

## سنتز سرامیک وانادات ایتريم آلایده شده با یوروپیم به روش سنتز احتراقی به عنوان ماده تبدیل کننده کاهشی برای کاربردهای سلول خورشیدی

امیر حسین نصوحی<sup>۱</sup>، سید مهدی رفیعی<sup>۱</sup>، مرضیه ابراهیمی<sup>۲\*</sup> و احمد کرمانپور<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان، کد پستی ۸۷۷۱۷-۶۷۴۹۸

۲- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، کد پستی ۸۴۱۵۶-۸۳۱۱۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲)

**چکیده:** استفاده از مواد تبدیل کننده کاهشی به عنوان مواد کاهنده طول موج فوتون های ورودی به سیستم های فتولتائیک به عنوان یک راهکار برای بهبود عملکرد این سیستم ها معرفی شده است. بر همین اساس، هدف از پژوهش حاضر، سنتز ماده تبدیل کننده کاهشی وانادات ایتريم آلایده شده با یوروپیم ( $YVO_4:Eu^{3+}$ ) و بررسی خواص فوتولومینسانس آن پس از لایه نشانی روی سلول های خورشیدی سیلیکونی بود. بدین منظور، از روش سنتز احتراقی برای تولید پودر وانادات ایتريم آلایده شده با یوروپیم استفاده شد. پودر حاصل دارای اندازه ذراتی در حدود ۸۰ نانومتر بود. طیف سنجی فوتولومینسانس، طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز و آزمون جذب در ناحیه فرابنفش - مرئی به منظور بررسی خواص پودر سنتز شده، قابلیت لایه نشانی آن روی سلول های خورشیدی و تأثیر آن بر عملکرد سلول انجام شد. نتایج نشان داد وانادات ایتريم آلایده شده با یوروپیم سنتز شده به روش احتراقی از طریق جذب نور فرابنفش و تبدیل آن به نور مرئی می تواند به عنوان یک ماده تبدیل کننده کاهشی مؤثر عمل کند. از این رو، پیشنهاد می گردد که لایه نشانی ماده وانادات ایتريم آلایده شده با یوروپیم روی سلول خورشیدی سیلیکونی، می تواند یک روش امیدبخش و مؤثر برای بهبود عملکرد سلول خورشیدی سیلیکونی از نظر بازده تبدیل توان و پایداری بلندمدت باشد.

واژه های کلیدی: وانادات ایتريم آلایده شده با یوروپیم، ماده تبدیل کننده کاهشی، سنتز احتراقی، خواص فوتولومینسانس.

### Synthesis of $YVO_4$ Ceramic Doped with Europium using Combustion Synthesis Method as a Down-Shifting Material for Solar Cell Applications

A. H. Nosohi<sup>1</sup>, S. M. Rafiaei<sup>1</sup>, M. Ebrahimi<sup>2</sup> and A. Kermanpur<sup>2</sup>

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Marziebrahimi360@gmail.com

<sup>1</sup> Materials Engineering Group, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, Golpayegan, 87717-67498, Iran

<sup>2</sup> Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111

### ABSTRACT

Recently, luminescent down-shifting materials, as promising materials, have attracted much interest to improve the performance of photovoltaic systems. Accordingly, the aim of this study was to synthesize the  $YVO_4:Eu^{3+}$  powder by combustion method and characterize their photo luminescent properties as a layer deposited on silicon solar cell. The results of the study revealed that the  $YVO_4:Eu^{3+}$  powder with an average particle size of about 80 nm was successfully synthesized. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), ultraviolet-visible spectroscopy, and photoluminescence spectroscopy (PL) were used to investigate the properties of the synthesized powder, their deposition ability on the silicon solar cell, and their effects on the cell performance. The results indicated that the synthesized powder as a luminescent down-shifting material can absorb the ultraviolet light and convert it to visible light. The findings revealed that the deposition of  $YVO_4:Eu^{3+}$  on the silicon solar cells can be considered as a promising and effective method to improve the performance of silicon solar cells in terms of power conversion efficiency and long term stability.

**Keywords:**  $YVO_4:Eu^{3+}$ , luminescent down-shifting materials, combustion synthesis, photoluminescence properties.

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، سنتز مواد تبدیل‌کننده کاهشی<sup>۱</sup> که قابلیت جذب انرژی فوتون با طول موج کم و باز نشر فوتون دیگر با انرژی پایین‌تر و طول موج بیشتر را دارند، به موضوعی جذاب برای محققین بدل گشته است. نتایج مطلوب، استفاده هدفمند از این مواد در صنایع مختلف از جمله صنایع مرتبط با سلول‌های خورشیدی، بلورهای لیزری و ردیاب‌های بیولوژیکی را به دنبال داشته است. در همین زمینه، گزارش شده است که لایه‌نشانی مواد تبدیل‌کننده کاهشی روی سلول‌های خورشیدی نه تنها امکان افزایش جذب پرتو در محدوده نور فرابنفش<sup>۲</sup> و تبدیل آن به نور مرئی را فراهم کرده، بلکه میزان بازتاب نور از سطح سلول را نیز کاهش داده که در نهایت سبب بهبود عملکرد سلول خورشیدی شده است (۱-۳).

