

تهیه و بررسی خواص نوری نمونه نانوذرات کلوئیدی کربن

مرتضی ساسانی قمصری^{۱*} | اشکان مومنی بیدزرد^۲ | هیونگ هو پارک^۳

۱. پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران
 ۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 ۳. دانشکده مواد و مهندسی، دانشگاه یونسئی کره جنوبی

چکیده

در این تحقیق، نمونه کلوئیدی از نقاط کوانتومی کربنی، با استفاده از فرآیند اکسید کردن سلولز استات با کمک ترکیبات قلیایی و بدون نیاز به ترکیبات پایدارکننده سطحی در محیط آب تهیه شده است. اندازه و شکلواره نقاط کوانتومی بلورین کربن با استفاده از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی عبوری با وضوح بالا مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین خواص نوری این نانو ذرات مورد بررسی نظری و عملی قرار گرفت. مشخص شد ذرات تولید شده دارای ابعاد ۴-۵ نانومتر بوده و ساختار آن‌ها شش وجهی می‌باشد. نتایج تجربی بررسی خواص نوری این ذرات بیانگر وجود خواص لومینسانس نوری مناسب و پایدار با طیف‌های تابشی گسترده‌ای در ناحیه‌های مرئی و مادون قرمز است. تحلیل نظری نتایج تجربی بیانگر آن است که تابش‌های مرئی و مادون قرمز مشاهده شده می‌تواند به ترتیب ناشی از اثر محبوس شدن کوانتومی و اثرات سطحی مرتبط با ترکیبات اکسید باشند.

واژگان کلیدی: کربن، نقاط کوانتومی، فوتولومینسانس نوری، اثر محبوس شدن کوانتومی، اثرات حالت‌های سطحی.

۱ مقدمه

در سال‌های اخیر، نانوذرات کربن با خواص نوری مناسب به دلیل قابلیت‌های کاربری گسترده در دیویدهای گسیل نوری [۱]، لیزرها [۲]، تصویربرداری پزشکی [۳، ۴]، جوهرهای پیرینتری [۴]، فوتوکاتالیست‌ها و سنسورها [۵، ۶] مورد توجه زیادی قرار گرفته است. تاکنون، مطالعات زیادی جهت یافتن دلائل مشاهده طیف نشری نانوذرات کربن در محدوده طول موج‌های نور مرئی و مادون قرمز انجام شده است. اگرچه هنوز ابهاماتی در این زمینه وجود

دارد، ولی اثر محبوس شدن کوانتومی و اثرات سطحی (ناشی از حضور ترکیبات سطحی مختلف) به عنوان مکانیزم‌های اصلی در فرآیند تابش نورهای مرئی و مادون قرمز از نقاط کوانتومی کربن معرفی شده است [۷-۱۴]. نتایج کارهای تحقیقاتی انجام شده بیانگر آن است که نقاط کوانتومی کربن با توزیع اندازه‌ها و ترکیبات سطحی مختلف خواص تابشی متفاوتی از خود نشان داده و بر این اساس از قابلیت کاربری مناسبی جهت استفاده در تجهیزات اپتوالکترونیک و پزشکی برخوردار هستند [۱۸-۹]. از این رو نیاز هست تا تحقیقات بیشتری در زمینه خواص نوری نقاط کوانتومی کربن و یافتن فرآیندهای ممکن در زمینه خواص تابشی آن‌ها انجام شود. هدف اصلی این طرح تحقیق، مطالعه و بررسی خواص نوری نقاط کوانتومی کربن در محیط‌های مایع مانند آب است. برای تولید نانو ذرات کلوئیدی کربن روش‌های مختلفی توسط محققین ارائه شده است. بر این اساس، یک نمونه کلوئیدی از نانوذرات کربن با اندازه‌های کمتر از ۱۰ نانومتر با استفاده از فرآیند اکسید کردن سلولز استات با کمک ترکیبات قلیایی و بدون نیاز به ترکیبات پایدارکننده سطحی در محیط مایع آب با بازدهی مناسبی انجام شده است [۱۰]. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که انجام فرآیند شیمیایی فوق سبب تولید نقاط کوانتومی کربن با ابعاد ۴-۵ نانومتر و با لایه‌های پایدارکننده اکسید سطحی شده است. به منظور بررسی مکانیزم‌های ممکن در زمینه فرآیندهای تابشی، خواص نوری کلوئید نقاط کوانتومی کربن شامل طیف‌های جذبی (UV-visible) و فوتولومینسانس (PL) در طول موج‌های برانگیختگی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل بیانگر آن است که کلوئید نقاط کوانتومی کربن در محیط آب خواص لومینسانس نوری با طیف‌های تابشی گسترده‌ای در ناحیه‌های مرئی و مادون قرمز

