# نقش عملیات حرارتی در استحاله فازی و تغییر ویژگیهای الکترونیکی فیلمهای

### سيليكون

## میثم زرچی، شاهرخ آهنگرانی

سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، پژوهشکاره مواد پیشرفته و انرژیهای نو، تهران، ایران (دریافت مقاله: ۹۶/۰۱/۱۴)

چکیدہ

فیلمهایی از سیلیکون آمورف به روش لایه نشانی فیزیکی فاز بخار به کمک پرتو الکترونی (EB-PVD) ایجاد شد. فرآیند لایه نشانی در شرایط خلأ بالا (۲۰۳<sup>- ۲</sup>۰۱) که منجر به تشکیل یک پوشش آمورف البته با ضخامتهای کنترل شده انجام شد. پس از نمونه سازی، نمونهها در دمای <sup>0</sup><sup>- ۲</sup>۰ و در محیط گاز خنثی تحت شرایط عملیات حرارتی قرار گرفت و ویژگیهای ساختاری و الکتریکی آن قبل و بعد از عملیات حرارتی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از میکرورامان نشان دهنده ساختار آمورف در پوششهای اولیه بود که با افزایش ضخامت پوشش و حضور نقایص بیشتر مقداری از نانوکریستالها تشکیل شد. علاوه بر آن با اعمال شرایط عملیات حرارتی تشکیل، رشد و ادغام نانوکریستالها و تشکیل یک ساختار پلی کریستال را شاهد هستیم. نانوکریستالها منجر به تشکیل پیوندهای <sup>2</sup>p2 و <sup>3</sup>p3 شده که همین خود باعث افزایش هدایت الکتریکی پوشش در این شرایط شد و این افزایش هدایت الکتریکی با افزایش ضخامت پوشش بر روی نمونههای مورد بررسی به شدت افزایش یفت. وازههای کلیدی: فیلم آمورف سیلیکون، نانوکریستال سیلیکون، زیری سطح، عملیات حرارتی، هدایت الکتریکی.

### The Role of Heat Treatment on Phase Transformation and Change the Electronic Properties of Silicon Films

#### Meysam Zarchi, Shahrokh Ahangarani

Advanced Materials & Renewable Energies Department, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, Iran

(Received 3 April 2017, accepted 5 July 2017)

#### Abstract

In this study, amorphous silicon films were deposited by physical vapor deposition using electron beam (EB-PVD). The process of deposition was carried out under high vacuum (torr 10<sup>-6</sup>) which led to the formation of an amorphous coating with controlled thicknesses. After sampling procedure, the samples were put under heat treatments at 800 °C under inert gas environment and their structural and electrical properties were analyzed before and after annealing conditions. The results obtained from microraman revealed the amorphous structure in the initial coatings which had been formed because of the increased thickness of the coating and due to the presence of more defects in nano-crystals. Moreover, we witnessed the development, growth, and integration of nano-crystals and formation of a poly crystal structure. Consequently, nano-crystals formation resulted in development of sp2 and sp<sup>3</sup> bonds, which, in turn, increased the electrical conductivity of the coatings in that condition. Finally, as the thickness of the samples coatings increased, their electrical conductivity was also greatly enhanced.

Keywords: film amorphous silicon, nanocrystalline silicon, surface roughness, annealing, electrical conductivity.

E-mail of Corresponding author: sh.ahangarani@gmail.com.

مقدمه

پوششهای آمورف سیلیکون به دلیل امکان تغییرات ویژهای که دارند و خنثی بودن از نظر فیزیکی و شیمیایی به عنوان یک ماده ویژه در ساخت تجهیزات الکترونیک و اپتيک محسوب مي شود [۱-۲]. به ويژه اينکه اعمال اين پوششها به روش (EB-PVD) هم از نظر هزینه بسیار پايين است و نيز به دليل شرايط آسان اعمال پوشش از جنبه اعمال صنعتى مطلوب است. سيليكون يك ماده نيمه هادی گروه IV بوده و به صورت یک ماده نیمه هادی بسیار مورد استفاده است و همچنین به طور گستردهای در ساخت سلولهای خورشیدی مورد استفاده قرار میگیرد [۳–۴]. سیلیکون میتواند در هر دو شکل کریستالی و آمورف وجود داشته باشد و هر دو شکل دارای خواص الکترونیکی و نوری متفاوت است. در این پوشش ها خواص الكترونيكي و نورى بسيار وابسته به اندازه نانوکریستال های سیلیکون است که می تواند در فاز آمورف ايجاد شود [۵-۶].