ایتیریم وانادات به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد از جمله خصوصیات الکتریکی و نوری عالی، بازده لومینسانس بالا و پایداری حرارتی مطلوب گزینه مناسبی برای استفاده به عنوان ماده تبدیل‌کننده کاهشی در سلول‌های خورشیدی است (۴-۵). در همین راستا، اثبات شده است که استفاده از مواد افزودنی نظیر یون بیسموت ( $Bi^{3+}$ ) و یون یوروپیم ( $Eu^{3+}$ ) می‌تواند سبب کاهش گاف انرژی وانادات ایتیریم و در نتیجه، افزایش میزان نشر نور در محدوده مرئی برای این ماده شود. در گروه

افزودنی‌ها، یوروپیم (Eu) به عنوان یک عنصر نادر خاکی، نقش یک فعال‌کننده قوی نشر نور قرمز را برای زمینه‌های اکسیدی ایفا می‌کند که می‌تواند اثرات مفید و چشم‌گیری را در جهت بهبود عملکرد مواد تبدیل‌کننده کاهشی به دنبال داشته باشد (۶). از آنجایی که وانادات ایتیریم نیز به عنوان یک میزبان عالی برای عناصر نادر خاکی شناخته می‌شود، وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم به عنوان گزینه‌ای کارآمد برای بهبود عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک<sup>۳</sup> مطرح شده است (۷). در این زمینه، چاندرا و همکارانش گزارش کردند که لایه‌نشانی وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم به روش پاشش روی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی سبب بهبود عملکرد سلول خورشیدی در محدوده طول موج ۴۵۰-۳۰۰ نانومتر شده است (۸). آن‌ها دلیل این بهبود عملکرد را انتقال فوتون‌های پر انرژی فرابنفش به ناحیه مرئی ناشی از حضور نانوذرات فسفر وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم ذکر کردند.

اتربخشی مواد تبدیل‌کننده کاهشی به پارامترهای متعددی بستگی دارد. روش تولید یکی از پارامترهای مهم در تعیین میزان اتربخشی این گروه از مواد به شمار می‌آید. در کل، برای حصول بهترین دستاورد از مواد تبدیل‌کننده کاهشی، لازم است این مواد دارای ذرات ریز، خلوص بالا و توزیع همگن باشند (۹). بر همین اساس، در سال‌های اخیر، سنتز ماده وانادات

آن در محدوده مرئی داشت. با توجه به نتایج مطالعه حاضر می-توان پیشنهاد کرد که لایه‌نشانی نانوپودر وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم سنتز شده به روش احتراقی گزینه‌ای مؤثر برای بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی سیلیکونی است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- مواد

در این پژوهش، ایتیریم نیترات (۹۹/۸ درصد)، یوروپیم نیترات (۹۹/۹ درصد)، سدیم سیترات (۹۹ درصد)، متاوانادات آمونیوم (۹۹ درصد) و اوره (۹۹/۵ درصد) به‌عنوان مواد اولیه استفاده شدند. تمامی مواد از کمپانی سیگا آلدریچ تهیه شد.

