

واژه‌های کلیدی:

نانوالیاف
نقاط کوانتوم
رنگ
خواص نوری
الکترورسی

مروری بر خواص رنگی، ریزساختار و کاربرد نانوالیاف نورتاب مبتنی بر نقاط کوانتومی

حدیثه سادات موسوی^۱، سعیده گرچی کندی^{۱*}، امیرمسعود اعرابی^۲

۱ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ

۲ پژوهشگاه رنگ، پژوهشکده مواد رنگ‌زا

چکیده ...

مواد نانو ساختار به دلیل خواص و ویژگی‌های منحصر به فرد و کاربرد روزافزون در دهه‌ی اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. نانو ساختارهای صفر بعدی مانند نقاط کوانتوم و یک بعدی مانند نانوالیاف با ارائه‌ی خواص منحصر به فرد در حیطه‌های بسیاری از جمله نوری، الکترونیکی و مغناطیسی کاربرد دارند. به دلیل کمبود اطلاعات در مورد این مواد، کاربرد آن‌ها با محدودیت روبه‌رو شده است. نانوالیاف ساخته شده با نقاط کوانتوم، رفتارهای نوری جالبی از خود نشان می‌دهند. استفاده از نقاط کوانتوم برای تولید نانوالیاف علاوه بر دارا بودن مزایا نسبت به رنگ‌زاهای فلورسنتی مرسوم، خواص جالبی مانند قابلیت تنظیم طول موج نشر شده، ارائه می‌دهد. در این مطالعه، عوامل اثرگذار نقاط کوانتوم بر رفتار نانوالیاف بررسی می‌شود. از جمله این موارد می‌توان به چگونگی قرار گرفتن در نانولیف، غلظت و نحوه‌ی سنتز نقاط کوانتوم اشاره کرد. توده شدن نقاط کوانتوم در لیف موجب از دست رفتن برخی از خواص نوری نقاط کوانتوم می‌شود و تغییرات غلظت باعث تغییر در خواص ریزساختاری و نوری می‌شود و نحوه‌ی سنتز نقاط کوانتوم، خواص نوری آن‌ها را متأثر می‌کند.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

s.gorji@aut.ac.ir

۱ مقدمه

نانوساختارهای یک‌بعدی با کاربردهای لومینوسنسی (Luminescence) در سال‌های اخیر در کاربردهایی از قبیل دیودهای ساطع‌کننده نور (LED)، نمایشگرهای تمام‌رنگی، لیزرها و ذخیره‌کننده‌های اطلاعات [۱]، گیرنده‌ها (Detector)، منابع نوری، حسگرها (Sensors) [۲] و غیره کاربرد پیدا کرده‌اند. از میان روش‌های مختلف برای تولید نانوالیاف با خواص نورتابی، نقاط کوانتوم (Quantum Dots) به خاطر دارا بودن مزایایی از قبیل قابل تنظیم بودن طول موج نشر نور، توجه بسیاری را به خود معطوف کرده‌اند [۳]. خواص نوری نانوالیاف پر شده با نقاط کوانتومی به موارد متفاوتی وابسته است. از جمله‌ی این موارد می‌توان به جایگیری نقاط کوانتوم در الیاف [۴]، غلظت نقاط کوانتوم [۵-۸]، ریزساختار (Morphology) و قطر نانوالیاف [۹] اشاره کرد. به همین دلیل، در تحقیقات منتشرشده به روش‌های مختلف خواص نوری و ریزساختاری نانوالیاف تولیدشده، بررسی می‌شود.

۲ نانوالیاف

در صنعت نساجی نانوالیاف به عنوان الیافی با قطر کمتر از صد هزار نانومتر تعریف می‌شود [۱۰]. این دسته نانوساختارهای تک‌بعدی به دلیل داشتن اندازه‌ی کوچک، سطح ویژه‌ی بزرگ و در نتیجه خواص الکتریکی، مغناطیسی و نوری منحصر به فرد، بسیار مورد توجه واقع شده‌اند [۱۱].

این مواد با استفاده از روش‌های مختلف از جمله الکترووریسی (Electrospinning)، الکترواستاتیک‌وریسی (Electrostatic Spinning)، ذوب‌وریسی (Melt processing)، پلیمرشدن بین‌سطحی (Interfacial Polymerization) و غیره قابل تولید هستند [۱۲]. در دهه‌ی اخیر، الکترووریسی به عنوان روشی جهان‌شمول برای تولید نانوالیاف در مقیاس نانومتری مطرح شده است [۱]. الکترووریسی روشی کارآمد و ارزان‌قیمت برای تولید نانوالیاف است که قابلیت تولید دوباره را بالا برده، توجه روزافزونی را به خود معطوف کرده است؛ به طوری که بالغ بر ۲۰۰۰ مقاله در هر سال پیرامون این موضوع منتشر می‌شود و بخش عظیمی از خصوصیات ریزساختاری و در پی آن خواص نوری نانوالیاف به شرایط الکترووریسی وابسته است [۱۳-۱۴].

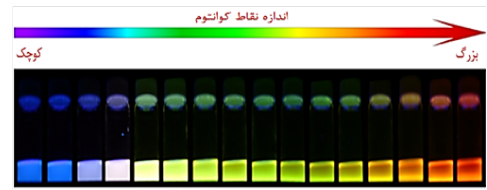
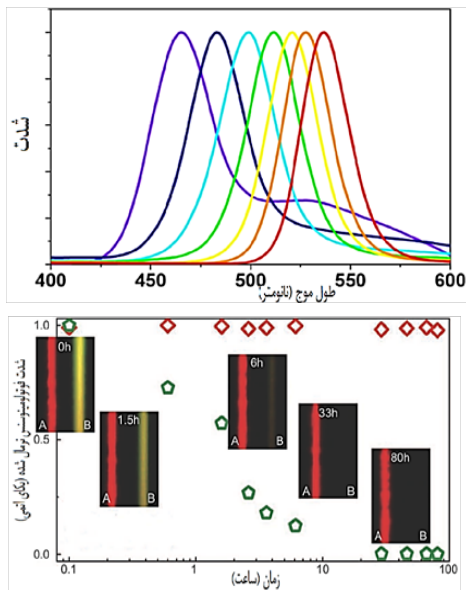
تولید نانوالیاف از طریق الکترووریسی به چند روش انجام می‌گیرد:

- ۱) الکترووریسی پلیمرهایی که دارای خاصیت نورتابی هستند.
- ۲) استفاده از پلیمرهای خنثی و پر کردن آن‌ها با موادی که دارای خاصیت نورتابی هستند که از آن جمله نقاط کوانتوم و مواد رنگ‌زای فلورسنت است.

۳ نقاط کوانتوم

تقویت خصوصیات مواد با استفاده از نانوفناوری جداییت روزافزونی در حیطه‌ی پلیمر به خود اختصاص داده است؛ چراکه مواد (ترکیبات) تقویت‌شده در مقایسه با پلیمرهای خالص، خواص مکانیکی ساختاری بهتری از خود نشان می‌دهد. نوع و خواص پرکننده (Filler) به کار گرفته شده، خاصیت نانو کامپوزیت‌ها را تعیین می‌کند. نانوذرات نیمه‌هادی (نقاط کوانتوم) استفاده‌شده به عنوان تقویت‌کننده‌های پلیمر، به دلیل ویژگی‌های غیرمعمول از جمله خواص نوری وابسته به اندازه‌ی ذره، مورد توجه قرار گرفتند. خواص نوری قابل تنظیم آن‌ها می‌تواند با قرار گرفتن در داخل پلیمر، مشخص شده و موجب نشر نور داخل پلیمرها شود [۶]. نقاط کوانتوم در واقع نانوذرات بلوری نیمه‌هادی با اندازه‌ای کمتر از شعاع بوهر (Bohr Radius) است که اضافه و کم شدن الکترون به آن‌ها می‌تواند اثر قابل توجهی بر آن‌ها بگذارد؛ چراکه خواص کوانتومی، برخاسته از محدوده الکترون و حفره درونشان است. اندازه این نقاط کوانتوم بر خواص نوری و الکترونی اثرگذار است و خواص آن‌ها را از حالت توده‌ای متمایز می‌کند. یکی از ویژگی‌های این مواد، قابل تنظیم بودن شکاف انرژی (Band Gap) است که از این طریق طول موج نور جذب‌شده و انتشاریافته تنظیم می‌شود.