شده است که در نتیجه آن یک نمونه کلوئیدی از نانوذرات کربن (با رنگ زرد ملایم) تهیه شده است. بعد از انجام مراحل فوق و انحلال تقریباً کامل مواد اولیه، نمونه کلوئیدی حاصل به مدت زمان تقریباً ۱۵-۱۰ دقیقه درون دستگاه التراسونیک قرار داده شده است. در مرحله پایانی، مقداری از نمونه کلوئیدی حاصل درون دستگاه سانتریفیوژ قرار داده شده (به مدت زمان ۱۵ دقیقه و با سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه) و پس از آن قسمت تقریباً شفاف فوقانی لوله سانتریفیوژ جداسازی شده است که حاوی کلوئیدی از نانوذرات کربن با مقدار غلظت تقریباً $1/25 \pm 8/75$ میلی گرم بر میلی لیتر می باشد.

۳ نتایج و بحث

در شکل ۱ شاهد نتایج بررسی خواص نوری نمونه کلوئیدی نانو ذرات کربن هستیم، در این شکل طیف جذبی فرابنفش- مرئی و طیف های فوتولومینسانس نمونه کلوئیدی نقاط کوانتومی کربن در آب که با طول موج های مختلف برانگیخته شده اند دیده می شوند. شکل (۱ الف) طیف جذب فرابنفش- مرئی حاصل از کلوئید نقاط کوانتومی کربن در دمای اتاق را نشان می دهد همینطور عکس نمونه کلوئیدی نانوذرات کربن نیز ملاحظه می شود. این طیف، شامل یک دنباله جذبی بلند با آهنگ افزایشی ملایم در بازه طول موجی ۸۰۰ نانومتر ($1/55 eV$) تا تقریباً ۳۵۰ نانومتر ($3/54 eV$) و یک افزایش ناگهانی در آهنگ جذب از طول موج تقریباً ۳۵۰ نانومتر است. مطابق شکل (۱ الف)، یک بیشینه جذبی گسترده در ناحیه طول موجی ۲۷۰-۲۵۰ نانومتر (با بیشینه طول موجی ۲۶۵ نانومتر) مشاهده شده است که مربوط به فرآیند گذارهای $n-\pi^*$ انجام شده در گروه های کربونیل ($C=O$) واقع بر سطح نقاط کوانتومی کربن است [۱۷، ۱۸]. همچنین، بیشینه جذبی در محدوده طول موج تقریباً ۲۲۰ نانومتر مشاهده شد که ناشی از گذارهای $n-\pi^*$ در باند $C=C$ می باشد [۶، ۱۹]. طیف های فوتولومینسانس کلوئید نقاط کوانتومی کربن (شکل ۱ ب) وجود تابش های مرئی با شدت بالا را در اثر برانگیختگی با طول موج های مختلف در بازه ۵۰۰-۳۰۰ نانومتر نشان می دهد. شایان ذکر است، طیف های فوتولومینسانس ارائه شده در این شکل نسبت به شدت های نور تحریکی یکسان در طول موج های برانگیختگی مختلف نرمالیزه شده اند. از این رو می توان گفت که بیشینه شدت تابشی مشاهده شده از کلوئید مربوط به زمانی است که با طول موج ۳۲۰ نانومتر برانگیخته شده است. افزون بر

از خود نشان می دهد. بررسی نتایج تجربی بیانگر این موضوع است که تابش های مرئی و مادون قرمز مشاهده شده از کلوئید نقاط کوانتومی کربن می تواند به ترتیب ناشی از اثر محبوس شدن کوانتومی و اثرات سطحی مرتبط با ترکیبات اکسید باشد.

۲ بخش تجربی

مواد و تجهیزات

مشخصات ساختاری و خواص نوری نمونه کلوئیدی تهیه شده از نقاط کوانتومی کربن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری با وضوح بالا ساخت شرکت فیلیپس موجود در دانشگاه یونسئی کره جنوبی مورد مطالعه قرار گرفت. خواص نوری نمونه تولید شده با استفاده از طیف سنج نوری محدوده مرئی تا ماورای بنفش دستگاه طیف سنجی Perkin-Elmer بررسی شد. فوتولومینسانس نوری در حالت های پایدار و در برگیرنده زمان توسط دستگاه (Varian Cary Eclipse Fluorescence Spectrophotometer) مورد مطالعه قرار گرفته است.