### ۲-۲- سنتز وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم به روش سنتز احتراقی

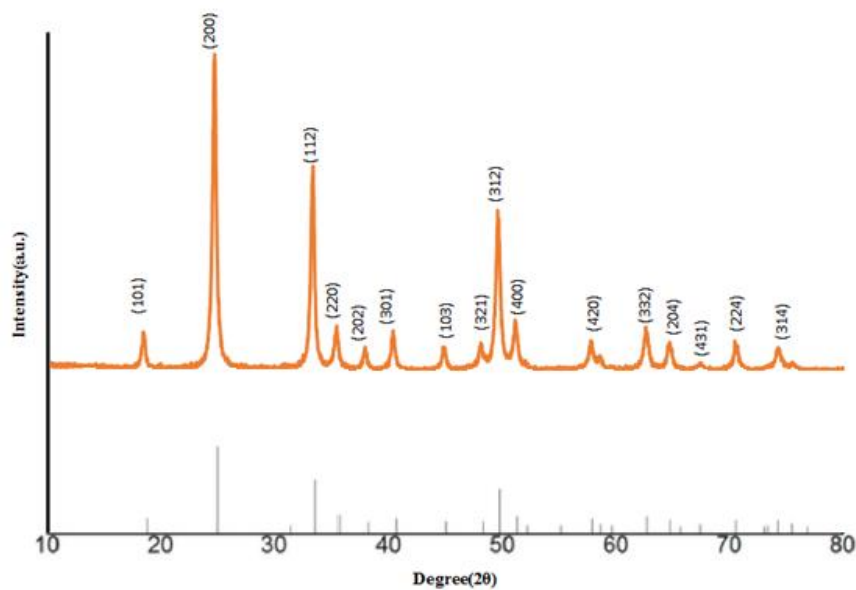
در این روش، ابتدا ۴ گرم ایتیریم نیترات، ۱/۲۳۶ گرم آمونیوم متاوانادات و ۰/۰۴ گرم یوروپیم نیترات در آب دیونیزه شده حل و به مدت ۱۵ دقیقه در دمای اتاق در یک بوتله آلومینایی هم زده شدند. در ادامه، اوره به‌عنوان سوخت فرایند سنتز احتراقی، درحالی که محلول به‌شدت در حال هم زده شدن است (تلاطم شدید)، به آن افزوده شد. محلول حاصل در یک کوره الکتریکی به مدت ۱۰ دقیقه تحت دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت‌دهی شده تا فرایند سنتز احتراقی تکمیل شود. با انجام مراحل بالا، فرایند تبخیر شروع شده و فرایند احتراق خود به خود، منجر به تولید پودری فوم شکل و با تراکم پایین در بوتله شد. به‌منظور حذف مواد آلی باقیمانده و ایجاد بلورینگی مطلوب، پودرها به مدت دو ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد کلسینه شدند.

### ۲-۳- پوشش‌دهی پودر وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم سنتز شده به روش احتراقی

به‌منظور تهیه محلول اولیه برای فرایند لایه‌نشانی چرخشی، پودر حاصل با اتانول مخلوط و هم زده شد تا اختلاط کامل صورت گیرد.

ایتیریم آلاییده شده با یون‌های نادر خاکی با هدف کنترل مورفولوژی و توزیع اندازه ذرات همراه با بازدهی لومینسانس بالا، هدف بسیاری از مطالعات بوده است. تاکنون روش‌های بسیاری نظیر سنتز احتراقی، هیدروترمال، رسوب‌گذاری و سل-ژل به‌منظور سنتز این ماده اپتیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۴، ۵ و ۷). در بین روش‌های سنتز وانادات ایتیریم، روش سنتز احتراقی به دلیل قابلیت تولید سریع، دستیابی به خلوص و همگنی بالا به‌طور گسترده رواج پیدا کرده است (۷ و ۹). در روش سنتز احتراقی، دمای بالای حاصل از واکنش‌های بسیار گرمای اکسایش-کاهش بین سوخت و اکسیدکننده، شرایط را برای تولید محصولاتی با خلوص و بلورینگی مناسب فراهم می‌کند. اثبات شده است که نوع سوخت مصرفی نقش زیادی در تعیین مورفولوژی و اندازه ذرات پودر نهایی ایفا می‌کند. در همین زمینه، تحقیقات قبلی نشان داده‌اند که افزایش میزان گرمای احتراق ناشی از قدرت سوخت سبب افزایش بلورینگی محصول پودری شکل و کاهش فازهای آلی می‌شود (۴ و ۵).

بدیهی است که سلول‌های خورشیدی در محدوده نور مرئی بهترین عملکرد را از خود نشان داده و نور فرابنفش به‌عنوان یکی از طیف‌های اصلی نور خورشید، یکی از عوامل اصلی تخریب آن‌ها است. مطالب بالا همگی مؤید آن است که مواد تبدیل‌کننده کاهشی می‌توانند امواج فرابنفش را جذب و امواجی در محدوده نور مرئی بازنشر دهند. از این‌رو، می‌توان انتظار داشت که استفاده از مواد تبدیل‌کننده کاهشی در سلول‌های خورشیدی می‌تواند راهکاری مفید و مؤثر برای بهبود عملکرد آن‌ها باشد. بر همین اساس، هدف از مطالعه حاضر، سنتز ماده تبدیل‌کننده کاهشی وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم به روش سنتز احتراقی و بررسی خواص فوتولومینسانس آن با هدف استفاده به‌عنوان پوشش روی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی به‌منظور بهبود عملکرد این سلول‌ها بود. نتایج بیانگر سنتز موفقیت‌آمیز پودر وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم با اندازه ذراتی در حدود ۸۰ نانومتر بود. بررسی خواص پودر سنتز شده نشان از قابلیت آن در جذب نور فرابنفش و بازنشر



شکل ۱- الگوی پراش پرتو ایکس پودر، وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم تولید شده به روش سنتز احتراقی.