هرچه اندازه ذره بزرگ‌تر باشد طول موج‌های جذب‌شده بلندتر است [۷]. این ذرات دارای کاربردهای فراوان در زمینه‌های الکترونیکی، نوری و زیستی هستند [۳]. از جمله مزایای نقاط کوانتوم این است که برخلاف نیمه‌هادی‌ای سخت و شکننده، این قابلیت را دارند که به شکل‌های مختلف مثل ورق یا شکل‌های سه‌بعدی درآیند. همچنین می‌توانند با پلیمرهای آلی و رنگ‌زاهای مخلوط شوند یا داخل فیلم‌های متخلخل وارد شوند [۷]. کمبود اطلاعات در زمینه نقاط کوانتوم منجر به محدودیت کاربرد آن‌ها شده است [۵].



شکل ۱-۱ رابطه طول موج منتشر شده و اندازه ذرات نقاط کوانتوم [۳]

شکل ۲-۱ مقایسه تغییرات طول موج نانوالیاف تولید شده به وسیله نقاط کوانتوم (سبز رنگ) و نانوالیاف های تولید شده با رنگ زاهای فلورسنت (قرمز رنگ) با گذشت زمان نقاط کوانتوم با قطر ۵۸۰ نانومتر و نقاط سبز مربوط به سامانه نانولیف/ ماده‌ی رنگ‌زا با قطر ۵۳۰ نانومتر [۱۵].

اخیر، تحقیقات نظری و عملی در این زمینه پیشرفت چشمگیری داشته است [۳].

۲-۳ کاربردهای نقاط کوانتوم

با توجه به این که نقاط کوانتوم دارای نسبت سطح به حجم بالایی هستند و سطحی حساس به تغییرات شیمیایی دارند، گزینه مناسبی برای به کارگیری به عنوان حسگرهای نوری هستند. به عنوان مثال می توان برای اندازه گیری رطوبت نسبی محیط از این مواد استفاده کرد [۱۵]. همچنین در قرن های اخیر دیودهای ساطع کننده نور بر پایه نقاط کوانتوم توجه زیادی از لحاظ تحقیقاتی و تجاری را به خود معطوف کرده اند و جایگزین خوبی برای LED های معمول بوده اند. همین طور در سلول های خورشیدی (Solar cells) کاربرد پیدا کرده اند. از دیگر کاربردهای نقاط کوانتوم می توان به تقویت کننده ها (Amplifiers) و لیزرها اشاره کرد [۳].

۴ عوامل اثرگذار بر رنگ و رفتار نوری نانوالیاف حاوی نقاط کوانتوم

عوامل بسیار زیادی بر رفتار نوری و ریزساختاری نانوالیاف اثرگذار است. از آن جمله می توان به عوامل تولید نانوالیاف

به دلیل کاربردهای بیشتر و خواص نوری قابل تنظیم با تغییر اندازه ذرات، استفاده از نقاط کوانتوم مورد توجه قرار گرفته است [۲]. همچنین نقاط کوانتوم نسبت به رنگ زاهای فلورسنتی دارای خواص بهتری هستند که از جمله ی آن ها می توان به این موارد اشاره کرد که طیف رنگ زاهای فلورسنتی کوتاه و پهن است؛ درحالی که نقاط کوانتوم طیف باریک و بلندی دارند و سرعت از دست رفتن رنگ در نقاط کوانتوم کمتر است [۶]. شکل ۱ ویژگی های ذکر شده در مورد نقاط کوانتومی اعم از وابستگی اندازه به طول موج را نشان می دهد و ثابت می کند در مقایسه با نانوالیافی که توسط مواد رنگ زای فلورسنت پر شده اند، الیاف تولید شده بر اساس نقاط کوانتوم پایداری بیشتری در خصوص از دست دادن رنگ نشان می دهد. چنین خصوصیتی، این مواد را به گزینه های خوبی برای استفاده در کاربردهایی که به مدت زمان و پایداری زیاد نیاز دارند، تبدیل کرده است [۱۵].

۱-۳ تاریخچه تولید نقاط کوانتومی

فرایند سنتز PbS بیش از ۲۰۰۰ سال پیش با استفاده از مواد ارزان قیمت طبیعی مانند $PbO \cdot Ca(OH)_2$ و آب انجام گرفت. رومی ها و یونانی ها از آن برای رنگ کردن موی سر استفاده می کردند. در زمان های دور، کنترل اندازه ی نقاط کوانتوم استفاده شده در ساخت لیوان های سیلیکاتی یکی از روش های بسیار قدیمی برای کنترل رنگ لیوان بوده است. در اوایل قرن بیستم از سولفید کادمیوم و سلنید کادمیوم برای تولید رنگ قرمز- زرد در لیوان های سیلیکونی استفاده شد و بعدها با استفاده از تفرق اشعه ایکس مشخص شد این دو منجر به تولید رنگ می شوند. پس از آن مشخص شد که با تغییر اندازه یا استوکیومتری نسبت کادمیوم و سلنیوم می توان به رنگ های دیگری دست پیدا کرد. در دو دهه

و شرایط الکترورسی اشاره کرد یا عواملی که بر خواص نوری نقاط کوانتوم اثر می‌گذارد را مد نظر داشت.

۱-۴ روش پخش نقاط کوانتوم در نانوالیاف

جاسازی نقاط کوانتوم در نانوالیاف از طریق الکترورسی توسط بسیاری از محققان تأیید شده است و خواص خوبی به دست آمده است [۶]. به دو روش می‌توان نقاط کوانتوم را به ماتریس پلیمری اضافه کرد [۲]:

(۱) اضافه کردن کلویدهای آماده‌ی نقاط کوانتوم

(۲) واکنش در داخل ماتریس پلیمری

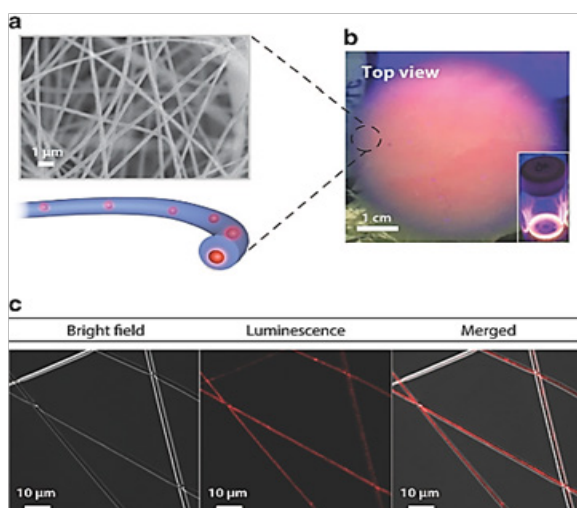
در روش اول نقاط کوانتوم در حلال‌هایی که امکان توده شدن ندارند و می‌بایست حل شوند به ماتریس پلیمری اضافه می‌شوند [۴]. در این روش قطر ذرات و توزیع اندازه‌ی آن‌ها به طور دقیق کنترل می‌شود. اما حضور نقاط کوانتوم ممکن است خواص رئولوژیکی محلول الکترورسی را تحت تأثیر قرار بدهد. تنوع در خواص رئولوژیکی حتی می‌تواند منجر به لخته شدن و مسدود شدن دهانه‌ی دستگاه نخررسی شود.