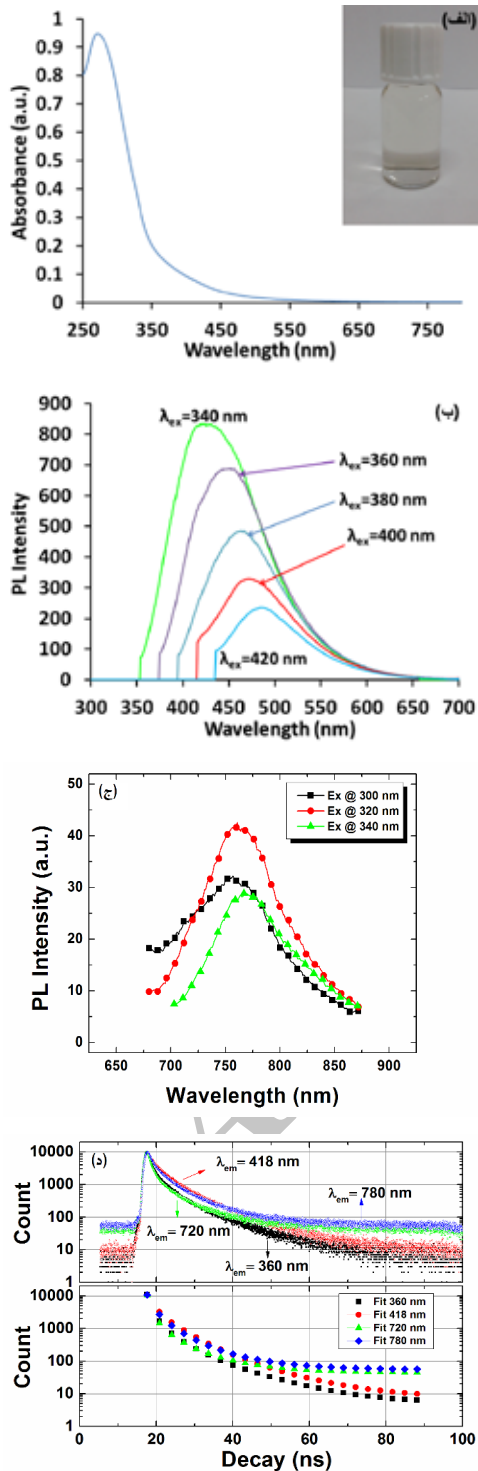
روش آزمایش

فرآیند ساخت نمونه کلوئیدی نقاط کوانتومی کربن

در این کار تحقیقاتی تولید یک نمونه کلوئیدی از نقاط کوانتومی کربن در محیط آب با استفاده از یک روش شیمیایی با بازدهی مناسب و بر اساس فرآیند پایین به بالا انجام شده است [۱۰]. این فرآیند به دلیل سادگی و یک مرحله ای بودن و همچنین عدم نیاز به شرایط خاص آزمایشگاهی و ترکیبات شیمیایی مختلف جهت تولید کلوئید پایدار نقاط کوانتومی کربن مفید و مؤثر است. در مرجع [۱۰] فرآیند در دمای نسبتاً بالای ۳۰۰ درجه سانتیگراد استفاده شده و از چگونگی کنترل فرآیند در این دما صحبتی به میان نیامده است. لذا در این تحقیق دما تا نصف میزان قبلی کاهش داده شد و با کنترل فرآیند، نمونه تهیه شد. به منظور انجام این فرآیند، تجهیزات آزمایشگاهی و مواد اولیه مورد نیاز (مانند سلولز استات، سدیم هیدروکسید و ...) خریداری شده است.

نخست، مقدار ۱ گرم از ماده سلولز استات به همراه ۱ گرم سدیم هیدروکسید درون ۲۰۰ میلی لیتر آب مقطر حل شده و به مدت تقریباً ۲ ساعت با استفاده از همزن ترکیب شده است. پس از آن ترکیب فوق به مدت زمان تقریباً ۱ ساعت در دمای $150^{\circ}C$ نگهداری

است که مقادیر طول عمر زمانی میانگین بدست آمده در این کار در مقایسه با سایر مقادیر گزارش شده از نانوذرات کربن نسبتاً بیشتر است که این مشخصه، نمونه تهیه شده از نقاط کوانتومی



شکل ۱ (الف) طیف جذبی فرابنفش - مرئی و (ب) طیف‌های فوتولومینسانس (ج) طیف‌های تابشی در ناحیه مادون قرمز نزدیک. (د) منحنی‌های واپاشی زمانی طیف‌های فلورسانس.

