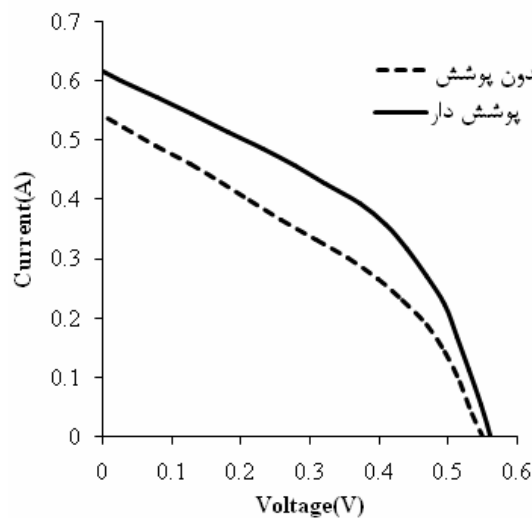
شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی لایه نازک کربن شبه الماسی.



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از مقطع لایه نازک کربن شبه الماسی.

بازدهی سلول‌های خورشیدی از منحنی‌های ولتاژ-جریان بدست می‌آید. منحنی ولتاژ-جریان برای دو حالت سلول خورشیدی پوشش‌دار و بدون پوشش در شکل ۷ دیده می‌شود. از این منحنی می‌توان جریان مدار کوتاه (I_{sc})، ولتاژ مدار باز (V_{oc})، جریان بیشینه (I_m) و ولتاژ بیشینه

بازدهی سلول‌های خورشیدی را بدست آورد. بدین منظور (I_{sc}) و (V_{oc}) به ترتیب بیشینه جریان و ولتاژ هستند که از روی منحنی به راحتی قابل مشاهده می‌باشد. شکل ۷ نمودار جریان-ولتاژ سلول بدون پوشش و پوشش‌دار را نشان می‌دهد.



شکل ۷- منحنی ولتاژ - جریان سلول خورشیدی پوشش‌دار و بدون پوشش.

ولتاژ یا فاکتور پرشوندگی (FF) با اعمال پوشش افزایش یافته است. بمنظور بررسی‌های بیشتر سایر پارامترهای بازدهی سلول خام و پوشش‌دار با استفاده از روابط ۲ و ۳ [۳۰ و ۳۱] استخراج و در جدول ۴ گردآوری شد.

با توجه به منحنی جریان - ولتاژ مشاهده می‌شود جریان مدار کوتاه سلول خورشیدی از ۰/۵۵۷۴ به ۰/۶۲۷۹ آمپر و ولتاژ مدار باز از ۰/۵۵۲۲ به ۰/۵۶۴۱ ولت افزایش یافته است. همچنین، نتایج نشان داد قوس منحنی جریان-

جدول ۴- مقایسه راندمان و فاکتور پرشوندگی سلول خورشیدی پوشش دار و بدون پوشش.

نمونه	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_m (A)	V_m (V)	P_{in} (W/m ²)	FF	η %	درصد افزایش بازدهی
پوشش دار	۰/۶۲۷۹	۰/۵۶۴۱	۰/۳۵۷۸	۰/۴۱۱۰	۲۳۵/۲۳	۰/۴۱۵۲	۶/۲۵۱۸	۳۷/۵۱
بدون پوشش	۰/۵۵۷۴	۰/۵۵۲۲	۰/۳۵۵۹	۰/۳۰۰۵	۲۳۵/۲۳	۰/۳۴۷۵	۴/۵۴۶۵	-

لایه نازک کربن شبه الماسی بدون استفاده از هرگونه لایه واسطه بر زیرلایه‌های سیلیکونی اعمال گردید و نشان داده شده شد که از چسبندگی بالایی برخوردار است.

وجود دو پیک گاوسی ناشی از آزمون رامان و نسبت شدت پیک‌های بدست آمده (I_D/I_G برابر ۱/۱۷) تشکیل لایه نازک کربن شبه الماسی را اثبات کرد.

با اعمال لایه نازک کربن شبه الماسی بر سلول خورشیدی، رافنس و زبری سطح کاهش یافته است.

لایه نازک کربن شبه الماسی اعمال شده فاقد هرگونه ترک، ناپیوستگی و تخلخل است و از ضخامتی یکنواخت برخوردار است.

با اعمال لایه نازک کربن شبه الماسی بر سلول خورشیدی سیلیکونی بازدهی به بیش از ۳۷٪ مقدار اولیه افزایش پیدا کرد.