در روش دوم این قبیل مشکلات حل می‌شود؛ درحالی‌که ممکن است حضور مولکول‌های اولیه موجب به خطر افتادن خواص فیزیکی و شیمیایی محلول الکترورسی شود. همچنین در این روش توزیع نقاط کوانتوم، بهتر کنترل می‌شود؛ درحالی‌که کنترل اندازه‌ی قطر و توزیع اندازه ذرات مشکل است [۲]. از دیگر مزایای این روش تولید مستقیم نقاط کوانتوم داخل فیلم است که از فرایند تولید چندمرحله‌ای جلوگیری می‌کند. همچنین گفته شده است که نقاط کوانتوم تولیدشده با این روش خواص نوری عالی‌ای از خود نشان می‌دهد و شدت نور با زمان افزایش پیدا می‌کند. یکی دیگر از مزایای تولید با این روش، امکان تولید دوباره نقاط کوانتوم به گونه‌ای است که خاصیت پیشین را داشته باشند [۱۶]. با وجود مطالعات بسیار، هنوز هم چالش توزیع نقاط کوانتوم داخل نانوالیاف وجود دارد [۶]. پخش یکنواخت نقاط کوانتوم و لخته نشدن آن‌ها در نانولیف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ چرا که خواص شیمی فیزیکی نمونه‌های عاملی مثل رنگ‌زاهای آلی، نقاط کوانتوم، گرافن و نانوساختارهای دیگر نسبت به حالت توده متفاوت است. مثلاً در دیودهای ساطع کننده نور، ایجاد تجمع منجر به بروز مشکلاتی از جمله جابه‌جایی طیفی، پهن شدن طیف و کاهش بازده کوانتومی می‌شود.

در مورد جامدات، بالا بردن ضخامت فیلم به طوری که این مواد در حالت مجزا از هم باقی بمانند، مسأله‌ای چالش برانگیز است. یکی از مشاهدات کلیدی نشان داد که با کاهش قطر لیف، به طور غیرمنتظره‌ای تجمع نقاط کوانتوم کمتر شده، فاصله آن‌ها بیشتر می‌شود [۴]. با بررسی طیف فتولومینوسنس و تنزل طول عمر، مشاهده می‌شود که نقاط کوانتوم در حالت جدا از هم نسبت به زمانی که به حالت توده‌های دویعدی هستند، طیف روشن تر و طول عمر بیشتری دارند.

در مطالعه دیگری نقاط کوانتوم سلنیدکادمیوم داخل پلی‌متیل متاکریلات الکترورسی شد و سپس نانوالیاف با قطرهای متفاوت تهیه و خصوصیات آن‌ها بررسی شد. در فرایند الکترورسی به دلیل کشش بالا و تبخیر حلال، نیروی کششی زیادی بر نقاط کوانتوم تحمیل شده و باعث می‌شود نقاط کوانتوم در جهت کشش مرتب شوند. در این مطالعه از نانوالیاف با قطرهای ۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ نانومتر استفاده شد. قطر نانوالیاف به مدت زمان الکترورسی بستگی داشت. در شکل ۲ خواص ریزساختاری و نوری نانوالیاف با قطر ۲۵۰ نانومتر نشان داده شده است.

این نانوالیاف مشابه حالتی که نقاط کوانتوم در حلال قرار گرفته باشند، نور نارنجی ساطع می‌کند. در صورتی که پلی‌متیل متاکریلات فاقد نقاط کوانتوم، هیچ



شکل ۲ (a) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوالیاف شامل نقاط کوانتوم مجزا، (b) نانوالیاف شامل نقاط کوانتوم مجزا که روی فویل آلومینیومی قرار گرفته و تحت تهییج، نور نارنجی منتشر کرده است، (c) تصاویر لومینوسنس [۴].

تغییر کرده، افت نوری سریع تری دارند. این نتایج نشان می‌دهد که انتقال انرژی اکسایتون بر اثر انتقال دو قطبی- دو قطبی روی طیف فوتولومینوسنس و تنزل آن و طول عمر نقاط کوانتوم اثر دارد. در این مطالعه جابه‌جایی به رنگ قرمز در لخته‌های نقاط کوانتوم تأیید شده است [۴].

بنابراین به اهمیت پخش صحیح نقاط کوانتوم در طول نانوالیاف پی برده می‌شود و این مهم به دست می‌آید که با پخش ناصحیح در طول نانوالیاف و لخته شدن آن‌ها خواص نوری نقاط کوانتوم دستخوش تغییراتی می‌شود و می‌بایست از لخته شدن نقاط کوانتوم در طی فرایند الکترورسی ممانعت به عمل آورد، هرچند به دلیل اثراتی چون جابجایی محیط اطراف نقاط کوانتوم و حلال، تغییرات کوچکی در رفتار نوری آن‌ها زمانی که در نانوالیاف قرار داده می‌شوند، مشاهده خواهد شد.

۲-۴ غلظت نقاط کوانتوم

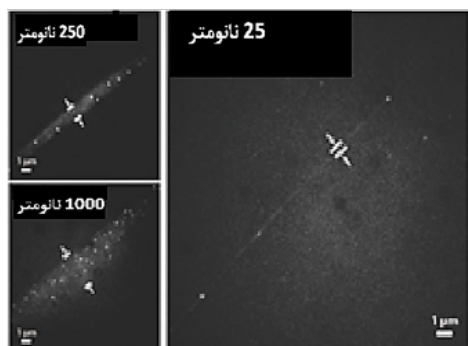
در تعدادی از مطالعات به بررسی اثر غلظت نقاط کوانتوم بر رفتار نوری و ریزساختار نانوالیاف پرداخته شده است.

در یکی از این مطالعات، ماتریس پلیمری پلی‌متیل متاکریلات به وسیله نقاط کوانتوم سولفیدکادمیوم و سلنیدکادمیوم با غلظت‌های ۲ و ۵ و ۱۰ درصد نسبت به پلی‌متیل متاکریلات پر شده است. ادعا شده است که افزایش غلظت نقاط کوانتوم موجب افزایش قطر و دانه زدن الیاف می‌شود [۶].

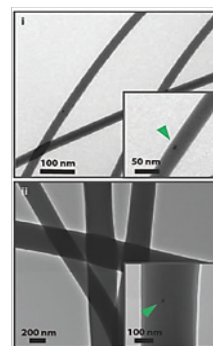
رفتار نوری الیاف با استفاده از آزمون‌های

نوری از خود منتشر نمی‌کند. شکل ۲c نشان می‌دهد که نقاط کوانتوم به خوبی در طول الیاف پخش شده است. برای به دست آوردن اطلاعات در مورد پخش نقاط کوانتوم در الیاف از آزمون میکروسکوپ الکترونی انتقالی (Transmission Electron Microscopy (TEM)) استفاده شد. در شکل ۳-۱ پلی‌متیل متاکریلات با قطرهای ۲۵ و ۲۵۰ نانومتر نشان داده شده و مشاهده می‌شود که نقاط کوانتوم بدون این که لخته شوند، توزیع شده‌اند. در شکل ۳-۲ اثر قطر نانوالیاف بر پخش نقاط کوانتوم نشان داده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، به میزانی که نانوالیاف نازک‌تر شده است نقاط کوانتوم با فواصل بیشتری از یکدیگر قرار گرفته‌اند. به صورت شگفت‌آوری دیده شد که زمانی که الیاف ۲۵ نانومتری را با میزان نقاط کوانتوم با غلظتی ده برابر الیاف ۲۵۰ نانومتری و ۱۰۰۰ نانومتری الکترورسی کنیم، فواصل نقاط کوانتوم در این الیاف بسیار بیشتر از دو نوع دیگر است. در نتیجه کنترل اندازه قطر الیاف، روشی برای کنترل تجمع نقاط کوانتوم در آن‌ها است [۴].

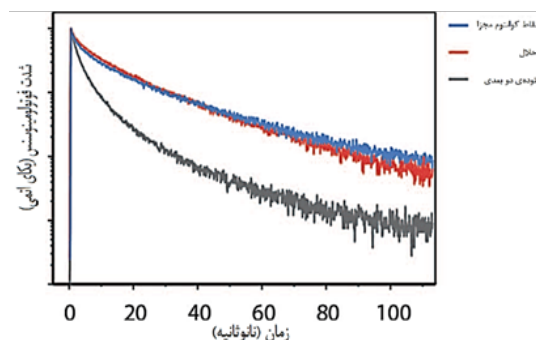
همچنین می‌توان از روش‌هایی مانند اصلاح سطحی نقاط کوانتوم و کنترل چگالی آن‌ها نیز استفاده کرد [۱۵]. به همین ترتیب نمودار تنزل فوتولومینوسنس در شکل ۴-۱ برای نقاط کوانتوم مجزا به رنگ قرمز، برای نقاط کوانتوم موجود در حلال به رنگ آبی و برای توده‌های نقاط کوانتوم به رنگ خاکستری نشان داده شده است. در شکل ۴-۲ به وضوح مشاهده می‌شود که نقاط کوانتوم در حالت مجزا و در حالت محلول، رفتار مشابهی نشان می‌دهند؛ در حالی که در مورد لخته‌ها این رفتار



شکل ۳-۲ پخش نقاط کوانتوم در نانوالیاف با قطرهای ۲۵، ۲۵۰ و ۱۰۰۰ نانومتر [۴].