در این تحقیق روشی که جهت تشکیل فاز آمورف سیلیکون اولیه مورد استفاده قرار گرفت، (EB-PVD) بود. در این روش هیچ واکنش شیمیایی وجود ندارد و مواد برای لایه نشانی توسط یک جریان بالا توسط یک تفنگ الکترونی تبخیر شده و بر روی سطح قرار داده میشوند. همچنین فرآیند رسوب در خلأ بسیار بالا بهعنوان مثال کمتر از <sup>۶</sup> ۱۰ میلی بار انجام میشود که همین امر باعث درجه خلوص بالای فیلم و شرایط همگن آن در شرایط تبخیر میشود [۷].

دمای داخل محفظه حدود C<sup>o</sup> ۴۰ است که بسیار پایین بوده و این مقدار حتی نسبت به فرآیند PECVD پایین تر است و همین باعث حذف اثرات نامطلوب حرارت دیدن غیرعمدی سطح زیرلایه میشود. علاوه بر این آسیب کمتر سطح بستر در اثر برخورد اتمهای تشکیل دهنده فیلم، برخلاف روش کندوپاش که باعث آسیب دیدن زیاد

زیرلایه به دلیل وجود ذرات پرانرژی در آن میشود، نیز از نقاط قوت این روش است.

همان طور که در بالا ذکر شد، ویژگیهای الکتریکی و اپتیکی پلی سیلیکون ها به شدت به ساختار پلی سیلیکون وابسته است. مرز دانه و نقص بین دانه ای موانع بالقوه الکتریکی محسوب می شوند که از انتقال حامل های الکتریکی درون فیلم های پلی سیلیکون جلوگیری می کنند. کاهش عیوب بین دانه ای باقی مانده باعث ایجاد مناطقی بدون عیب در اندازه هایی کمتر از ۳۰ نانومتر می شود که همین عیوب اندک نیز به عنوان یک عامل محدودیت در عملکرد دستگاه های موردنظر محسوب می شود؛ بنابراینکاهش مقدار نقص های بین دانه ای به منظور به بود عملکرد الکتریکی و اپتیکی این دستگاه ها بسیار مهم است [۸-۱۰].

فیلم پلی سیلیکون با اندازه دانههای بزرگتر و نقص بین دانه کمتر بسیار مطلوب هستند. بهتازگیتکنیکهایی برای دستیابی بهاندازه دانه بهینه برای تولید SPC انجام شده است [۲۰–۱۲]. در شرایط عملیات حرارتی تبلور فاز جامد (SPC) صورت گرفته و سیلیکون آمورف به سیلیکون پلی کریستال زیر دمای ذوب سیلیکون تبدیل میشود. فرآیند SPC در فاز سیلیکون آمورف به دلیل کمتر بودن میزان انرژی آزاد S-i نسبت به سیلیکون آمورف در این شرایط است. تا به امروز، دو روش عملیات حرارتی در دمای بالا و اعمال یونها به منظور کاهش مقدار نقصهای بین دانه پیشنهاد شده است. این فیلمهای پلی سیلیکون دوقلوییهای میکرونی است که در دمای بالاتر از C<sup>o</sup> ۷۵۰ پایدار نیستند، بنحویکه میتوان با افزایش بیشتر دما تا این محدوده حذف کرد[۲۳–۱۴].

بااین حال، فرآیند افزایش دما را نمی توان برای بعضی از این تجهیزات که دارای زیر لایه شیشهای دارند مانند (AMLCD TFTs) استفاده کرد، چراکه این زیر لایهها

www.SID.ir

دارای کرنش آنیلی در کمتر از C°۶۵۰ بوده که با افزایش دما بیش از این محدوده تغییرات فیزیکی در آنها ایجاد میشود [۱۵]. در مقایسه با عملیات حرارتی، بمباران یونی دارای هزینه بالا و یکنواختی فیلم کمتر است. به همین دلیل سعی شد در کار حاضر هم از عملیات حرارتی با اتمسفر کنترلشده برای حذف نقایص و تشکیل نانوکریستالها استفاده شود و هم جهت تشکیل فیلمها زیرلایه ویفر سیلیکونی جهت حذف مشکلات ترمودینامیکی پوشش بعد از عملیات حرارتی مورد

مشخصهیابی در این کار از طریق مکانیسمهای مختلفی شامل میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان (Field Emission-SEM)، میکروسکوپ نیروی اتمی، میکرو رامان و پیکوآمپرمتر انجام شد و اثر عملیات حرارتی بر پارامترهای ساختاری، فیزیکی، شیمیایی و الکتریکی فیلمها مورد بررسی قرار گرفت.