سیلیکونی با استفاده از طیف‌سنج Jasco 680-Plus، طیف تبدیل فوری مادون قرمز<sup>۷</sup> در محدوده ۴۰۰۰-۵۰۰ سانتی متر معکوس ثبت شد. همچنین، از طیف‌سنج نوری در ناحیه فرابنفش- مرئی<sup>۸</sup> به منظور بررسی میزان جذب لایه تبدیل‌کننده کاهش‌ی وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم در ناحیه طول موج ۲۰۰-۸۰۰ نانومتر استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

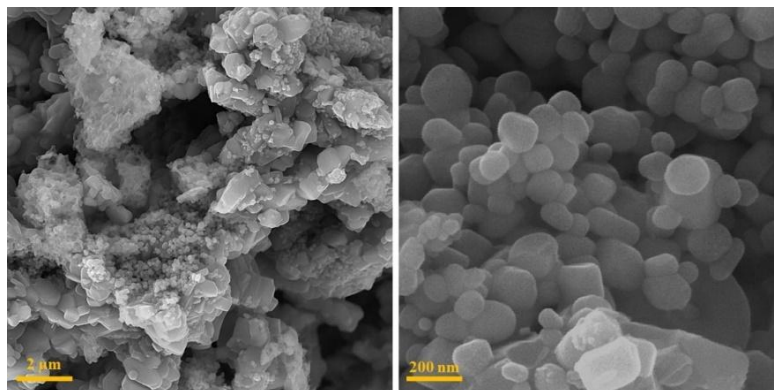
۳-۱- مشخصه‌یابی پودر پودر وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم سنتز شده به روش احتراقی

الگوی پراش پرتو ایکس و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی حاصل از وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم تولیدی به روش سنتز احتراقی به ترتیب در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱)، پودر تولیدی به روش سنتز احتراقی دارای ساختار بلوری تراگونال بوده و پیک‌های ظاهر شده به خوبی با استاندارد JCPDS 72-0861 مطابقت دارند. پیک‌های (۱۰۱)، (۲۰۰)، (۱۱۲)، (۳۰۱)، (۳۱۲)، (۴۲۰)، (۳۳۲) و (۳۱۴) به عنوان پیک‌های شاخص از الگوی استاندارد کاهش‌ی وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم

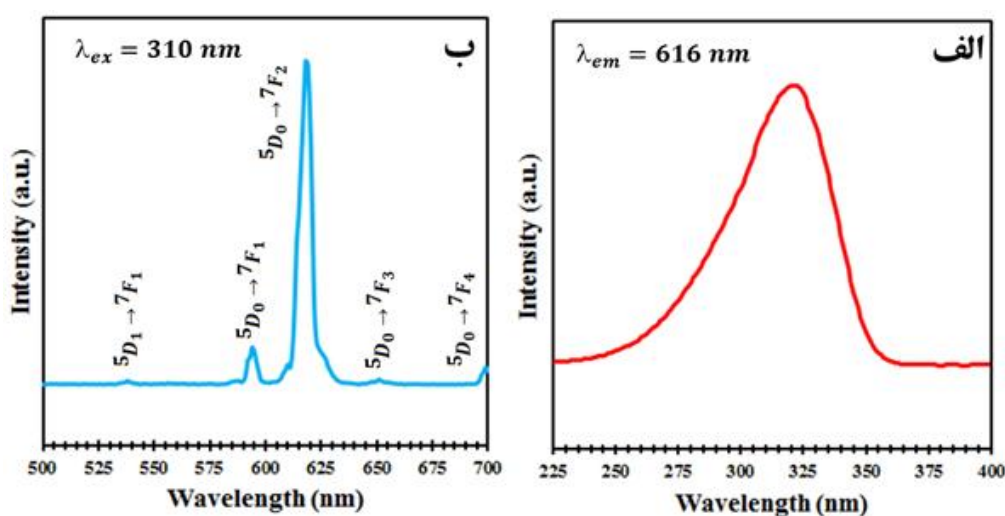
سپس مقدار ۵ میلی‌لیتر از محلول برداشته و با استفاده از فرایند چرخشی روی سلول خورشیدی لایه‌نشانی شد. در همین حین، محلول باقیمانده روی همزن مغناطیسی با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت نیم ساعت هم زده شده و دوباره ۵ میلی‌لیتر از آن روی لایه قبلی با فرایند چرخشی لایه‌نشانی شد. فرایند لایه‌نشانی چرخشی در تمامی مراحل لایه‌نشانی با دور ۴۵۰ دور بر دقیقه و به مدت زمان ۲۰ ثانیه انجام گرفت.