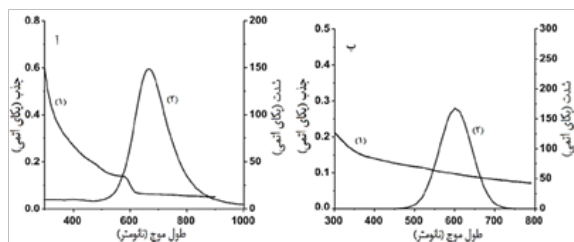


شکل ۳-۱ آزمون میکروسکوپ الکترونی انتقالی (i) نانوالیاف با قطر ۲۵ نانومتر، (ii) نانوالیاف با قطر ۲۵۰ نانومتر [۴].

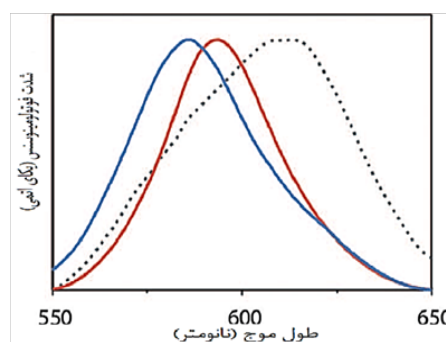


شکل ۴-۲ منحنی تنزل فتولومینوسنس در نانوالیاف، منحنی آبی مربوط به نقاط کوانتوم در محیط حلال، منحنی قرمز مربوط به قطر ۲۵۰ نانومتر، منحنی خاکستری مربوط به توده دوبعدی نقاط کوانتوم [۴].

کوانتومی است. جذب هر دو نقطه کوانتوم در نانوالیاف نسبت به نقاط کوانتوم در حالت آزاد دارای جابه‌جایی به سمت قرمز است که در اثر تغییر محیط نقاط کوانتوم و جایگزینی پلیمر است. سولفیدکادمیوم در حالت آزاد و داخل الیاف به ترتیب در ۴۸۱ و ۴۹۳ و سلنیدکادمیوم در هر دو حالت در ۶۰۳ نانومتر، قله دارند. همچنین نقاط کوانتوم در مقایسه با حالت توده‌ای جابه‌جایی به سمت رنگ آبی دارند. در حالت توده‌ای سولفیدکادمیوم و سلنیدکادمیوم به ترتیب در ۵۱۵ و ۷۱۳ نانومتر قله نشان می‌دهند. دنباله دار شدن طیف جذبی سلنیدکادمیوم داخل پلی‌متیل متاکریلات و همچنین جابه‌جایی به سمت رنگ قرمز، نشان‌دهنده توزیع ضعیف در نانوالیاف است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، تغییر در میزان غلظت نقاط کوانتوم منجر به تغییر در مکان قله نمی‌شود و تنها با افزایش غلظت قله به سمت بالاتر هدایت می‌شود که نشان می‌دهد افزایش غلظت نقاط



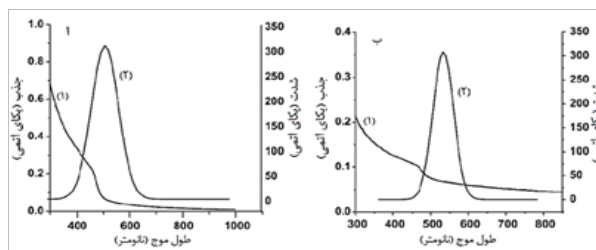
شکل ۵-۲ جذب نوری (۱) و طیف فتولومینوسنس (۲) آ: سلنیدکادمیم در حالت آزاد ب: سولفیدکادمیم در نانوالیاف [۶].



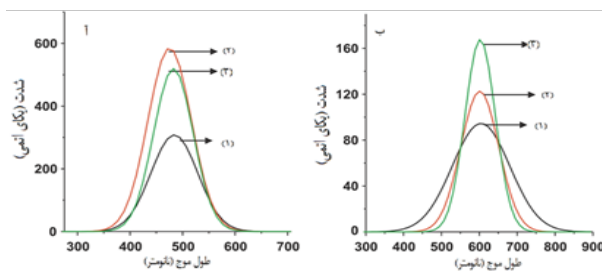
شکل ۴-۱ طیف فتولومینوسنس در نانوالیاف، منحنی آبی مربوط به نقاط کوانتوم در محیط حلال، منحنی قرمز مربوط به قطر ۲۵۰ نانومتر، منحنی خاکستری مربوط به توده دوبعدی نقاط کوانتوم.

فتولومینوسنس و جذب ماورای بنفش، ریزساختاربا استفاده از آزمون میکروسکوپ الکترونی روشی و آزمون میکروسکوپ الکترون انتقالی و برخی خواص الیاف با استفاده از آزمون تفرق اشعه ایکس و آزمون پایداری حرارتی و آزمون فرسوخ بررسی شد. برای آماده‌سازی محلول الکتروریسی از حلال‌های دی‌متیل فرامید و تولوئن که به ترتیب حلال مربوط به پلیمر و نقاط کوانتوم هستند، به نسبت ۵۰ به ۵۰ استفاده شد و سپس پلیمر با نسبت وزنی ۵۰ درصد وارد حلال شد. پس از آن نقاط کوانتوم با نسبت های ۲، ۵ و ۱۰ درصد وزنی به ماتریس پلیمری اضافه و با هم مخلوط شدند.

شکل ۵ رفتار نوری و طیف لومینوسنس نقاط کوانتومی سولفیدکادمیم و سلنیدکادمیم را در حالت آزاد و رفتار نوری این دو نقاط کوانتومی را در الیاف نشان می‌دهد. قله تهیج در طیف جذبی، نشان‌دهنده اثر تحدید



شکل ۵-۱ جذب نوری (۱) و طیف فتولومینوسنس (۲) آ: سولفیدکادمیم در حالت آزاد ب: سلنیدکادمیم در نانوالیاف.

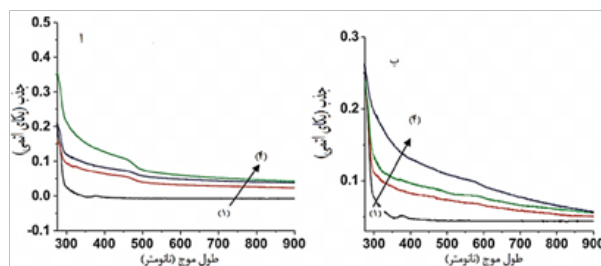


شکل ۶-۲ جذب نوری آ: سولفیدکادمیوم در نانو الیاف ب: سلنیدکادمیوم در نانوالیاف، (۱): ۲٪، (۲): ۵٪، (۳): ۱۰٪ وزنی [۶].

نانوالیاف بهبود می یابد. زمانی که غلظت نقاط کوانتوم ۵ درصد وزنی باشد، الیاف غیرموجی و تقریباً صاف با تعداد کمی دانه بر سطح آن تشکیل می شود. قطر الیاف بسته به میزان نقاط کوانتومی که در آن به کار برده شده است از ۴۰۰ تا ۶۵۰ نانومتر تغییر کرده، افزایش میزان نقاط کوانتوم منجر به افزایش قطر نانوالیاف می شود.

آزمون تفرق اشعه ایکس برای بررسی حضور نقاط کوانتوم و همچنین تشخیص بلوری بودن نقاط کوانتوم و پلیمر صورت گرفت. با توجه به شکل ۸ هیچ قله تفرقی مربوط به نقطه کوانتوم مشاهده نمی شود که نشان می دهد توزیع نقاط کوانتوم مناسب بوده است و لخته تشکیل نداده اند و مقادیر کوچک هم با این آزمون قابل شناسایی نیست.