این، با افزایش طول موج برانگیختگی به سمت ۵۰۰ نانومتر مکان بیشینه طیف فوتولومینسانس از ۴۰۰ نانومتر به ۵۵۰ نانومتر انتقال به قرمز پیدا کرده و بیشینه شدت‌های تابشی متناظر نیز (مشابه رفتار طیف جذبی) کاهش یافته است. طیف‌های فوتولومینسانس نرمالیزه شده از کلئید نقاط کوانتومی کربن، تابش‌های نوری مناسب با قابلیت کوک پذیری در محدوده گسترده‌ای از طیف مرئی (بازه ۴۰۰-۵۵۰ نانومتر) را نشان می‌دهند. کوک پذیری در اینجا به معنای تغییر در طیف گسیل نمونه در اثر تغییری در طیف تحریک آن می‌باشد. چنانچه نمونه، داری خواص کوک پذیری بوده باشد، می‌توان از آن برای تولید انواع مختلفی از طیف‌های گسیل نوری در حالتی که نه اندازه و نه خواص سطحی آن‌ها تغییر کرده باشد بهره جست که این ویژگی بسیار مهمی در حوزه نانوفتونیک محسوب می‌گردد. این قابلیت کوک پذیری در خواص تابشی می‌تواند ناشی از اثر محبوس شدن کوانتومی در نانوذرات کربن باشد [۱۰، ۱۴]. در واقع، این امر را می‌توان ناشی از توزیع اندازه نقاط کوانتومی کربن دانست، زیرا در طول موج‌های برانگیختگی بیشتر، تنها ذرات بزرگ‌تر که دارای گاف انرژی کوچک‌تری هستند در فرآیند گسیل نور سهیم می‌شوند. بطور مشابه، در طول موج‌های برانگیختگی کمتر بیشینه تابشی طیف فوتولومینسانس مربوط به سهم نقاط کوانتومی کربن کوچک‌تر موجود در کلئید است. این نتایج بیانگر آن است که نقاط کوانتومی کربن نقش موثری را در جذب نور در فرآیند فوتولومینسانس کلئید ایفا می‌کنند. در شکل (۱ ج) طیف‌های تابشی نسبتاً ضعیف واقع در ناحیه مادون قرمز نزدیک ناشی از برانگیختگی کلئید نقاط کوانتومی کربن را می‌توان مشاهده کرد. در قسمت (۱ د) همان شکل منحنی‌های واپاشی زمانی طیف‌های فلورسانس کلئید اولیه از نقاط کوانتومی کربن مشاهده می‌شود. این منحنی‌های واپاشی زمانی با استفاده از تابع نمایی سه تایی مطابقت داده شده و بر این اساس مقادیر طول عمر زمان میانگین در هر یک از این بیشینه‌های تابشی محاسبه شده است که نتایج آن در جدول ۱ مشاهده می‌شود. مطابق این نتایج، ماهیت چند نمایی منحنی‌های واپاشی زمانی بیانگر تشکیل حالت‌های انرژی گسترده است که در نتیجه حضور ترکیبات سطحی کربونیل ایجاد شده است [۶، ۷]. گزارشات انجام شده حاکی از آن است که فرآیند گذار الکترونی از این حالت‌های سطحی می‌تواند سبب تولید تابش‌های فوتولومینسانس در ناحیه‌های آبی و مادون قرمز از نقاط کوانتومی کربن شود [۶، ۷، ۹]. اشاره به این نکته ضروری

جدول ۱ داده‌های بدست آمده برای محاسبه طول عمر زمان واپاشی نمونه‌های کربن.

λ em(nm)	τ_1 (ns)	A_1 (%)	τ_2 (ns)	A_2 (%)	τ_3 (ns)	A_3 (%)	$\tau_{average}$ (ns)
۳۶۰	۴/۰۱	۴۲/۳	۱۲/۰۲	۲۱/۴۵	۰/۹۷	۳۶/۲۵	۸/۲۴
۴۱۸	۱۲/۵۴	۲۱/۱۵	۵/۰۹	۵۳/۲۶	۱/۵۳	۲۵/۵۹	۸/۲۸
۷۲۰	۳/۷۵	۳۸/۵۵	۰/۹۱	۳۸/۲۳	۱۱/۲۸	۲۳/۲۲	۸
۷۸۰	۱۲/۳۸	۲۱/۲	۴/۵۷	۴۹/۸۸	۱/۲۹	۲۸/۹۲	۸/۲۲