۳-۲- مشخصه‌یابی پودر وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم سنتز شده به روش احتراقی

در ابتدا، مشخصه‌های ساختاری نانوپودرها از طریق الگوی پراش پرتو ایکس<sup>۴</sup> با استفاده از (Asenware AW/XDM 300) مطالعه شد. سپس میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی<sup>۵</sup> (Quanta 450 FEG) به منظور مشاهده مورفولوژی و اندازه ذرات پودر سنتز شده استفاده شد. در ادامه، به منظور بررسی رفتار برانگیختگی و نشر فوتولومینسانس ماده، آنالیز طیف‌سنجی فوتولومینسانس<sup>۶</sup> با استفاده از طیف‌سنج تحریک و انتشار اپتیکی (Agilent G9800A, USA) انجام شد. به منظور بررسی قابلیت لایه‌نشانی پودر سنتز شده روی زیرلایه



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی پودر وانادات ایتريم آلاییده شده با یوروپیم در دو بزرگنمایی مختلف.



شکل ۳- الف) طیف برانگیختگی و ب) طیف نشر پودر وانادات ایتريم آلاییده شده با یوروپیم کلسینه شده حاصل از سنتز احتراقی.

است، بررسی خواص فوتولومینسانس آن نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. در شکل (۳) به ترتیب الف) طیف برانگیختگی و ب) طیف نشر پودر وانادات ایتريم آلاییده شده با یوروپیم حاصل از فرایند سنتز احتراقی پس از کلسینه شدن نشان داده شده است. با توجه به طیف برانگیختگی (شکل ۳- الف))، یک پیک پهن و مشخص در محدوده طول موج ۲۳۵-۳۵۵ نانومتر مشاهده می‌شود به گونه‌ای که حداکثر شدت در طول موج حدوداً ۳۱۸ نانومتر رخ داده است. گزارش شده است که باند مشخص موجود در طیف برانگیختگی ناشی از انتقال بار  $V^{5+}$  در وانادات است. در واقع، این پیک مشخص می‌تواند به انتقال انرژی بین ترازهای  ${}^1A_1$ - ${}^1T_1$  (۳۲۷ نانومتر) و  ${}^1A_1$ - ${}^1T_2$  (۲۹۷ نانومتر) ماده وانادات مربوط باشد. در واقع، چنین باند

ظاهر شده‌اند که بیانگر موفقیت‌آمیز بودن روش سنتز احتراقی در تولید ماده نانو ساختار کاهشی وانادات ایتريم آلاییده شده با یوروپیم بود. با توجه به عدم وجود هرگونه پیک اضافی در الگوی پراش پرتو ایکس پودر سنتز شده، می‌توان ادعا کرد که پودر تولیدی از نظر خلوص نیز قابل قبول است. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی حاصل از پودر وانادات ایتريم آلاییده شده با یوروپیم (شکل ۲) نیز تأییدی بر موفقیت‌آمیز بودن روش سنتز احتراقی در دستیابی به نانوپودر وانادات ایتريم آلاییده شده با یوروپیم با میانگین اندازه ذره در حدود ۸۰ نانومتر بود.

از آنجایی که ماده وانادات ایتريم آلاییده شده با یوروپیم با هدف یک ماده تبدیل‌کننده کاهشی مورد ارزیابی قرار گرفته

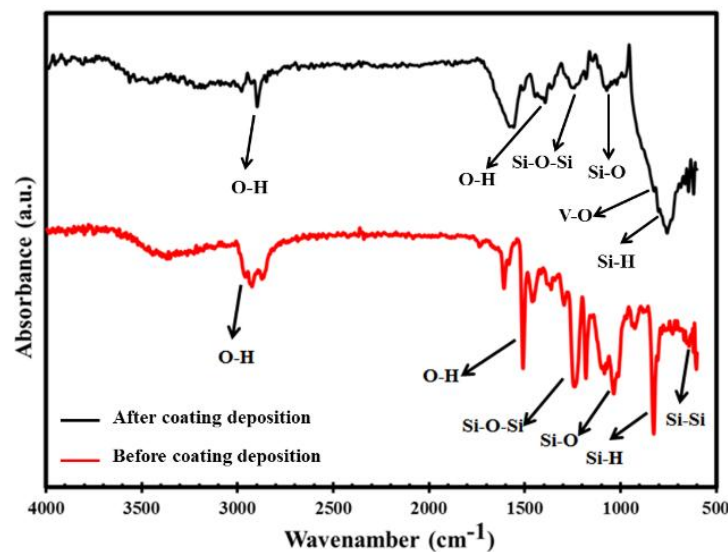
بوده و در نتیجه خلوص نور حاصل بالاتر است. ظاهر شدن پیک‌های متعلق به انتقال‌های مختلف که به‌عنوان مشخصه‌های تقسیم میدان بلوری یون یوروپیم شناخته می‌شوند، می‌تواند نشانی از سنتز موفقیت‌آمیز ماده تولیدی باشد. شایان ذکر است که اگرچه طول عمر نشر به نواقص، تعداد مکان‌های لومینسانس و ناخالصی‌های ماده میزبان وابسته است، لیکن مطالعات نشان داد که طول عمر انتقال بار  $^5D_0-7F_2$  مربوط به یون یوروپیم در ساختار بلوری وانادات ایتیریم حدوداً  $0.79$  میلی ثانیه است که عددی قابل قبول برای استفاده از این ماده به‌عنوان یک ماده تبدیل‌کننده کاهشی است (۷).