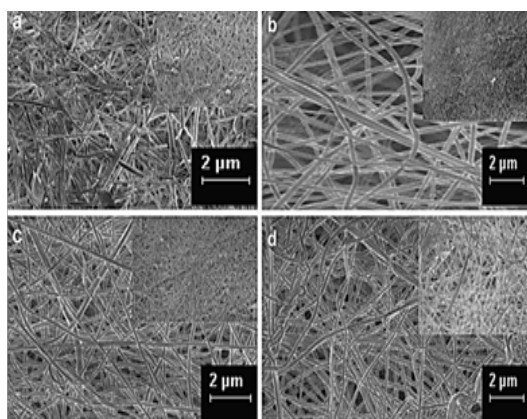
یکی دیگر از آزمون های استفاده شده، آزمون طیف سنجی فروسرخ برای بررسی تغییر عملیتی طی



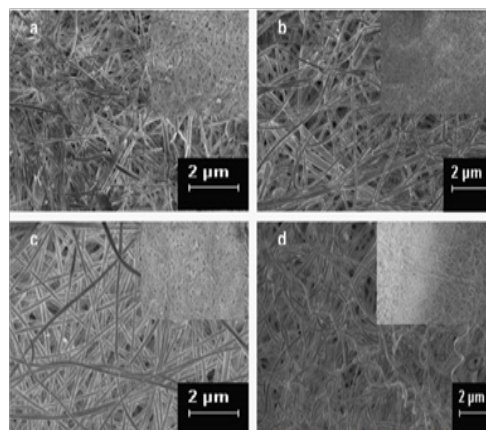
شکل ۷-۱ جذب نوری آ: سولفیدکادمیوم در نانو الیاف ب: سلنیدکادمیوم در نانوالیاف، (۱): ۲٪، (۲): ۳٪، (۳): ۵٪، (۴): ۱۰٪ وزنی.

کوانتوم منجر به افزایش شدت نشر نور می شود. در شکل ۶ در غلظت ۲ درصد قله پهنی مشاهده می کنیم که خاصیت خوبی نیست و این گونه توجیه می شود که در این غلظت، توزیع نقاط کوانتوم در نانوالیاف نامتناسب است [۶]. افزایش میزان نقاط کوانتوم موجب باریک تر شدن طیف جذبی می شود؛ چرا که فعل و انفعالات، توزیع شدن یکنواخت نقاط در نانوالیاف را ارتقا می دهد. عدم تغییر مکان قله با افزایش میزان نقاط کوانتوم نشان می دهد که اثر تحدید کوانتومی از خواص خود نقطه ی کوانتومی است و به میزان آن بستگی ندارد [۵].

برای بررسی ریزساختار نیز از آزمون های میکروسکوپ الکترونی عبوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscopy (SEM)) استفاده شد. چنانچه در شکل ۷ ملاحظه می شود با افزایش غلظت نقاط کوانتوم قطر نانوالیاف زیاد شده و همین طور سطح

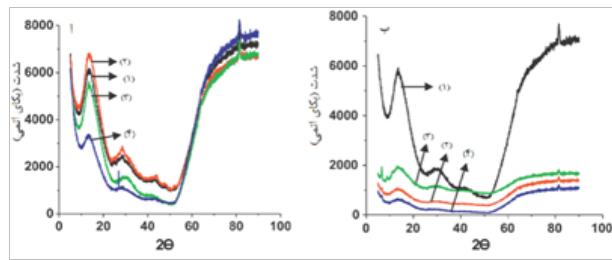


شکل ۷-۲ تصویر آزمون میکروسکوپ الکترون روبشی سلنیدکادمیوم در نانوالیاف a: ۰٪، b: ۲٪، c: ۵٪، d: ۱۰٪ وزنی [۶].



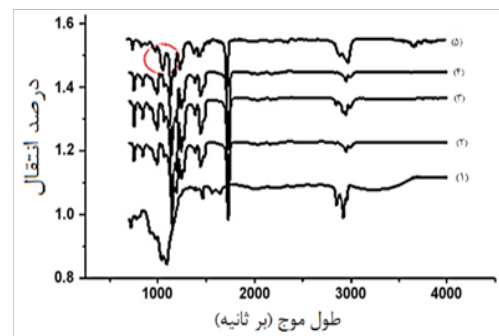
شکل ۷-۱ تصویر آزمون میکروسکوپ الکترون روبشی سولفیدکادمیوم در نانوالیاف a: ۰٪، b: ۲٪، c: ۵٪، d: ۱۰٪ وزنی.

شده است. حضور این قله در هر دو الیاف پر شده با سولفیدکادمیوم و سلنیدکادمیوم نشان می‌دهد که فعل و انفعالات یکسانی بین پلیمر و نقاط کوانتوم صورت می‌گیرد. در شکل ۱۰ تخریب الیاف پلیمری شامل دو مرحله است. اضافه کردن نقاط کوانتوم به نانوالیاف بدون ایجاد تغییر در ساختار، به پایداری حرارتی کمک می‌کند و اضافه شدن نقاط کوانتوم موجب کندشدن روند تخریب و اتفاق افتادن تخریب در دماهای بالاتر می‌شود [۶]. همچنین در مطالعه دیگری اثر غلظت سلنیدکادمیوم در ماتریس پلیمری دیگری بررسی شد که نتایج مشابهی داشت. در این مطالعه از ماتریس پلیمری پلی اتیلن اکسید استفاده و اثر غلظت نقاط کوانتوم با درصدهای ۲،۵ و ۱۰ در آن بررسی شد [۵]. در شکل ۱۱ نشان داده می‌شود که با افزایش غلظت، قطر الیاف افزایش یافته است و از ۴۹۱ نانومتر، برای پلیمر خالص به ۵۵۹ نانومتر می‌رسد. در شکل ۱۲ وجود دو قله بسیار برجسته در محدوده ۱۹ و ۲۵ درجه حضور پلی اتیلن اکساید بلوری را اثبات می‌کند. طیف‌های الیاف بدون نقاط کوانتوم و با نقاط کوانتوم تقریباً یکسان هستند، اگرچه در مورد نمونه ۵ درصد وزنی یک تغییر و جابه‌جایی اتفاق افتاده است ملاحظه می‌شود که با افزایش غلظت نقاط کوانتوم، قله‌های پهن‌تر

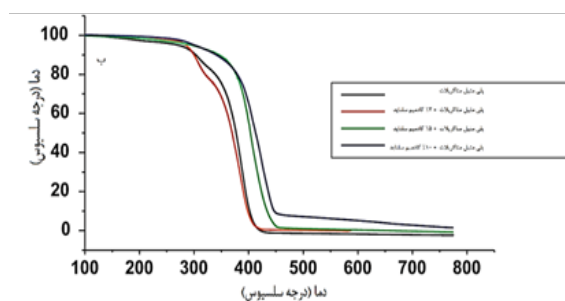
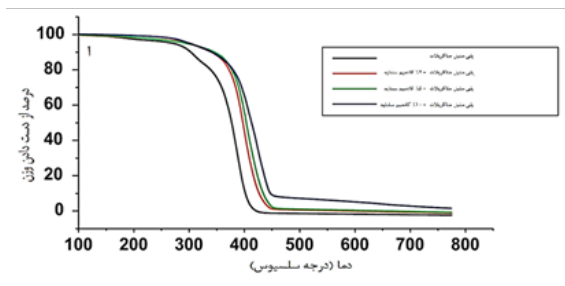


شکل ۸ الگوی تفرق اشعه ایکس آ: سولفیدکادمیوم در نانوالیاف ب: سلنیدکادمیم در نانوالیاف (۱): ۰٪، (۲): ۲٪، (۳): ۵٪ و (۴): ۱۰٪ وزنی [۶]

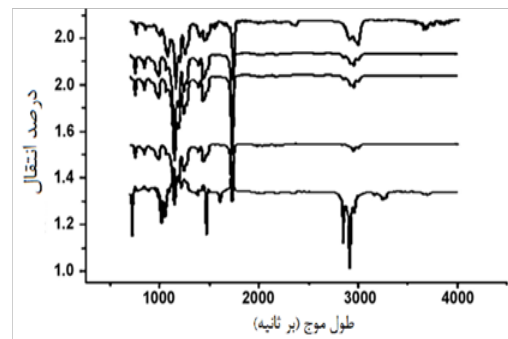
فرایند و واکنش شیمیایی بین نقاط کوانتوم و پلیمر است. شکل‌های ۹-۱ و ۹-۲ نتایج آزمون طیف‌سنجی فروسرخ است که برای غلظت‌های پایین نقاط کوانتوم، طیف فروسرخ شبیه به پلی متیل متاکریلات است؛ در حالی که برای غلظت‌های بالای نقاط کوانتوم، قله‌ای در ۱۰۵۹ ایجاد