#### مواد و روش،ها

برای نمونه سازی در این تحقیق از ویفر سیلیکونی ۸ اینچی نوع n تک کریستال Czochralski استفاده شد. قبل از لایه نشانی و پس از نمونه سازی در اندازه های مشخص نمونه ها به کمک روش مرطوب-شیمیایی در دو مرحله تمیزکاری شد ابتدا مخلوطی از محلول : NH4OH مرحله تمیزکاری شد ابتدا مخلوطی از محلول : NH4OH حذف آلاینده های آلی و حذف ذرات اکسید فلزی مناسب است و سپس از محلول NH2O 2 H2O 2 H2O ولی با نسبت های حجمی ۶: ۱: ۱ تا ۸: ۲: ۱ استفاده شد که این نسبت های حجمی ۶: ۱: ۱ تا ۸: ۲: ۱ استفاده شد که این فلزی از سطح ویفر می گردد. از آنجا که قرار گرفتن سطح ویفر در معرض هوا باعث ایجاد یک لایه اکسیدی به فلزی از مرحله تمیزکاری نمونه استفاده از حلال -HF است. این مرحله باعث حذف پیوندهای CHD است. این مرحله باعث حذف پیوندهای

سیلیکون-هیدروژن سطحی شده و از رشد اکسید ذاتی جلوگیری میکند [۱۷]. برای لایه نشانی فیلمها بعد از آمادهسازی ویفر سیلیکون در محفظه خلأ فوقالعاده بالا (UHV) رسوب فيزيكي بخار (PVD) بهوسيله سيستم پرتو الکترونی (EDS 160) قرار داده شد. در این سیستم از دو تبخیرکننده KW استفادهشده که از منبع لانتانیومی عمل تبخیر سیلیکون را انجام میدهند. پس از جدا نمودن نمونههای شاهد بعضی از نمونهها برای اعمال شرایط عملیات حرارتی در کوره تیوبی معمولی از جنس کوارتز قرار گرفت. نمونهها در لولهای قرار گرفتند که می توان آن را تا حداکثر C۴۰۰°C حرارت داد. نمونهها با استفاده از یک میله از جنس کوارتز بهآرامی درون کورهای که از قبل گرم شده است قرار داده می شود. عملیات حرارتی در دمای °C ۸۰۰ و زمان یک ساعت انجام گرفت و نمونهها برای پایدارسازی در دمای <sup>o</sup>C ۲۰۰ به مدت ۳۰ دقیقه در محیط آرگون نگهداری میشوند. سپس نمونهها برای مشخصهیابی مورفولوژی سطح به کمک میکروسکوپ نیروی اتمی AFM ساخت شرکت VEECO کشور آمریکا مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای بررسی ساختار پوشش از میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM) و به این جهت دارای عمق میدان و حد تفکیک بسيار بالاترى نسبت به ميكروسكوپ الكترونى روبشى معمولی است و تصاویری با بزرگنمایی ۷۰۰ هزار برابر را مي توان با آن تهيه كرد. اين دستگاه ساخت شركت TESCAN کشور جمهوری چک است. سعی شد که ضخامت پوشش های ایجادشده به کمک این میکروسکوپ نیز بررسی شود و ضخامت اعلامشده توسط سیستم لایهنشانی نیز تایید شد. به جهت بررسی ساختاری از طیفسنجی میکرو رامان استفاده شد که برای انتقال فاز از سیلیکون آمورف به فاز سیلیکون کریستالی طيف رامان در دامنه عدد موجی بين (<sup>-۳</sup>۵۰ -۳۵۰ تغییر میکند. بهویژه، بهخوبی مشخصشده است که Si شامل سه حالت از نظر تغییر پراکندگی رامان است که