### ۳-۲- مشخصه‌یابی پوشش وانادات ایتیریم آلاییده شده با

#### یوروپیم لایه‌نشانی شده روی سلول خورشیدی سیلیکونی

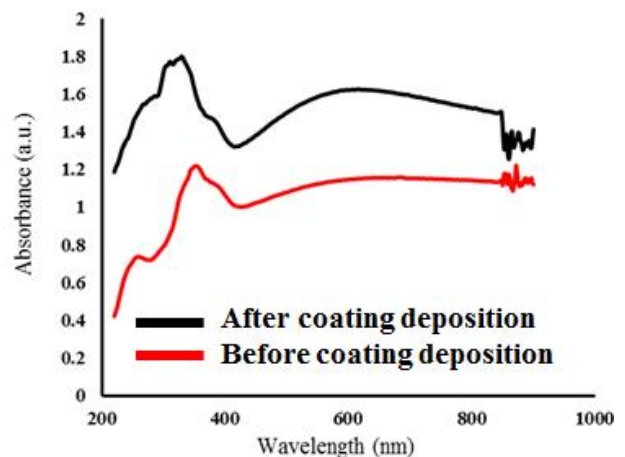
همان‌گونه که بیان شد، به‌منظور حصول اطمینان از حضور مؤثر لایه تبدیل‌کننده کاهشی وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم بر زیرلایه سیلیکونی، طیف تبدیل فوریه مادون قرمز نمونه‌ها قبل و پس از لایه‌نشانی لایه وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم سنتز شده به روش احتراقی ثبت شد (شکل ۴). مطابق انتظار، پیوندهای مربوط به لایه سیلیکون شامل پیوندهای Si-Si، Si-O-Si، و Si-H به ترتیب در طول موج‌های حدوداً  $650$ ،  $1250$  و  $800$  بر سانتی‌متر مشاهده شدند. همچنین باید ذکر کرد که پیوندهای O-H موجود در طیف تبدیل فوریه مادون قرمز نمونه نیز می‌تواند ناشی از حضور اجتناب‌ناپذیر آلودگی‌های اندک روی سطح نمونه باشد. همچنین، می‌توان مشاهده کرد که در طیف تبدیل فوریه مادون قرمز زیرلایه پس از لایه‌نشانی، پیوندهای V-O در طول موج  $834$  بر سانتی‌متر ظاهر شده‌اند که می‌تواند نشان از حضور لایه‌ای از وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم روی سطح سلول باشد که موفقیت‌آمیز بودن لایه‌نشانی این ماده بر زیرلایه سیلیکونی را تأیید می‌کند. مطالعات نشان داد که پیوندهای مشخصه وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم یعنی V-O و Y(Eu)-O به ترتیب در طول موج‌های حدوداً  $840$  و  $450$  بر سانتی‌متر ظاهر می‌شوند. لازم به ذکر

برانگیختگی قوی (پیک مشخص ظاهر شده در طیف برانگیختگی شکل (۳-الف)) می‌تواند نشانی از یک انتقال بار مؤثر و قوی بین ترازهای انرژی باشد. این انتقال بار قوی حین برانگیختگی در نهایت می‌تواند منجر به نشر قوی نور با طول موج‌های متفاوت (ظاهر شدن پیک‌های قوی در طیف نشر ماده) شود که نشان‌دهنده خصوصیات فوتولومینسانس مطلوب ماده وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم است. در همین راستا، مطالعات نشان داد که مواد لومینسانسی که وانادات در آن‌ها به‌عنوان زمینه عمل می‌کند، از شدت لومینسانس بالاتری برخوردار هستند (۴ و ۵). در حقیقت، در ساختارهایی که وانادات نقش زمینه را دارد، بعد از تابش نور و برانگیختگی الکترون، انرژی حاصل از این برانگیختگی سبب تحریک الکترون‌های موجود در نوار رسانش عنصر آلاییده شده در وانادات، می‌شود که متعاقباً نشر قوی نور در محدوده مرئی با طول موج‌های متفاوت را به دنبال خواهد داشت. سازگار با این حقیقت، در طیف نشر پودر وانادات ایتیریم آلاییده شده با یوروپیم حاصل از فرایند سنتز احتراقی (شکل ۳-ب)، در طول موج‌های حدوداً برابر با  $538$ ،  $594$ ،  $618$ ،  $652$  و  $697$  نانومتر پیک‌هایی ظاهر شده است. می‌توان بیان کرد که قوی‌ترین پیک نشر، مربوط به انتقال دو قطبی الکترونیکی  $^5D_0-7F_2$  بوده و در طول موج  $618$  نانومتر تحت برانگیختگی  $310$  نانومتر رخ داده است. پیک نسبتاً ضعیف ظاهر شده در طول موج  $538$  نانومتر متعلق به انتقال  $^5D_1-7F_1$  بوده و پیک‌های دیگر که به ترتیب در طول موج‌های  $652$  و  $697$  نانومتر ظاهر شده‌اند، به انتشار خطوط  $^5D_0-7F_x$  ( $x=1, 3, 4$ ) مربوط هستند (۱۰ و ۱۱). نسبت شدت پیک مربوط به انتقال  $^5D_0-7F_2$  به شدت پیک مربوط به انتقال  $^5D_0-7F_1$  می‌تواند معیاری برای تعیین تقارن مکانی از زمینه باشد که توسط یون‌های یوروپیم جایگزین می‌شود. این معیار، عموماً با R نشان داده می‌شود. مقایسه شدت پیک‌های مربوط به  $^5D_0-7F_1$  و  $^5D_0-7F_2$  نشان داد که مقدار R در پودر حاصل از سنتز احتراقی برابر با  $6/75$  است. بیان شده است که هر چه مقدار R بیشتر باشد، تقارن مکان‌های یون یوروپیم کمتر