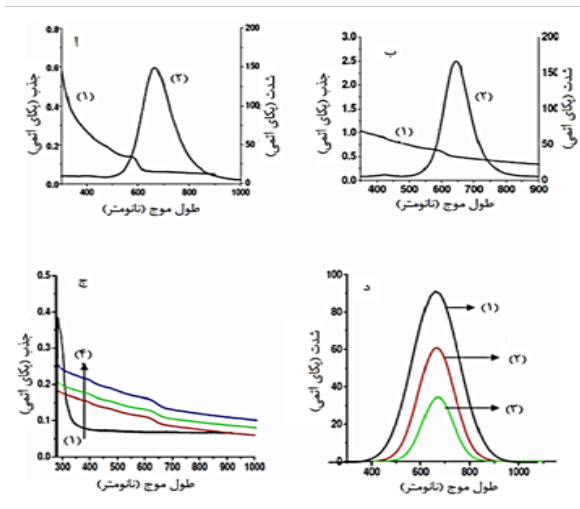
شکل ۹-۱ طیف فروسرخ نانوالیاف حاوی سولفیدکادمیوم، (ii): ۰٪، (iii): ۲٪، (iv): ۵٪ و (v): ۱۰٪ وزنی



شکل ۱۰ آزمون پایداری حرارتی آ: سولفیدکادمیوم در نانو الیاف ب: سلنیدکادمیم در نانوالیاف [۶].



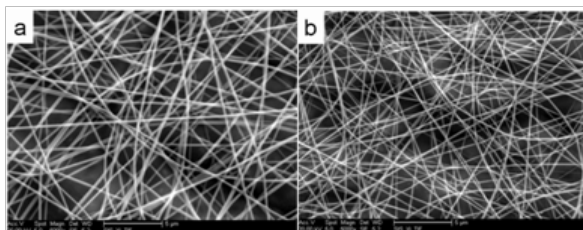
شکل ۹-۲ طیف فروسرخ نانوالیاف حاوی سلنیدکادمیوم، (ii): ۰٪، (iii): ۲٪، (iv): ۵٪ و (v): ۱۰٪ وزنی [۶]



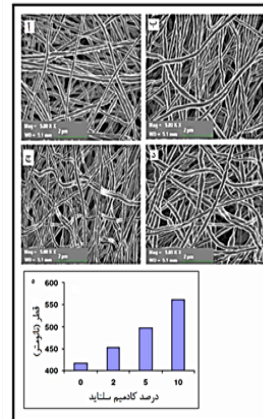
شکل ۱۳ جذب نوری (۱) و فتولومینوسنس (۲)، (آ) سلنیدکادمیوم، (ب) سلنیدکادمیوم داخل پلی اتیلن اکسید، جذب (ج) و نشر (د) (۱): ۰٪، (۲): ۲٪، (۳): ۵٪ و (۴): ۱۰٪ وزنی سلنیدکادمیوم در پلی اتیلن اکسید [۵].

دارند. تغییر در غلظت نقاط کوانتوم در این مطالعه نیز تغییری در مکان قله های جذب و نشر نشان نداده و تنها منجر به افزایش شدت می شود و اثر تحدید کوانتومی مناسب را اثبات می کند.

در شکل ۱۴ نشان داده شده است که با اضافه شدن نقاط کوانتوم به الیاف، قطر الیاف از ۱۹۹ نانومتر به ۱۶۷ نانومتر رسیده است. این پدیده این گونه توجیه می شود که با اضافه شدن نقاط کوانتوم به محلول الکتروریسی، هدایت الکتریکی محلول بالا می رود و بالا رفتن هدایت الکتریکی منجر به کشیدگی بالا در جهت نیروی الکتریکی شده و در نتیجه الیاف باریک تر و صاف تر می شوند.



شکل ۱۴ تصویر آزمون میکروسکوپ الکترون روبشی (a) پلی فیل وینیل خالص، (b) پلی وینیل وینیل با نقاط کوانتوم زینک سولفید [۷].

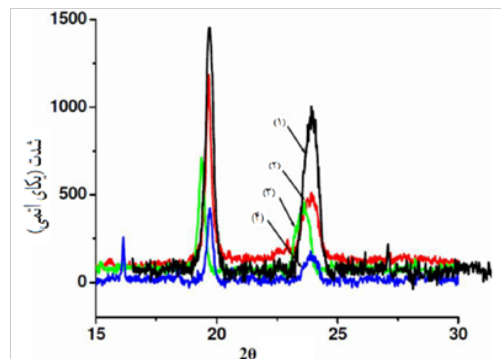


شکل ۱۱ تصویر آزمون میکروسکوپ الکترون روبشی پلی اتیلن اکسید ۳٪ وزنی با آ: ۰٪، ب: ۲٪ و ج: ۵٪ و د: ۱۰٪ وزنی سلنیدکادمیوم، ه: نمودار فراوانی و مقایسه قطر و غلظت سلنیدکادمیوم [۵].

و با شدت کمتر حاصل شده اند. این امر از دست رفتن بلورینگی پلیمر را نشان می دهد و این گونه توجیه می شود که با افزایش غلظت نقاط کوانتومی و در نتیجه قرار گرفتن این مواد در فضاهای خالی لابه لای زنجیر پلیمری بلورینگی از بین خواهد رفت [۵].

در عین حال مطالعاتی نیز وجود دارد که نتیجه اضافه شدن نقاط کوانتوم به نانوالیاف را کاهش قطر الیاف بر شمرده اند [۹].

در شکل ۱۳ مشاهده می شود که جذب و نشر نقاط کوانتوم، زمانی که داخل نانوالیاف قرار می گیرند، به ترتیب ۶ و ۷ نانومتر جابه جایی به سمت رنگ قرمز



شکل ۱۲ الگوی تفرق اشعه ایکس (۱): ۰٪، (۲): ۲٪، (۳): ۵٪ و (۴): ۱۰٪ وزنی سلنیدکادمیوم در پلی اتیلن اکسید [۵].

۳-۴ اثر استوکیومتری بر خواص نانوالیاف

نحوه سنتز نقاط کوانتوم بر خواص نهایی و رفتار نوری آن‌ها اثرگذار است. به‌طورمثال در مورد چگونگی سنتز سلنیدکادمیوم روش‌های متفاوتی ارائه شده است که هر یک از این روش‌ها منجر به ارائه خواص متنوعی شده است، برخی از این روش‌ها عبارتند از [۱۶]:

- سنتز سلنیدکادمیوم در دمای اتاق با روش تزریق با استفاده از استات کادمیوم و سلنوسولفیت سدیم در اولتیک اسید.

- سنتز با روش سونو-شیمیایی با استفاده از استات کادمیوم، تری‌اوکتیل فسفین اکسید و هگزادسیل آمین. استفاده از انواع و طبقه‌های مختلف پلیمر به‌عنوان ماتریس پلیمری نیز منجر به دگرگونی خواص نوری، ساختاری و ریزساختارنقاط کوانتوم سنتز شده می‌شود:
- تولید سلنیدکادمیوم داخل پلی‌استایرن آلت مالئیک‌انیدرید، توسط واکنش در محل و در دما و فشار اتاق.

- سنتز کلویدهای سلنیدکادمیوم با اندازه کنترل‌شده از سلنوسولفیدسدیم داخل محیط آبی پلی‌سولفات سدیم و ژلاتین.
- اصلاح خواص نوری غیرخطی در فنیل پلی‌بوتیل متاکریلات.
- تولید سلنیدکادمیوم پوشانده شده با پلی‌وینیل‌الکل با روش رشد تک مرحله‌ای در شرایط دمای اتاق.
- سنتز سلنیدکادمیوم با استفاده از پلی‌وینیل‌الکل که البته خاصیت انتشار نور ندارد.