سپاسگزاری

از سازمان سامانه‌های فضایی شرکت صا ایران به دلیل همکاری در تهیه منحنی بازدهی سلول‌های خورشیدی صمیمانه سپاسگزاری می‌کنیم.

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{in}} = \frac{FF I_{sc} V_{oc}}{P_{in}} \quad (2)$$

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (3)$$

با توجه به رابطه ۲ مشاهده می‌شود که سه پارامتر I_{sc} ، V_{oc} و FF به گونه مستقیم با بازدهی سلول‌های خورشیدی ارتباط دارند. نتایج نشان دادند اعمال لایه نازک کربن شبه الماسی باعث افزایش پارامترهای بالا نسبت به حالت خام گردیده و موجب افزایش بازدهی سلول خورشیدی مورد استفاده به بیش از ۳۷ درصد مقدار اولیه در این پژوهش شده است.

نتیجه گیری

در این پژوهش لایه نازک کربن شبه الماسی با استفاده از دو گاز هیدروژن و متان به روش رسوب شیمیایی بخار تقویت شده به کمک پلاسما با منبع تغذیه فرکانس رادیویی (RF-PECVD) بر سلول خورشیدی سیلیکونی پلی کریستال نوع P اعمال شد. نتایج نشان دادند که: لایه نازک کربن شبه الماسی ساختاری آمورف دارد و این پوشش تنها از اتم‌های کربن و هیدروژن تشکیل شده است و فاقد هرگونه ناخالصی است.

Reference

- ۱- کرمی، لایه نشانی و ارزیابی اثرات لایه نازک کربن شبه الماسی بر عملکرد سلول‌های خورشیدی سیلیکونی در شرایط شبیه سازی شده، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد (شناسایی و انتخاب مواد)، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۲.
- 2- V.I. Gavrilenko, A.M. Grekhov, D.V. Korbutyak, and V.G. Litovchenko, "Optical Properties of Semiconductors. Naukova Dumka", Kiev, 608 p, 1987.
- 3- J. Zhao and M. Green, "Optimized Antireflection Coatings for High-Efficiency Silicon solar cells", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 38, pp. 1925—1934, 1991.
- ۴- ن. معنوی زاده، ا. اصل سلیمانی، ه. ملکی و ر. افضل زاده، بررسی خواص نوری لایه های نیتريد سیلیکون لایه نشانی شده به شیوه کندوپاش RF در محیط پلاسمای آرگن، سیزدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران، ۱۳۸۵.
- 5- J. Robertson, "Diamond-like Amorphous Carbon", Materials Science and Engineering R 37, pp. 129-281. 2002.
- 6- W. Seok Choi, K. Kim, J. Yi, and B. Hong, "Diamond-like Carbon Protective Anti-Reflection Coating for Si Solar Cell", Materials Letters, Vol. 62, pp. 577–580, 2008
- ۷- ف. مجیری، لایه نشانی و ارزیابی اثرات لایه نازک DLC بر بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی سیلیکونی، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد (شناسایی و انتخاب مواد)، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۲.
- 8- D. Skoog, J. Holer, and S. Crouch, "Principles of Instrumental Analysis", 6th Edition, Brooks Cole, USA, 2006.
- 9- J. R. Ferraro, and K. Nakamoto, "Introductory Raman Spectroscopy", 2nd Edition, Elsevier Science, USA 1994.
- 10- V. S. Yadav, D. K. Sahu, M. Singh, and Kuldeep Kumar, "Study of Raman Spectra of Nano-Crystalline Diamond Like Carbon (DLC) Films Composition ($sp^2:sp^3$) with Substrate Temperature", Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2009.
- 11- J. Robertson, "Properties of Diamond-Like Carbon, Surface and Coatings Technology", Vol. 50, pp. 185–203, 1992.
- 12- X. Liua, L. Wanga, J. Pua, and Q. Xuea, "Surface Composition Variation and High-Vacuum Performance of DLC/ILs Solid-Liquid Lubricating Coatings: Influence of Space Irradiation", Applied Surface Science, Vol. 258, pp. 8289– 8297, 2012.
- 13- L. V. Santos, V. J. Trava-Airoldi, E. J. Corat, J. Nogueira, and N. Leite, "DLC Cold Welding Prevention Films on a Ti6Al4V Alloy for Space Applications", Surface & Coatings Technology, Vol. 200, pp. 2587–2593, 2006.
- 14- X. Liu, L. Wang, and Q. Xue, "High Vacuum Tribological Performance of DLC-Based Solid-Liquid Lubricating Coatings: Influence of Atomic Oxygen and Ultraviolet Irradiation", Tribology International, Vol. 60, pp. 36–44, 2013.
- 15- F. Tuinstra, and J. L. Koenig, "Raman Spectrum of Graphite". Journal of Physical Chemistry Vol. 53, pp. 1126–1130, 1970.
- 16- C. Castiglioni, E. Di Donato, M. Tommasini, F. Negri, and G. Zerbi, "Multi-Wavelength Raman Response of Disordered Graphitic Materials: Models and Simulations", Synthetic Metals, Vol. 139, pp. 885-888, 2003.
- 17- S. Piscanec, M. Lazzeri, F. Mauri, A. C. Ferrari, and J. Robertson, Physical Review Letters. Vol. 93, pp. 185, 2004.
- 18- C. Mapelli, C. Castiglioni, G. Zerbi, and K. Mullen, "Common Force Field for Graphite and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons", Physical Review B, Vol. 60, pp. 12710-12725, , 1999.
- 19- Z. Y. Chen, J. P. Zhao, T. Yano, T. Ooie, M. Yoneda, and J. Sakakibara, "Observation of sp^3 Bonding in Tetrahedral Amorphous Carbon Using Visible Raman Spectroscopy", Journal of Applied Physics, Vol. 88, pp. 2305–2308, 2000.