طیف فوتولومینسانس حاصل از کلوئید نقاط کوانتومی کربن نیست. در واقع، حضور لایه اکسید در سطح نقاط کوانتومی کربن (ترکیبات C=O) می‌تواند سبب تشکیل مراکز تابشی برای انجام فرآیند بازترکیب الکترون-حفره شده و در نتیجه منجر به گسیل تابش‌های مادون قرمز مشاهده شده از کلوئید نقاط کوانتومی کربن گردد. تابش‌های مادون قرمز در انرژی‌های برانگیختگی بیشتر از گاف انرژی نقاط کوانتومی کربن زمانی رخ می‌دهد که فرآیند فوتولومینسانس با تحریک و برانگیختگی حامل‌های بار درون هسته نقاط کوانتومی کربن آغاز شود. سپس، این حامل‌های بار برانگیخته می‌توانند به گروهی از ترازهای سطحی جایگزیده نزدیک به نوار رسانش منتقل شده و از آن جا با انجام گذارهای تابشی به نوار ظرفیت و یا ترازهای سطحی جایگزیده نزدیک به نوار ظرفیت سبب ایجاد تابش‌های مادون قرمز شوند [۹]. بنابراین اینگونه به نظر می‌رسد که در محدوده طول موج برانگیختگی نزدیک به گاف انرژی نقاط کوانتومی کربن، طیف‌های فوتولومینسانس نوری مشاهده شده از کلوئید ناشی از هر دو فرآیندهای اثر محبوس شدن کوانتومی و نیز اثرات حالت‌های سطحی مربوط به ترکیبات اکسیژن هستند. افزون بر این، جهت مطالعه و بررسی توزیع اندازه و ساختار بلورین نقاط کوانتومی کربن تولید شده از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی عبوری با وضوح بالا استفاده شده است. شکل (۲ الف) تصویر TEM نمونه کلوئیدی از نقاط کوانتومی کربن در آب را نشان می‌دهد. بر اساس این تصویر، نقاط کوانتومی کربن کروی شکل با توزیع اندازه‌های تقریباً ۵-۴ نانومتر مشخصه یابی شده است. به منظور بررسی ساختار بلورین نقاط کوانتومی کربن، تصویر HR-TEM تهیه شده با استفاده از روش پردازش تصویر بررسی شده و بر این اساس طرح پراش الکترونی ناحیه انتخاب شده (SAED) فراهم آمده است. شکل (۲ ب) صفحات شبکه‌ای (۱۰۰) از نانوبلورهای کربن با فواصل صفحه ای متناظر ۲/۱۲ آنگستروم (Å) را به وضوح نشان می‌دهد که بیانگر تشکیل نقاط کوانتومی بلورین کربن با ساختار شش وجهی است [۶]. افزون بر این، پایداری نمونه کلوئیدی نقاط کوانتومی کربن در محیط آب با استفاده از طیف‌های جذبی فرابنفش-مرئی و فوتولومینسانس بررسی شده است. شکل (۳ الف)، مقایسه طیف‌های جذبی کلوئید اولیه از نقاط کوانتومی کربن را پس از گذشت مدت

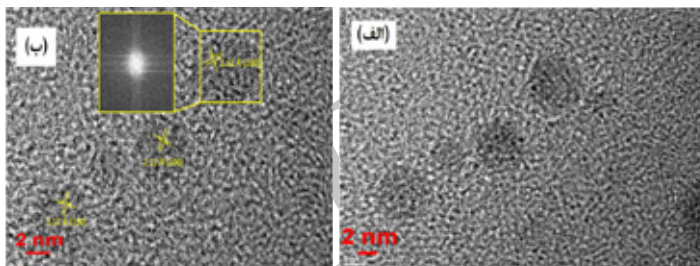
کربن را به عنوان گزینه مناسبی برای پروب‌های نوری جهت کاربردهای پزشکی معرفی می‌نماید [۷، ۲۰]. در جدول ۱ نتایج مربوط به طول عمر زمانی منحنی‌های واپاشی را نشان می‌دهد. منحنی‌های واپاشی زمانی طیف‌های فلورسانس کلوئید نقاط کوانتومی کربن با استفاده از تابع نمایی سه تایی $I(t) = A_1 e^{-t/\tau_1} + A_2 e^{-t/\tau_2} + A_3 e^{-t/\tau_3}$ مطابق داده شده و بر اساس رابطه $\tau_{average} = \frac{\sum A_i \tau_i^2}{\sum A_i \tau_i}$ مقادیر طول عمر زمان میانگین در هر یک بیشینه‌های تابشی زیر محاسبه شده است. طول موج برانگیختگی ۳۰۰ نانومتر است. همانطور که در شکل (۱ ج) نشان داده شده است، طیف‌های فوتولومینسانس نسبتاً ضعیف با بیشینه‌های تابشی واقع در ناحیه مادون قرمز نزدیک (بیشینه طول موجی ۷۷۵ نانومتر) نیز از کلوئید اولیه از نقاط کوانتومی کربن در محدوده طول موج‌های برانگیختگی ۳۴۰-۳۰۰ نانومتر مشاهده شده است. لازم به ذکر است، این بازه طول موج برانگیختگی در نزدیکی محدوده گاف انرژی نقاط کوانتومی کربن قرار گرفته است، جایی که یک افزایش ناگهانی در آهنگ جذب کلوئید از طول موج تقریباً ۳۵۰ نانومتر مشاهده شده است (شکل ۱ الف). این تابش‌های مادون قرمز مشاهده شده را نمی‌توان به سادگی بر اساس مدل محبوس شده کوانتومی برای نقاط کوانتومی کربن با توزیع اندازه‌های بزرگ‌تر توجیه کرد. دلیل این امر آن است که این نانوذرات کربن احتمالی با اندازه‌های بزرگ‌تر قابلیت برانگیختگی با طول موج‌های بیشتر را دارند و این در حالی است که این تابش‌های مادون قرمز در طول موج‌های برانگیختگی ۵۰۰-۳۶۰ نانومتر مشاهده نشده‌اند. افزون بر این، باید به این نکته توجه کرد که تابش‌های مادون قرمز مشاهده شده در طیف فوتولومینسانس با تغییر طول موج برانگیختگی جابه جایی قابل ملاحظه‌ای انجام نداده است. این موضوع تأییدی بر آن است که اثر محبوس شدن کوانتومی تنها مکانیزم ممکن برای این بیشینه‌های تابشی مشاهده شده در