همچنین سنتز سلنیدکادمیوم با استفاده از امواج ماکروویو و فوتوشیمی اخیراً متداول شده است [۱۶]. یکی دیگر از عوامل اثرگذار بر تغییر رنگ نقاط کوانتوم، استوکیومتری تولید مواد است [۳].

از آنجایی که اضافه کردن نقاط کوانتوم به ماتریس پلیمری می‌تواند منجر به تغییر خواص نوری نقاط شود، می‌توان از روش سنتز داخل ماتریس پلیمری استفاده کرد. در یکی از مطالعات به منظور بررسی سنتز سلنیدکادمیوم داخل پلی‌متیل متاکریلات، تغییر خواص نانوالیاف و نقاط کوانتوم با تغییر نسبت کادمیوم و سلنیوم بررسی شد. در این روش از پلی‌متیل متاکریلات به‌عنوان ماتریس پلیمری، دی‌متیل‌فرمالید به‌عنوان حلال و کادمیوم استات و سدیم-سلنوسولفیت به ترتیب برای تأمین کادمیوم و سلنیوم استفاده شد [۱۶].

به‌منظور بررسی موضوع، کادمیوم به سلنیوم با نسبت‌های ۱:۱، ۱:۰/۵ و ۱:۰/۲۵ وارد ماتریس پلیمری شد تا با سازوکارواکنش در پلیمر در ماتریس پلیمری

سنتز شوند. تغییر در مقدار کادمیوم و سلنیوم منجر به ایجاد رنگ‌های سبز آبی، سبز زرد و نارنجی تحت نور ماورای بنفش با طول موج ۳۶۵ نانومتر می‌شود.

ملاحظه شد که تفاوت در نسبت موجب تغییر در رنگ می‌شود. در شکل ۱۵ نشان داده شد که انتشار نور از این آماده‌سازی الیاف به نسبت بین کادمیوم و سلنید به‌کاربرده شده و زمان واکنش بستگی دارد. شکل‌های ۱۵-۱، ۱۵-۲ و ۱۵-۳ به ترتیب طیف‌های ماورای بنفش و فتولومینوسنس الیاف پرشده با نسبت‌های ۱:۱، ۱:۰/۵ و ۱:۰/۲۵ را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۵-۱، ۱۵-۲ و ۱۵-۳ مشاهده می‌شود، با تغییر نسبت استوکیومتری، طیف‌های نوری و رنگ دستخوش تغییراتی می‌شود. نسبت ۱:۱ رنگ نارنجی تیره، ۱:۰/۵ سبز مایل به آبی و ۱:۰/۲۵ سبز-زرد منتشر می‌کند [۱۶].

جدول ۱ نشان می‌دهد که جذب نقاط کوانتوم برای مدت ۲۴ ساعت ثابت است؛ اگرچه پس از آن به دلیل رشد ذرات دستخوش تغییرات می‌شود.

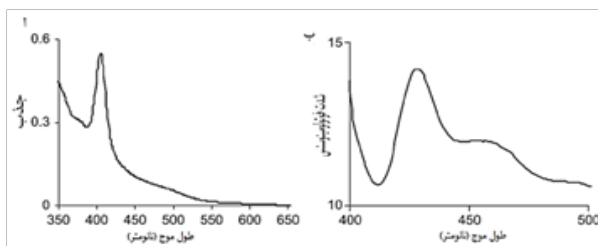
با استفاده از آزمون تفرق اشعه ایکس ساختار مکعبی سلنیدکادمیوم، تأیید می‌شود.

همچنین احتمال شکل‌گیری سولفیدکادمیوم بررسی شد که هیچ جذبی مربوط به آن وجود نداشت.

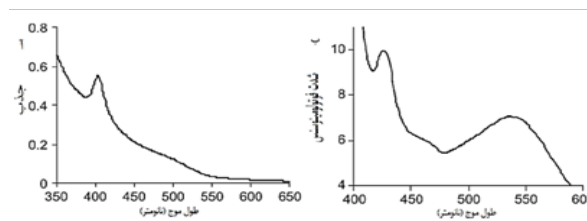
اندازه‌گیری آزمون تفرق اشعه ایکس روی نمونه ۱:۱ انجام گرفت؛ چرا که میزان غیراستوکیومتری سلنیوم منجر به ایجاد قله‌های مربوط به نمک کادمیوم می‌شود که بر اثر کامل نشدن واکنش یون‌های کادمیوم صورت گرفته و خارج کردن یون‌ها از ماتریس پلیمری دشوار است [۱۶].

۵ کاربردهای الیاف الکترونیسی شده بر پایه نقاط کوانتوم

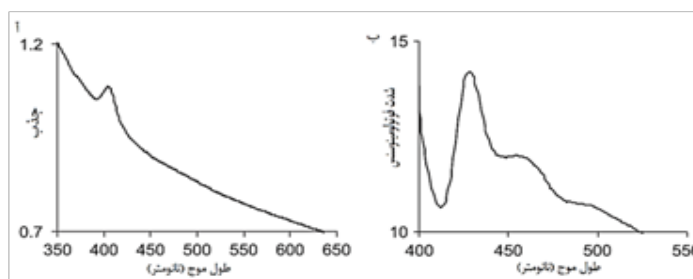
مقالات متعددی در مورد طیف وسیع کاربردهای نانوالیاف بر پایه نقاط کوانتوم هر ساله منتشر می‌شود. از جمله کاربردهای متداول استفاده از این نوع نانوالیاف در حسگرها است. برای مثال در یکی از مطالعات از الیاف پلی‌وینیل استات و نقطه کوانتومی سلنیدکادمیوم برای بررسی رطوبت نسبی استفاده شد. مبنای استفاده از این سامانه به‌عنوان حسگر رطوبت رابطه‌ای خطی بیان شده بود که بین طیف فتولومینوسنس و میزان



شکل ۱۵-۲: طیف ماورای بنفش و ب: طیف فتولومینوسنس سلنیدکادمیوم در پلی متیل متاکریلات با نسبت ۱/۵: ۱ [۱۶].



شکل ۱۵-۱: طیف ماورای بنفش و ب: طیف فتولومینوسنس سلنیدکادمیوم در پلی متیل متاکریلات با نسبت ۱:۱ [۱۶].



شکل ۱۵-۳: طیف ماورای بنفش و ب: طیف فتولومینوسنس سلنیدکادمیوم در پلی متیل متاکریلات با نسبت ۱/۲۵: ۱ [۱۶].

مزایای این دستگاه، مدت زمان اندازه‌گیری قابل قبول (۷۵ ثانیه) و بازگشت‌پذیری سریع و قابلیت اندازه‌گیری رطوبت نسبی در طیف وسیع (۱۰ تا ۹۰ درصد) ذکر شده است [۱۷]. از جمله کاربردهای دیگر این نوع لیاف به عنوان حسگر، اندازه‌گیری میزان اسیدی بودن و گلوکز است [۱۸]. از دیگر کاربردهای متداول سامانه‌های نانوالیاف حاوی نقاط کوانتوم، استفاده در سلول‌های خورشیدی است که بازده تبدیل انرژی بالا از مزایای استفاده از این سامانه است [۱۹]. از کاربردهای جالب دیگر این سامانه ساخت نوعی منسوجات الکترونیکی قابل پوشیدن است [۲۰]. همچنین از دیگر کاربردهای

رطوبت برقرار و دارای رابطه غیرمستقیم بود. سازوکار پیش‌بینی شده محتمل با بررسی طیف رامان و مادون قرمز و تغییر جایگاه پیوندهای کربوکسیلی و هیدروکسیلی به این صورت مطرح شده است که رطوبت نسبی منجر به شکسته شدن برخی از پیوندهای هیدروکسیلی و کربوکسیلی و شکل‌گیری برخی دیگر از این پیوندها در محل تماس نقاط کوانتوم و لیاف می‌شود و منجر به انتقال پروتون از سطح نقاط کوانتوم می‌شود. با انتقال پروتون، چگالی الکترون در سطح نقاط کوانتوم بالا رفته و این امر به عنوان عیب سطحی شمرده شده، در نتیجه شدت فتولومینوسنس را کاهش می‌دهد. از جمله

جدول ۱ میزان طول عمر و مقاومت نقاط کوانتوم در مدت زمان ۲۴ و ۴۸ ساعت [۱۶].