معمولاً توسط یک فرآیند دکانولوشن با سه قله گاوسی مشخص شده است: فاز آمورف (~۴۸۰cm)، فاز میانی ( $\sim^{-1} \sim$ ) نشأت گرفته از قسمت معبوب از فاز کریستالی مرتبط با مرز دانه و فاز بلوری (~<sup>1</sup>~۵۲۰ ش ناشی از حالت نوری عرضی (TO) از ارتعاشات Si - Si در حالت کریستالی است. برای محاسبه پارامترهایی نظیر تنش پسماند، اندازه دانه کریستالی و جزو کریستالی به ترتیب از روابط زیر استفاده شد که مقادیر لازم بر اساس دادههای میکر ورامان قابل جای گذاری است:  $X_{C} = \frac{I_{520}}{I_{520} + 1.255 \times I_{480}} \quad \sigma = -0.25(I_{\text{max}} - I_{520})$  $D_{RAMAN} = \sqrt{\left(\frac{\mu}{\Delta \gamma}\right)}$ برای محاسبه تغییرات پارامترهای الکتریکی از اندازهگیری جريان ولتاژ (I-V) به كمك پيكوآميرمتر نوع CP13 شرکت کونکل انگلیس که برای کار نیاز به یک ژنراتور و برق DC دارد و در محدوده <sup>۱۴</sup> ۲۰×۱۱ تا FSD'IT×۱۰ در ۲۳ محدوده مختلف کار می کند.

بحث

شکل ۱ و ۲ نشاندهنده تغییر میزان تبلور با ضخامتهای مختلف قبل از عملیات حرارتی و بعدازآن است که بیانگر طیف حاصل از دادههای میکرو رامان است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Full-Scale Deflection

همان طور که در شکل ۱ دیده می شود برای ضخامت ۱۰۰ نانومتر پوشش در منطقه <sup>1</sup> ۲۰ ۳۳ ۲۸ که معرف قله آمورف است در محدوده بالاتری نسبت به ضخامت ۳۰۰ نانومتر قرار دارد که نشان از آمورف بودن مقدار بیشتری از پوشش تشکیل شده در این حالت را دارد. درصورتی که با افزایش ضخامت پوشش و تشکیل عیوب بیشتر در آن، شرایط لازم برای شروع درصد جزیی از نانو کریستال های آنها به همراه شرایط عملیات حرارتی باعث رشد سریع و بیشتر دانههای کریستالی در زمینه می شود که در بخش های بعدی بیشتر به آن پرداخته می شود.

از سوی دیگر با افزایش بیشتر ضخامت تا بیش از ۵۰۰ نانومتر از یکسو افزایش شدت پارامتر قله را شاهد هستیم و بهطور همزمان حرکت موقعیت قله به سمت مقادیر بیشتر که این حرکت نشان از تشکیل کریستالهای بیشتری در زمینه آمورف شده که موقعیت قله را به حدود <sup>۱۰</sup> cm

نمودارهای شکل ۲ از سه جنبه می توانند موردبررسی و تحلیل قرار بگیرند: اول اینکه با افزایش ضخامت از ۱۰۰ به ۲۰۰ و از ۳۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر جمع شدن و باریک شدن قله بهدست آمده در منطقه، معرف انتقال حالت به سمت کریستالی است که معرف تشکیل کریستالها و تغییر حالت آمورف به کریستالی است. دوم همان طور که از تصاویر برمی آید با افزایش ضخامت در شرایط یکسان عملیات حرارتی پارامتر شدت قله افزایش یافته است که نشان از افزایش اندازه کریستالهای تشکیل شده دارد و سوم تغییر موقعیت قله به سمت مقادیر بیشتر معرف افزایش جزو کریستالی است به گونهای که برای ضخامت ۱۰۰ نانومتر موقعیت قله ۹۰۹ برای ضخامت ۲۰۰ نانومتر ۵۱۲ و برای

موقعیت قلهها خود می تواند معرف انتقال فازی از آمورف به کریستالی باشد به گونهای که برای ضخامت ۱۰۰ نانومتر در شرایط عملیات حرارتی در دمای C° ۸۰۰ موقعیت قله

در منطقه تشکیل فاز معیوب است، حال آنکه با افزایش ضخامت به همراه عملیات حرارتی با شرایط یکسان قله به سمت قله ایدئال شرایط کریستالی کامل سیلیکون که معادل <sup>1-</sup>۵۲۰ نزدیک شده است. علاوه بر این بهطورکلی تمامی منحنی با افزایش ضخامت به سمت مقادیر بیشتر پیش رفته است که این خود نشان از تغییر ساختار و تشکیل ساختار کریستالی بیشتر در زمینه آمورف اولیه را دارد.

اکنون با بررسی این دو شکل می توان تاثیر حضور عملیات حرارتی را در تشکیل نانو کریستالهای سیلیکون اینگونه بیان کرد که در شرایط اولیه پوشش زمانی که ضخامت پوشش تا ۳۰۰ نانومتر است این مقدار بسیار ناچیز است، ولی در ضخامت ۵۰۰ نانومتر اندازه کریستالها به ۲/۰۵ نانومتر می رسد که این اندازه از تشکیل کریستال در این ضخامت به سبب نقصهای ساختاری در هنگام عملیات بلوری شدن و تنش باقیمانده را برای ضخامتهای بررسی شده براساس جدول ۱ تعیین کرد.