همچنین، شکل (۳ ب) مقایسه طیف‌های فوتولومینسانس حاصل از نمونه کلئیدی تازه تهیه شده و نمونه کلئیدی پس از گذشت مدت زمان شش ماه را در طول موج برانگیختگی ۳۴۰ نانومتر به تصویر می‌کشد. این نتایج بیان کننده آن است که خواص نوری کلئید نقاط کوانتومی کربن در محیط آب از پایداری مناسبی جهت کاربردهای مختلف در زمینه‌های اپتوالکترونیک و به ویژه در پزشکی برخوردار است. استفاده از کلئید نقاط کوانتومی کربن با خواص لومینسانس نوری مناسب و پایدار در ناحیه‌های مرئی و مادون قرمز، می‌تواند در صنعت الکترونیک، دیودهای گسیل نوری و صفحات نمایش حائز اهمیت باشد. همچنین، بواسطه خواص سازش پذیری کربن با بدن انسان، این کلئید گزینه مناسبی جهت کاربردهای بیولوژیکی و به ویژه تصویربرداری پزشکی است که می‌تواند در این زمینه مورد مطالعه قرار گیرد.

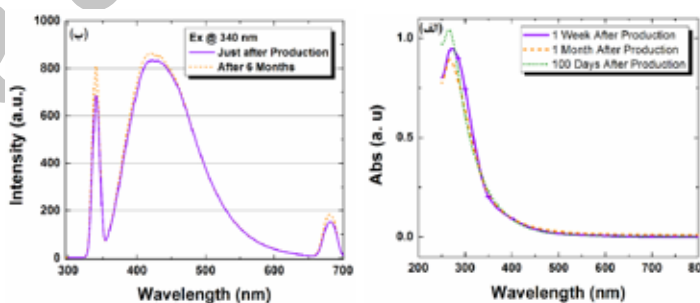
۴ نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با استفاده از یک فرآیند تک مرحله‌ای شیمیایی ساده، نقاط کوانتومی کربن با ابعاد ۴-۵ نانومتر و با لایه‌های اکسید سطحی در محیط آب ساخته شده است. خواص نوری کلئید نقاط کوانتومی کربن حاصل مورد مطالعه قرار گرفته و تابش‌های نوری مناسب با قابلیت کوک پذیری در گسترده‌ای از طیف مرئی (بازه ۴۰۰-۵۵۰ نانومتر) ناشی از برانگیختگی در ناحیه طول موجی ۳۰۰-۵۰۰ نانومتر مشاهده شده است. افزون بر این، در ناحیه طول موج‌های برانگیختگی نزدیک به محدوده گاف انرژی نقاط کوانتومی کربن (بازه ۳۴۰-۳۰۰ نانومتر)، طیف‌های فوتولومینسانس نوری نسبتاً ضعیفی با قله‌های تابشی واقع در ناحیه مادون قرمز نزدیک (بیشینه طول موجی ۷۷۵ نانومتر) نیز از کلئید نقاط کوانتومی کربن مشاهده شده است. بررسی نتایج تجربی نشان می‌دهد که تابش‌های مرئی و مادون قرمز مشاهده شده از کلئید نقاط کوانتومی کربن می‌تواند به ترتیب ناشی از اثر محبوس شدن کوانتومی و اثرات سطحی مرتبط با ترکیبات اکسید باشد. مقایسه طیف‌های فوتولومینسانس حاصل از نمونه تهیه شده در زمان‌های مختلف پس از تولید، بیان کننده آن است که خواص نوری کلئید نقاط کوانتومی کربن در محیط آب از پایداری مناسبی (حداقل ۶ ماه) جهت کاربردهای مختلف در زمینه‌های اپتوالکترونیک و به ویژه تصویربرداری پزشکی برخوردار است.