ردیف	نسبت کادمیوم به سلنیوم	λ (abs)	λ (em)	λ (em) FWHM	λ (abs)	λ (abs)
		۳- نمونه تازه	تهیج در ۳۸۰ نانومتر نمونه تازه		۲- ۲۴ ساعت	۱- ۴۸ ساعت
۱	۱:۱	۴۹۰، ۴۰۴	۵۴۴، ۴۶۸، ۴۲۸	۱۰	۴۰۵	۵۳۹
۲	۱:۰/۵	۴۷۵، ۴۰۵	۴۶۰، ۴۲۹	۱۵	-	-
۳	۱:۰/۲۵	۴۹۰، ۴۰۶	۵۰۰، ۴۶۶۵، ۴۳۰	۱۵	۵۳۰	۵۳۰

جالب که در مطالعه دیگری به آن اشاره شده کاربرد الیاف حاوی نقاط کوانتوم در سامانه‌های جلوگیری از جعل اسناد است [۲۱].

۶ نتیجه گیری

استفاده از نانو ساختار نورتاب نیمه هادی در نانوالیاف موجب بهبود خواص نوری در این مواد می شود و امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. رفتار نوری نانوالیاف و حتی ریزساختار آن‌ها که به طور حتم بر رفتار نوری اثرگذار است، از موارد زیادی تأثیر می پذیرد. در این مطالعه به بررسی عواملی چون نحوه ی پخش شدن نقاط کوانتوم در نانوالیاف، غلظت نقاط کوانتوم و نسبت استوکیومتری مول‌های سازنده ی آن‌ها در حین سنتز، پرداخته شد. ملاحظه می شود که از آنجایی که خواص نوری نقاط کوانتوم به اندازه ی ذرات وابسته است،

پخش شدن صحیح آن‌ها در طول لیف و عدم تشکیل توده در رفتار نوری و بازده کوانتومی آن‌ها بسیار موثر است. در حالی که اضافه شدن غلظت، تأثیری در مکان قله طول موج نشر ندارد که نشان می دهد خواص اثر محدودیت کوانتوم (Quantum Confinement Effect) ناشی از اندازه ی ذرات بوده و وابسته به میزان ذرات نیست. همچنین با کم تر شدن میزان غلظت نقاط کوانتوم از محدوده مشخصی، شاهد پهن تر شدن قله های طیف نشری هستیم که این خاصیت نشان می دهد که برای توزیع مناسب نقاط کوانتوم در طول الیاف می بایست از غلظت مناسبی از نقاط کوانتوم استفاده کرد. در نهایت اشاره شد که نحوه ی سنتز و همچنین استوکیومتری مواد به کار رفته در سنتز نقاط کوانتوم، بر رفتار نوری آن‌ها اثرگذار است.

مراجع

1. Agarwal S., Greiner A., Wendorff J. H. "Functional Materials By Electrospinning Of Polymers", *Progress in Polymer Science*, 38, 963-991, **2013**.
2. Camposeo A., Moffa M., Persano L. "Electrospun Fluorescent Nanofibers and Their Application in Optical Sensing. In Electrospinning for High Performance Sensors" *Electrospinning for High Performance Sensors*, 129-155, **2015**.
3. Bera D., Qian L., Tseng T. K., Holloway P. H. "Quantum Dots and Their Multimodal Applications: A Review" *Materials*, 3, 2260- 2345, **2010**.
4. Choi Y. J., Hwang D., Chung H., Kim D. Y., Kim D. "Controlling the Spatial Distribution of Quantum Dots in Nanofiber for Light-harvesting Devices" *NPG Asia Materials*, 7, e202, **2015**.
5. Mthethwa T. P., Moloto M. J., De Vries, A. "Fluorescent CdSe Nanoparticles In Electrospun Polyethylene Oxide (PEO) Nanofibers: Preparation and Characterization" *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 13, 469-474, **2012**.
6. Mthethwa T. P., Moloto M. J., De Vries A., Matabola K. P. "Properties of Electrospun CdS and CdSe Filled Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA) Nanofibers" *Materials Research Bulletin*, 46, 569-575, **2011**.
7. Atabey E., Wei S., Zhang X., Gu H., Yan X., Huang Y. Kucknoor A. S. "Fluorescent Electrospun Polyvinyl Alcohol/ CdSe@ ZnS Nanocomposite Fibers" *Journal of Composite Materials*, 47, 3175-3185, **2013**.
8. Sun Z., Xie Y., Wang C., Sun L., Wang S., Ni, L., Xu G. "Electrospun CdTe NPs Doping Poly (Phenylenevinylene) Composite Nanofibers and Their Optoelectronic Properties" *International Journal of Electrochemical Science*, 8, 11492-11501, **2013**.
9. Wang S., Sun Z., Yan E., Sun L., Huang N., Zang, W. Bai, "X. Spectrum-Control of Poly (p-phenylenevinylene) Nanofibers Fabricated by Electrospinning With Highly Photoluminescent ZnS Quantum Dots" *International Journal of Electrochemical Science*, 9, 549-561, **2014**.
10. Zhou F. L., Gong R. H. "Manufacturing Technologies of Polymeric Nanofibers and Nanofibre Yarns" *Polymer International*, 57, 837-845, **2008**.
11. Zhi-Hua Z., Yun-Ze L., Hong-Xin Y., Bin S., Jie Z., Hong-Di Z., Chang-Zhi, G., "Electrospun Fluorescein/Polymer Composite Nanofibers and Their Photoluminescent Properties" *Chinese Physics B*, 21, 097805- 097810, **2012**.
12. Pisignano D., "Polymer Nanofibers: Building Blocks for Nanotechnology" *Royal Society of Chemistry*, 29, 14245-14254, **2013**.
13. Khanlou H. M., Ang B. C., Talebian S., Barzani M. M., Silakhori M., Fauzi H. "Multi-response Analysis in The Processing of Poly (Methyl Methacrylate) Nanofibres Membrane by Electrospinning Based on Response Surface Methodology: Fibre Diameter and Bead Formation" *Measurement*, 65, 193-206, **2015**.
14. Zareei A., Mashhadi M. M., Heidari I. "An Experimental Investigation on The Effects of Some Parameters on Nanofiber Produced by Electrospinning Method" *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*, 4, 1192-1201, **2014**.
15. Wang P., Xiao Y., Tong, L., "Quantum Dot Doped Polymer Nanofibers for Optical Sensing", *Advanced Materials*, 23, 3770-3774, **2011**.
16. Khanna P. K., More P., Bharate B. G., Vishwanath A. K. "Studies on Light Emitting CdSe Quantum Dots in Commercial Polymethylmethacrylate" *Journal of Luminescence*, 130, 18-23, **2010**.
17. Yunyun Ch., Huan W., Li L., Ting H., Xiao L., Lijie D. "Flexible Photoluminescent Humidity Sensing Material Based on Electrospun PVA Nanofibers Comprising Surface-carboxylated QDs" *Sensors and Actuators B: Chemical*, 284, 258-264, **2019**.
18. Jingjing Y., Peng J., Baoxiu W., Huaping W., Shiyan C., "Color-tunable Luminescent Macromolecules Based on CdTe QDs-loaded Bacterial Cellulose Nanofibers for pH and Glucose Sensing" *Sensors and Actuators B: Chemical*, 254, 110-119, **2018**.
19. Dissanayake M.L., Jaseetharan T., Senadeera G. K. R., Kumari J. M. K. W. "Efficiency Enhancement in PbS/CdS Quantum Dot-sensitized Solar Cells by Plasmonic Ag Nanoparticles" *Journal of Solid State Electrochemistry*, 24, 1-10, **2019**.
20. Kyu S., Jaeho Sh., Mira P., Hak, Y., Dong I., "Transparent Nanofiber Textiles with Intercalated ZnO@graphene QD LEDs for Wearable Electronics" *Composites Part B: Engineering* 130, 70-75, **2017**.
21. Xiaowan L., Yingcheng H., "Luminescent Films Functionalized with Cellulose Nanofibrils/CdTe Quantum Dots for Anti-counterfeiting Applications" *Carbohydrate Polymers*, 203, 167-175, **2019**.