**جدول ۱**. تغییر ویژگیهای پوشش نسبت به تغییر ضخامت.

ضخامت	$X_{c}(\%)$	D <sub>Raman</sub>	σ[GPa]
(nm)			
۱	۳۵	۲/۷۸۳	7/44
۳	۴۸	37/97V	١/٩٨
۵	۵۸	8/083	١/٨٩

همان طور که نتایج جدول یک نشان می دهد با افزایش ضخامت پارامتر جزو کریستالی و مقدار تنش کششی باقیمانده ایجاد شده به صورت معکوس نسبت به هم تغییر کرده است. همچنین با افزایش ضخامت تحت شرایط عملیات حرارتی یکسان اندازه دانههای کریستالی افزایشیافته است. برای نمونههای پوشش با ضخامت تقریبی ۱۰۰ نانومتر مشخص است که بیشتر ساختار فیلم

www.SID.ir

نازک سیلیکون آمورف بوده و میزان تبلور ۳۵٪ است. با افزایش ضخامت فاز کریستالی موجود در زمینه آمورف افزایش مییابد که این به دلیل ناهمگنی سطح حاصل از ضخامتهای مختلف است. به گونهای که میزان تبلور برای فیلمهای با ضخامت ۳۰۰ نانومتر ۴۸٪ و برای فیلمهای با ضخامت ۵۰۰ نانومتر ۵۸٪ است.

همانطور که در تصویر ۳ دیده می شود، نتایج توپوگرافی دادههای میکرو رامان را تایید میکند که با افزایش ضخامت پوشش از یک سو همگنی و یکنواختی سطح از بین می رود و از سوی دیگر امکان تشکیل کریستال های سطحی به سبب افزایش معایب مورفولوژیکی افزایش می یابد. بنحوی که بر اساس نتایج AFM میانگین زبری سطح به تدریج با افزایش ضخامت بیشتر شده است که نشان از عدم یکنواختی و ایجاد بی نظمی در سطح دارد.



**شکل ۲.** توپو کرافی سطح سهبعدی از موربههای با صحامت محنف همراه با شرایط عملیات حرارتی. (الف) ۱۰۰ نانومتر، (ب) ۳۰۰ نانومتر و (ج) ۵۰۰ نانومتر.

µm/div

همانطور که در شکل ۴ دیده می شود (تمام تصاویر از یک منطقه با مساحت یکسان اخذ شده است) حداکثر ارتفاع محاسبه شده برای ضخامتهای با پوشش ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ نانومتر به ترتیب معادل ۹/۴۵، ۱۷/۲ و ۴۰/۸ نانومتر است. توپوگرافی سطح برای فیلمهای آمورف با ضخامتهای مختلف پستی و بلندیهایی را نشان می دهد.



**شکل ۳.** تصاویر AFM به همراه پروفیل زبری، ضخامت ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ نانومتر بدون عملیات حرارتی.

مقادیر محاسبه شده برای مقادیر زبری سطح بهدست آمده نسبت به مقادیر گزارششده برای پوشش آمورفی اولیه با شرایط یکسان کاملاً متفاوت است. این مشاهده را می توان با ماهیت ناهمگن از سطح در اثر ایجاد منطقهای از فیلم با یک مخلوط فازی نسبت داد. افزایش ارتفاع در مواضع سطحى را مىتوان به توزيع ناهمگن مخلوط فازها نسبت به توزيع تصادفي و يكنواخت براي فيلمهاي أمورف نسبت داد که خود را بهصورت افزایش زبری نشان مىدهد. اين تغيير باعث ايجاد عدم يكنواختي سطح فيلم آمورف اولیه به دلیل تشکیل و رشد دانهها درون بافت آمورف اولیه و تشکیل یک مخلوط فازی بهصورت آمورف–کریستالی است که در بعضی از مواقع ادغام این دانههای کریستالی را شاهد هستیم. افزایش مقادیر ناهمگنی سطح با افزایش ضخامت را می توان نشان از افزایش مکانها و موقعیتهای نقص در این فیلمها دانست چراکه با افزایش ضخامت این مکانها افزایش می یابد و درنتیجه مکانهای مناسب برای افزایش دانسیته دانهها بیشتر مىشود.