زمان‌های ۳۰ و ۱۰۰ روز از زمان تولید نشان می‌دهد. مطابق این شکل، طیف جذبی کلئید تازه تهیه شده (نمودار پیوسته) پس از مدت زمان ۱۰۰ روز (نمودار نقطه چین) تقریباً بدون تغییر باقی مانده که این موضوع بیان کننده پایداری نمونه کلئیدی حاصل است. دلیل این امر را می‌توان ناشی از تشکیل باندهای اکسید سطحی پایدار کننده در سطح نقاط کوانتومی کربن جهت جلوگیری از بهم پیوستگی آن‌ها دانست.



شکل ۲ الف) تصویر HR-TEM از کلئید نقاط کوانتومی کربن در محیط آب. ب) صفحات شبکه‌ای (۱۰۰) نانوبلورهای کربن با فواصل صفحه‌ای متناظر ۲/۱۲ آنکستروم (چاقوب زرد رنگ، طرح SAED را نشان می‌دهد که بیانگر تشکیل نقاط کوانتومی بلورین کربن با ساختار شش وجهی است).



شکل ۳ الف) طیف‌های جذبی کلئید نقاط کوانتومی کربن پس از گذشت مدت زمان‌های ۳۰ و ۱۰۰ روز از زمان تولید. ب) طیف‌های فوتولومینسانس حاصل از نمونه کلئیدی تازه تهیه شده از نقاط کوانتومی کربن و نمونه کلئیدی پس از گذشت مدت زمان شش ماه در طول موج برانگیختگی ۳۴۰ نانومتر.