- 20- A. C. Ferrari, and J. Robertson "Interpretation of Raman Spectra of Disordered and Amorphous Carbon", *Physical Review B*, Vol. 61, pp. 14095–107, 2000.
- [21] J. C. Sanchez-Lopez, A. Erdemir, C. Donnet, "Chemical Vapor Deposition of Ruthenium on NiCoCrAlYTa Powders Followed by Thermal Oxidation of the Sintered Coupons", *Surface and Coatings Technology*; Vols. 163–164, pp. 444–50, 2003.
- 22- A. C. Ferrari, "Determination of Bonding in Diamond-Like Carbon by Raman Spectroscopy", *Diamond and Related Materials*, Vol. 11, pp. 1053–1061, 2002.
- 23- R. Gottimukkala, "Growth and Characterization of Diamond and Diamond Like", Master Thesis, University of South Florida, 2005.
- 24- C. R. Lin, D. H. Weia, C. K. Chang, and W. H. Liao, "Optical Properties of Diamond-Like Carbon Films for Antireflection Coating by RF Magnetron Sputtering Method", *Physics Procedia*, Vol. 18, pp. 46–50, 2011.
- 25- S. V. Hainsworth, "Diamond-Like Carbon Coatings for Tribology: Production Techniques Characterization Methods and Applications", Master Thesis, University of Leicester, 2007.
- ۲۶-ن. خدایار، ساخت لایه‌های نازک کربن شبه الماسی به روش RF-PECVD در مخلوطی از پلاسمای بوتان، پروپان و نیتروژن، پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه الزهراء، ۱۳۸۴.
- 27- K. A. Hamouda, A. Ababou, M. Ouchabane, N. Gabouze, S. Belhousse, H. Menari, and K. Beldjilali, "Study of Optical Properties of Diamond-Like Carbon/Porous Silicon Antireflective Coating Layers for Multicrystalline Silicon Solar Cell Applications", *Vacuum*, Vol. 81, pp. 1472–1475, 2007.
- 28- J. Coates, "Interpretation of Infrared Spectra, a Practical Approach", Wiley, 2000.
- 29- M. Allon, J. Appelbaum, M. Maharizi, A. Seidaman, and N. Croitoru, "The Influence of Diamond-Like Carbon Films on the Propertise of Silicon Solar Cells", *Thin Solid Films*, Vol. 303, pp. 273–276, 1997.
- 30- B. kov, P. S. adek, P. Stahel, and L. Zajckov, "Improvement of the Efficiency of the Silicon Solar Cells by Silicon Incorporated Diamond-Like Carbon Antireflective Coatings", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 299–302, pp. 1147–1151, 2002. <http://database.irandoc.ac.ir/researchers/97497>
- 31- H. Zhu, J. Wei, K. Wang, and D. Wu, "Applications of Carbon Materials in Photovoltaic Solar Cells", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 93, pp. 1461–1470, 2009.