بر همین اساس می توان تصاویر مورفولوژی سطحی SEM را بررسی نمود. شکل ۵ یک انطباق کامل از شکل دانهها، قطر معمول و همچنین جزییات میکرو ساختاری را نشان می دهد. با توجه به موقعیتهای مختلف در نمونه توزیع دانههای بر روی سطح کمی متفاوت است. هر دو تصویر (AFM و MAS) از نمونههایی با پوشش یکسان اخذشده است. همان طور که در شکل نیز مشاهده می شود سطوح به طورکلی صاف است. تصویر SEM نیز سطح تقریباً صافی را نشان می دهد که به دلیل اعمال لایه نشانی به روش CVD دور از انتظار نیست. در این حالت دمای لایه نشانی تقریباً C<sup>0</sup> ۴۰ است و نرخ لایه نشانی برای تمام لایه یک نانومتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل ۵. مورفولوژی سطح نمونههای اولیه (A) ضخامت ۱۰۰، (B) ضخامت ۳۰۰ و (C) ضخامت ۵۰۰ نانومتر.

همانطور که در شکل ۶ دیده می شود اعمال شرایط عملیات حرارتی باعث تغییر در شرایط مورفولوژی سطح پوشش می شود علاوه بر آن چگونگی آرایش کریستال های تشکیل شده بسته به ضخامت پوشش در شرایط عملیات حرارتی یکسان نیز متفاوت است به گونهای که با افزایش

www.SID.ir

ضخامت پوشش چگالی دانههای کریستالی و اندازه آنها متناسب با ضخامت بیشتر شده است. در کمترین ضخامت (۱۰۰ نانومتر) پوشش دانههای کریستالی با مقطع تقریباً دایرهای شکل بوده و بهصورت مجزا دیده می شود. در ضخامت متوسط (۳۰۰ نانومتر) بسیاری از دانهها با یکدیگر برخورد کردند و تشکیل یک شبکه نامنظم متصل شده از دانهها را دادهاند. در بالاترین ضخامت سطح نمونه شده از دانهها را دادهاند. در بالاترین ضخامت سطح نمونه شده از دانهها را دادهاند. در بالاترین ضخامت سطح نمونه شده از دانهها را دادهاند. در بالاترین ضخامت سطح نمونه شده از دانهها را دادهانده شده است. درحالی که مرز دانهها در حالت مجزا دایره شده است. درحالی که مرز دانه آنها تقریباً مستقیم شدهاند (خطوط زردرنگ در شکل ۷). شعاع این دانهها تا حدی متناسب باضخامت فیلم متغیر است. درنهایت، مرز دانه مستقیم تقریباً عمود بر خطوط اتصالدهنده هسته دانه



شکل ۷. مورفولوژی سطح نمونههای پس از عملیات حرارتی در دمای <sup>0</sup>C ۸۰۰و زمان یک ساعت (A) ضخامت ۱۰۰، (B) ضخامت ۳۰۰ و (C) ضخامت ۵۰۰ نانومتر.

چگونگی تأثیر عملیات حرارتی در تشکیل نانو کریستالهای سیلیکون به تفسیر در بخش قبل توسط بررسی میکرو رامان بیان شد. در این قسمت هدف تایید ویژگیها و اثر این عملیات بر پارامترهای الکتریکی است. همان طور که در بخش قبل نیز مشاهده شد، علاوه بر قلههای شاخص محدوده <sup>1-</sup> ۲۰۰ و ۵۲۰ قلههای دیگری هر چند کوچک در محدوده <sup>1-</sup> ۱۱۵۰ را ۱۳۴۲ و دیگری هر چند کوچک در محدوده <sup>1-</sup> ۱۱۵۰ ما۲۰ و برا به دیگری های الکتریکی پوشش ها باشد؛ که در جدول ۲ این مقادیر آمده است.

جدول ۲. تغییر شدت پیوندی با تغییر شرایط عملیات حرارتی.