مراجع

- [1] F. Wang, Y. h. Chen, C. Y. Liu, and D. G. Ma, "White light-emitting devices based on carbon dots' electroluminescence", *Chem. Commun.*, vol. 47, pp. 3502-3504, 2011.
- [2] W. Zhang, H. Zhu, S. Yu, and H. Yang, "Observation of lasing emission from carbon nanodots in organic solvents", *Adv. Mater.*, vol. 24, pp. 2263-2267, 2012.
- [3] J. Wang, F. Peng, Y. Lu, Y. Zhong, S. Wang, M. Xu, X. Ji, Y. Su, L. Liao, and Y. He, "Large-Scale Green Synthesis of Fluorescent Carbon Nanodots and Their Use in Optics Applications", *Adv. Optical Mater.*, vol. 3, pp. 103-111, 2015.
- [4] S. Zhu, Q. Meng, L. Wang, J. Zhang, Y. Song, H. Jin, K. Zhang, H. Sun, H. Wang, and B. Yang, "Highly photoluminescent carbon dots for multicolor patterning, sensors, and bioimaging", *Angew. Chem.*, vol. 125, pp. 4045-4049, 2013.
- [5] J. Lei, L. Yang, D. Lu, X. Yan, C. Cheng, Y. Liu, L. Wang, and J. Zhang, "Carbon Dot-Incorporated PMO Nanoparticles as Versatile platforms for the Design of Ratiometric Sensors, Multichannel Traceable Drug Delivery Vehicles, and Efficient Photocatalysts", *Adv. Optical Mater.*, vol. 3, pp. 57-63, 2015.
- [6] H. Nie, M. Li, Q. Li, S. Liang, Y. Tan, L. Sheng, W. Shi, and S. X.-A. Zhang, "Carbon Dots with Continuously Tunable Full-Color Emission and Their Application in Ratiometric pH Sensing", *Chem. Mater.*, vol. 26, pp. 3104-3112, 2014.
- [7] H. Li, Z. Kang, Y. Liu, and S.-T. Lee, "Carbon nanodots: synthesis, properties and applications", *J. Mater. Chem.*, vol. 22, pp. 24230-24253, 2012.
- [8] X. T. Zheng, A. Ananthanarayanan, K. Q. Luo, and P. Chen, "Glowing Graphene Quantum Dots and Carbon Dots: Properties, Syntheses, and Biological Applications", *Small*, vol. 11, pp. 1620-1636, 2012.
- [9] L. Bao, C. Liu, Z.-L. Zhang, and D.-W. Pang, "Photoluminescence-Tunable Carbon Nanodots: Surface-State Energy-Gap Tuning", *Adv. Mater.*, vol. 27, pp. 1663-1667, 2015.
- [10] W. Zhang, D. Dai, X. Chen, X. Guo, and J. Fan, "Red shift in the photoluminescence of colloidal carbon quantum dots induced by photon reabsorption", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, pp. 091902, 2014.
- [11] M. Wu, Y. Wang, W. Wu, C. Hu, X. Wang, J. Zheng, Z. Li, B. Jiang, and J. Qiu, "Preparation of functionalized water-soluble photoluminescent carbon quantum dots from petroleum coke", *Carbon*, vol. 78, pp. 480-489, 2014.
- [12] F. Li, G. Wang, H. Li, Y. Li, and S. Zhou, "One-pot solvothermal synthesis of highly photoluminescent carbon nanoparticles and their photocatalytic application", *Mater. Lett.*, vol. 122, pp. 352-354, 2014.
- [13] Y. Q. Zhang, D. K. Ma, Y. Zhuang, X. Zhang, W. Chen, L. L. Hong, Q. X. Yan, K. Yu, and S. M. Huang, "One-pot synthesis of N-doped carbon dots with tunable luminescence properties", *J. Mater. Chem.*, vol. 22, pp. 16714-16718, 2012.
- [14] Y. P. Sun, B. Zhou, Y. Lin, W. Wang, K. A. S. Fernando, P. Pathak, M. J. Meziani, B. A. Har-ruff, X. Wang, H. Wang, P. G. Luo, H. Yang, M. E. Kose, B. Chen, L. M. Veca, and S. Y. Xie, "Quantum-Sized Carbon Dots for Bright and Colorful Photoluminescence", *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 128, pp. 7756-7757, 2006.
- [15] H. Yan, M. Tan, D. Zhang, F. Cheng, H. Wu, M. Fan, X. Ma, and J. Wang, "Development of multicolor carbon nanoparticles for cell imaging", *Talanta*, vol. 108, pp. 59-65, 2013.
- [16] K. Bagga, R. McCann, M. Wang, A. Stalcup, M. Vázquez, and D. Brabazon, "Laser assisted synthesis of carbon nanoparticles with controlled viscosities for printing applications", *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 447, pp. 263-268, 2014.
- [17] L. Shi, X. Li, Y. Li, X. Wen, J. Li, M. M. F. Choi, C. Dong, and S. Shuang, "Naked oats-derived dual-emission carbon nanodots for ratiometric sensing and cellular imaging", *Sens. Actuators, B*, vol. 210, pp. 533-541, 2015.
- [18] Q. Liang, W. Ma, Y. Shi, Z. Li, and X. Yang, "Easy synthesis of highly fluorescent carbon quantum dots from gelatin and their luminescent properties and applications", *Carbon*, vol. 60, pp. 421-428, 2013.
- [19] G. Oza, M. Ravichandran, V-I. Merupo, S. Shinde, A. Mewada, J.T. Ramirez, S. Velumani, M. Sharon, and M. Sharon, "Camphor-mediated synthesis of carbon nanoparticles, graphitic shell encapsulated carbon nanocubes and carbon dots for bioimaging", *Sci. Rep.*, vol. 6, 21286, 2016.
- [20] H. Li, H. Ming, Y. Liu, H. Yu, X. He, H. Huang, K. Pan, Z. Kang, S.-T. Lee, "Fluorescent carbon nanoparticles: electrochemical synthesis and their pH sensitive photoluminescence properties", *New J. Chem.*, vol. 35, pp. 2666-2670, 2011.

Preparation and Optical Characterization of Colloidal Carbon Quantum Dots

M. Sasani Ghamsari^{1*} | A. Momeni Bidzard² | H.H. Park³

1.Lasers & Optics Research School, NSTRI, Tehran, Iran

2.Department of Physics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3.Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

Abstract

This paper presents optical properties of colloidal carbon quantum dots (C-QDs) in distilled water produced by using a method of alkali-assisted surfactant-free oxidation of cellulose acetate. The formation of colloidal carbon nanocrystals with the size range of $\sim 4\text{-}5$ nm was confirmed by using high-resolution transmission electron microscopy. The photoluminescence (PL) properties of the colloid were investigated at different applied excitation wavelengths and we observed a wide range of tunable visible to near-infrared (NIR) emissions with good stability from the C-QD colloid. A detailed analysis of the results shows that the visible and NIR luminescent properties of the colloidal C-QDs can be attributed to the mechanisms of quantum confinement and surface effects, respectively.

Keywords

Carbon, Quantum dots, Photoluminescence, Quantum confinement effect, Surface effects.