شکل ۴- طیف‌های حاصل از آزمون طیف تبدیل فوریه مادون قرمز قبل و پس از پوشش دهی سلول با لایه وانادات ایتیریم آلایده شده با یوروپیم.

عامل مضر در کارکرد سلول‌های خورشیدی به پرتو نور مرئی مفید بود، آزمون جذب در ناحیه فرابنفش- مرئی روی زیرلایه سیلیکونی در دو حالت با/بدون لایه سطحی وانادات ایتیریم آلایده شده با یوروپیم حاصل از پودر سنتز احتراقی شده، انجام شد تا میزان جذب لایه وانادات ایتیریم آلایده شده با یوروپیم مورد ارزیابی قرار گیرد. طیف جذب نمونه‌ها قبل و پس از پوشش دهی در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۵) می‌توان پی برد که لایه‌نشانی ماده وانادات ایتیریم آلایده شده با یوروپیم روی زیرلایه سیلیکونی سبب جذب بیشتر نور مضر فرابنفش در مقایسه با سلول بدون پوشش شده است. از سویی دیگر، میزان جذب نور در ناحیه مرئی نیز افزایش یافته است که می‌تواند هم از باز نشر نور مرئی حاصل از تبدیل نور فرابنفش به مرئی توسط وانادات ایتیریم آلایده شده با یوروپیم و هم از قابلیت این ماده در جذب بیشتر نور مرئی نشأت گرفته باشد. از این رو، با توجه به افزایش میزان جذب نور مرئی در حضور لایه وانادات ایتیریم آلایده شده با یوروپیم و همچنین، کارکرد بهینه لایه وانادات ایتیریم آلایده شده با یوروپیم در تبدیل نور فرابنفش جذب شده به نور مرئی می‌توان انتظار داشت که این لایه بهبود عملکرد سلول خورشیدی را به دنبال خواهد داشت.



شکل ۵- الف) مقایسه طیف جذب سلول با و بدون حضور لایه لایه وانادات ایتیریم آلایده شده با یوروپیم.

است که مشاهده شدن پیوندهای مشخصه مربوط به زیرلایه در طیف تبدیل فوریه مادون قرمز زیرلایه پس از لایه‌نشانی می‌تواند ناشی از نازک بودن پوشش و عمق اثر طیف تبدیل فوریه مادون قرمز باشد (عمق اثر طیف تبدیل فوریه مادون قرمز بسته به عوامل متعدد حدوداً  $1/5 - 0/8$  میکرومتر است) (۷ و ۱۲). از آنجایی که هدف استفاده از ماده تبدیل‌کننده کاهشی وانادات ایتیریم آلایده شده با یوروپیم افزایش عملکرد سلول خورشیدی سیلیکونی از طریق تبدیل نور فرابنفش به‌عنوان

## ۴- نتیجه گیری

داشت. همچنین، آزمون جذب در ناحیه فرابنفش - مرئی مؤید آن بود که در حضور لایه وانادات ایتريم آلاییده شده با یوروپیم میزان جذب نور فرابنفش به عنوان یک عامل مضر برای عملکرد سلول‌های خورشیدی بیشتر شده؛ در نتیجه، این لایه توانسته است از رسیدن نور فرابنفش به سلول خورشیدی ممانعت به عمل آورد. همچنین، میزان جذب نور مرئی نیز به واسطه حضور لایه وانادات ایتريم آلاییده شده با یوروپیم و قابلیت آن در تبدیل نور فرابنفش به نور مرئی افزایش یافته است که می‌تواند بهبود عملکرد سلول را به دنبال داشته باشد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که لایه‌نشانی نانوپودر وانادات ایتريم آلاییده شده با یوروپیم سنتز شده به روش سنتز احتراقی می‌تواند گزینه مؤثر و امیدبخش برای بهبود عملکردهای سلول‌های خورشیدی سیلیکونی باشد.