ضخامت	$(\mathrm{cm}^{-1})\mathrm{SP}^2$		$(\mathrm{cm}^{-1})\mathrm{SP}^3$			
( <b>nm</b> )	1011	1091	1107	1442		
۱۰۰ بدون	-9/191	۶٩/۱۸	-1•/380	-0/•1٣		
عمليات						
حرارتي						
۱۰۰	109	۶۳	10/0	47/0		
عمليات						
حرارتي						
۳۰۰ بدون	-14/•1	-%/١۴	t/ta	-00/11		
عمليات						
حرارتي						
۳۰۰	180/0	۴	170	۴		
عمليات						
حرارتي						
۵۰۰ بدون	17/0	-10V/D	-۲۳/۵	-٣٩/۵		
عمليات						
حرارتي						
۵۰۰	417	۲۰۵	۵۱۱/۵	574		
عمليات						
حرارتي						
•1• 1	1.	a <b>n</b> <sup>3</sup>	$m^2$ $1$ $m^2$	5 1 .1		

افزایش پیوندهای sp<sup>2</sup> و sp<sup>3</sup> در فیلم حاوی نانو کریستالهای سیلیکون بدان معناست که الکترونهای آزاد بیشتری و درنتیجه هدایت الکتریکی فیلم بالاتری در این



نتيجه گيري

نتایج حاصل از مطالعه انجام شده را میتوان به صورت زیر دستهبندی کرد:

۱- تشکیل فیلم نازک از سیلیکون آمورف با حداقل نقص
 ممکن به کمک روش (EB-PVD) در محیط کنترلشده
 انجام شد.

 ۲- با افزایش ضخامت حتی بدون عملیات حرارتی به دلیل افزایش نقص در هنگام لایه نشانی امکان حضور نانوکریستالهای سیلیکون به مقدار جزیی وجود دارد.
 ۳- با افزایش ضخامت پوشش در حضور عملیات حرارتی به طور همزمان هم جمع شدن قله حاصل از تشکیل کریستالها، هم افزایش شدت آن و هم تغییر موقعیت آن به سمت مقادیر بیشتر را داریم، که همه نشان از تشکیل نانوکریستالهای سیلیکون دارد.

۴- با افزایش ضخامت پارامتر جزو کریستالی و مقدار تنش کششی باقیمانده ایجاد شده به صورت معکوس نسبت به هم تغییر کرده است. همچنین با افزایش ضخامت تحت شرایط عملیات حرارتی یکسان اندازه دانههای کریستالی افزایش یافته است.

۵– افزایش ضخامت پوشش از یک سو به صورت افزایش ارتفاع در مواضع سطحی منجر به افزایش زبری میشود که به دلیل تشکیل و رشد دانهها درون بافت آمورف اولیه لایه ها شاهد هستیم. دو نکته در تحلیل این مقادیر بسیار مهم است: اول آنکه با اعمال عملیات حرارتی در هر سه ضخامت موردبررسی باعث افزایش شدت موقعیت رامان می گردد که معرف افزایش هدایت الکتریکی است. از سوی دیگر افزایش بسیار زیاد این پارامتر را در ضخامتهای بالا (۵۰۰ نانومتر) در شرایط عملیات حرارتی را شاهد هستیم که حتی در ضخامتهای ۳۰۰ نانومتر شاهد آن نیستیم.

نمونههای تحت عملیات حرارتی بهبود قابل توجهی در ویژگیهای I-V پس از این شرایط نشان داده است. نتایج بهدست آمده در شکل ۷ نشان داده شده و تغییر متناسب در ویژگیهای الکتریکی در جدول آمده است. جدول ۳ و ۴ نشان میدهد افزایش قابل توجهی را در هدایت جریان الکتریکی با افزایش ضخامت تحت شرایط یکسان عملیات حرارتی داریم. درواقع عملیات حرارتی می تواند یک ساختار بدون تنش از طریق حذف برخی از پیوندهای ضعیف ایجاد کند

که بهعنوان یک بهبود در هدایت الکتریکی پوشش نیز هست.

دما ( <sup>0</sup> C)	٨٠٠							
ضخامت (nm)	۱			۳۰۰				
ولتاژ (V)	۵	۱.	۲۰	۳۰	۵	۱.	۲.	۳۰
جريان (µA)	١	۷	١٢	٣.	٩	۲۳	٩٥	18.

جدول ۳. خصوصیات I-V پس از زمان عملیات حرارتی مختلف.

جدول ۴. خصوصیات I-V پس از زمان عملیات حرارتی مختلف

برای ضخامت ۵۰۰ نانومتر.

دما ( <sup>0</sup> C)	۸۰۰			
ضخامت (nm)	۵۰۰			
ولتاژ (V)	۵	۱.	۲.	۳.
جريان (µA)	۲.	12.	4	۱۰۳

5. Li M, Li J C, Jiang Q, Size-Dependent Band-Gap and Dielectric Constant of Si Nanocrystals, International Journal of Modern Physics, (2010) 2297-2301.

6. Cheng Q, Zeng Y, Huang J, Effect of substrate temperature on conductivity and microstructures of boron-doped silicon nanocrystalsin SiCx thin films, Physica, 53(2013) 36–40.

7. Xu X, Li Sh, Silicon nanowires prepared by electron beam evaporation in ultrahigh vacuum, Nanoscale Research Letters, 7(1)(2012)P243.

8. Qinglong L, Investigation on solid-phase

crystallization techniques for low temperature polysilicon thin-film transistors, Thesis. Rochester Institute of Technology, (2013).

9. Cristina R, Gavrila R, Obreja A. C, *Microfabrication and analysis of polysilicon thin layers for MEMS vibrating structures*, Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 82(2015) 611–620.

10. Wu K H, and Li Ch W, Light Absorption Enhancement of Silicon-Based Photovoltaic Devices with Multiple Bandgap Structures of Porous Silicon, Journal of Materials, 8(2015)5922-5932.

11. Chena Ch, Lina P. Y, Li T. T, *Kinetic* Study of the Thermal Crystallization Behavior of Hydrogenated Amorphous Silicon Prepared by ECRCVD, Journal of Solid State Science and Technology, 6(2013).

12. Kitahara K, Ishii T, Suzuki J, Characterization of Defects and Stress in Polycrystalline Silicon Thin Films on Glass Substrates by Raman Microscopy, International Journal of Spectroscopy, (2011).

13. Sinclair R, in situ high-resolution transmission electron microscopy of material reactions, Cited by Get access, 38(2013) 1065-1071.

14. Marcins G, Butikova J, Tale I, Crystallization Processes of Amorphous Si by Thermal Annealing and Pulsed Laser و در بعضی از مواقع ادغام این دانه های کریستالی تشکیل یک مخلوط فازی به صورت آمورف – کریستالی شده است. ۶- افزایش مقادیر ناهمگنی سطح با افزایش ضخامت نشان از افزایش مکانها و موقعیت های نقص در این فیلم ها دانست چراکه با افزایش ضخامت این مکان ها افزایش می یابد و درنتیجه مکان های مناسب برای افزایش دانسیته دانه ها بیشتر می شود.

۷- آرایش کریستالهای تشکیل شده از دانههای کریستالی با مقطع تقریباً دایرهای شکل مجزا در ضخامت ۱۰۰ نانومتر بسیاری از دانهها با نانومتر که در ضخامت ۳۰۰ نانومتر بسیاری از دانهها با یکدیگر برخورد کردند و تشکیل یک شبکه نامنظم متصل شده از دانهها را دادهاند و در ضخامت ۵۰۰ نانومتر خوشههایی میکروکریستالی سطح نمونه را پوشانده است که مرز دانهها تقریباً مستقیم شدهاند و تقریباً عمود بر خطوط اتصالدهنده هسته دانه هستند.
۸- افزایش پیوندهای <sup>2</sup>g و <sup>3</sup>g در اثر اعمال شرایط محلیات حرارتی باعث افزایش هدایت الکتریکی شده است که با افزایش ضخامت به شدت افزایش پیدا کرده است.

مراجع

1. Dmitriev P. A, Makarov S. V, Milichko V. A, Laser fabrication of crystalline silicon nanoresonators from an amorphous film for low-loss all-dielectric nanophotonics, The Royal Chemistry of Society, (2015).

2. Melskens J, Schnegg A, Baldansuren A, Lips K, Plokker M. P, *Structural and electrical properties of metastable defects in hydrogenated amorphous silicon*, Phys. Rev.(2015), 245207.

3. Mercaldo L. V, Usatii I, *Advances in Thin-Film Si Solar Cells by Means of SiOx Alloys*, Energies, (2016).

4. Luysberg. M, Scholten. C, Houben. L, Carius. R, *Structural Properties of Microcrystalline Si Solar Cells*, MRS Online Proceedings Library (OPL), (2011). *Processing*, Materials Science and Engineering, 23(2011).

15. Chou Ch H, Lee I Ch, Yang P.Y, June *Effects of crystallization mechanism on the electrical characteristics of green continuous-wave-laser-crystallized polycrystalline silicon thin film transistors*, Applied Physics Letters, 103(2011).

16. Lei K. F, Materials and Fabrication Techniques for Nano and Microfluidic Devices, in Microfluidics in Detection Science: Lab-on-a-chip Technologies, (2014) 1-28.

17. Etsu Shin, *silicon wafer cleaning*, *MicroSi* at (480) 893-8898.