در پژوهش حاضر، با هدف تولید یک ماده تبدیل‌کننده کاهشی، پودر وانادات ایتريم آلاییده شده با یوروپیم به روش سنتز احتراقی با متوسط اندازه ذرات ۸۰ نانومتر سنتز شد. ارزیابی خواص فوتولومینسانس نشان از موفقیت‌آمیز بودن روش سنتز احتراقی در تولید نانوپودر وانادات ایتريم آلاییده شده با یوروپیم با خاصیت تبدیل‌کننده کاهشی داشت. از آنجایی که این گروه از مواد گزینه‌ای جذاب برای بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی هستند، پودر سنتز شده روی سلول خورشیدی سیلیکونی لایه-نشانی شد. ظاهر شدن پیک‌های مربوط به پیوندهای V-O و Y(Eu)-O در طیف تبدیل فوریه مادون قرمز سلول لایه‌نشانی شده با نانوپودر وانادات ایتريم آلاییده شده با یوروپیم نشان از قابلیت لایه‌نشانی موفق پودر سنتز شده روی سطح سلول

## واژه‌نامه

1. Luminescent down-shifting materials
2. Ultraviolet (UV)
3. Photovoltaic systems
4. X-ray diffraction (XRD)
5. Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM)
6. Photoluminescence spectroscopy (PL)
7. Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)
8. UV-visible spectrophotometry

## مراجع

1. Klampaftis E, Ross D, McIntosh KR, Richards BS. Enhancing the performance of solar cells via luminescent down-shifting of the incident spectrum: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2009 Aug 1;93(8):1182-94.
2. Rothmund R, Kreuzer S, Umundum T, Meinhardt G, Fromherz T, Jantsch W. External quantum efficiency analysis of Si solar cells with II-VI nanocrystal luminescent down-shifting layers. *Energy Procedia*. 2011 Jan 1;10:83-7.
3. González-Pérez S, Sanchiz J, Rodríguez VD, Cañadillas-Ramallo D, González-Platas J, Borchert D, González-Díaz B, Hernández-Rodríguez C, Guerrero-Lemus R. Highly luminescent film as enhancer of photovoltaic devices. *Journal of Luminescence*. 2018 Sep 1;201:148-55.
4. Rafiaei SM, Ashrafi F, Sayyadi-Shahraki A, Karimzadeh E. Enhanced luminescence properties of phosphors coated by silica nano-layers: Study of reflection and emission. *Ceramics International*. 2019 Feb 1;45(2):1670-5.
5. Rafiaei SM, Shokouhimehr M. Impact of process parameters on luminescence properties and nanostructure of  $YVO_4: Eu$  phosphor. *Materials Chemistry and Physics*. 2019 May 1;229:431-6.
6. Huang CK, Chen YC, Hung WB, Chen TM, Sun KW, Chang WL. Enhanced light harvesting of Si solar cells via luminescent down-shifting using  $YVO_4: Bi^{3+}, Eu^{3+}$  nanophosphors. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2013 Nov;21(7):1507-13.
7. Rafiaei SM, Shokouhimehr M. Synthesis and luminescence properties of transparent  $YVO_4: Eu^{3+}$  phosphors. *Materials Research Express*. 2018 Sep 12;5(11):116208.
8. Chander N, Sardana SK, Parashar PK, Khan AF, Chawla S, Komarala VK. Improving the short-wavelength spectral response of silicon solar cells by spray deposition of  $YVO_4: Eu^{3+}$  downshifting phosphor nanoparticles. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2015 Jun 10;5(5):1373-9.
9. Pawade VB, Swart HC, Dhoble SJ. Review of rare earth activated blue emission phosphors prepared by combustion synthesis. *Renewable and Sustainable*



- Energy Reviews. 2015 Dec 1;52:596-612.
10. Lee Y, Park C, Balaji N, Lee YJ, Dao VA. High-efficiency silicon solar cells: A review. Israel Journal of Chemistry. 2015 Oct;55(10):1050-63.
11. Liu J, Yao Y, Xiao S, Gu X. Review of status developments of high-efficiency crystalline silicon solar cells. Journal of Physics D: Applied Physics. 2018 Feb 20;51(12):123001.
12. Liang Y, Ouyang J, Wang H, Wang W, Chui P, Sun K. Synthesis and characterization of core-shell structured  $SiO_2@YVO_4: Yb^{3+}, Er^{3+}$  microspheres. Applied surface science. 2012 Feb 1;258(8):3689-94.