

ORIGINAL ARTICLE

Investigating Optical and Structural Properties of Carbon Quantum Dots Synthesized from Orange Peel by Hydrothermal Assisted-Green Method

Rostam Moradian^{1*}, Zahra Eskandari Ghaleh², Masome Naseri Tekyeh³

1 Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Razi University Razi University, Kermanshah, Iran.

1 MSc. Student, Department of Physics, Faculty of Science, Razi University Razi University, Kermanshah, Iran.

2 Ph.D. Student in Condensed Matter Physics, Department of Physics, Faculty of Science, Malayer University, Malayer, Iran.

Correspondence

Rostam Moradian

Email: moradian.rostam@gmail.com

How to cite

Moradian, R. Eskandari Ghaleh, Z. Naseri Tekyeh, M. (2024). Investigating Optical and Structural Properties of Carbon Quantum Dots Synthesized from Orange Peel by Hydrothermal Assisted-Green Method, Optoelectronic, 6(4), 27-34.

ABSTRACT

Quantum dots successfully synthesized from orange peel by the hydrothermal-assisted green method. The results of the XRD analysis show that our sample has quantum dots peaks. From the EDAX analysis, we found that the carbon structure is formed with a weight percentage of 66%. The presence of the oxygen element is due to the existence of functional groups, which indicates the activation of the surface of the quantum dots, these functional groups (hydroxyl and depoxy) also observed in the FTIR analysis. The FESEM analysis indicates that the sample has a spherical shape. From the examination of the optical properties, we found that the sample shows the highest fluorescence properties at an excitation wavelength of 350 nm and has a green color under UV lamp. XRD, EDAX, FTIR and FESEM analyzes used to investigation the functional groups and structural properties. To investigate the optical properties, UV-Visible and PL analyzes used.

KEYWORDS

Quantum Dots, Hydrothermal, Orange Peel, Structural Properties, Optical Properties.

فصلنامه علمی

اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

بررسی خواص نوری و ساختاری نقاط کوانتومی کربن سنتز شده از پوست پرتقال به روش هیدروترمال به کمک سنتز سبز

رستم مرادیان^{1*}، زهرا اسکندری قلعه²، معصومه ناصری تکیه³

چکیده

نقاط کوانتومی از پوست پرتقال به روش هیدروترمال با موفقیت سنتز شد. نتیجه طیف پراش اشعه ایکس نشان می‌دهد که نمونه دارای نقاط کوانتومی است. از آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس می‌توان نتیجه گرفت که ساختار کربن با درصد وزنی 66 درصد شکل گرفته است. جهت بررسی گروه‌های عاملی سطح نیز از آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز استفاده شد؛ که وجود عنصر اکسیژن به دلیل وجود گروه‌های عاملی دپوکسی و هیدروکسیل و فعال بودن سطح نقاط کوانتومی است. از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی، نمونه دارای ریخت کروی گونه است. از بررسی خواص نوری متوجه شدیم؛ که نمونه در طول موج تحریک 350 نانومتر بیشترین خاصیت فلورسانس را از خود نشان می‌دهد و تحت لامپ فرابنفش دارای رنگ سبز است. جهت بررسی خواص ساختاری و گروه‌های عاملی از آنالیزهای طیف پراش اشعه ایکس، طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس، طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی استفاده شد. جهت بررسی خواص نوری از دو آنالیز مرئی - فرابنفش و فوتولومینسانس استفاده گردید.

واژه‌های کلیدی

نقاط کوانتومی، هیدروترمال، پوست پرتقال، خواص ساختاری، خواص نوری.

1 استاد، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
2 دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک دانشکده علوم، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
3 دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ملایر، ایران.

نویسنده مسئول:

رستم مرادیان

رایانامه: moradian.rostam@gmail.com

استناد به این مقاله:

رستم مرادیان، زهرا اسکندری قلعه، معصومه ناصری تکیه (1403). بررسی خواص نوری و ساختاری نقاط کوانتومی کربن سنتز شده از پوست پرتقال به روش هیدروترمال به کمک سنتز سبز. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، 6(4)، 27-34.

<https://jphys.journals.pnu.ac.ir>

مقدمه

نقاط کوانتومی، به دلیل کوچک بودنشان، دسته منحصر به فردی از نیمه‌رساناها به شمار می‌روند. اندازه آنها، معمولاً بین 2 تا 10 نانومتر، یعنی معادل کنار هم قرار گرفتن 10 تا 50 اتم است. در این ابعاد کوچک، مواد رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند و این رفتار متفاوت قابلیت‌های بی‌سابقه‌ای در کاربردهای علمی و فنی به نقاط کوانتومی می‌بخشد که در بین آنها نقاط کوانتومی کربن به دلیل مزایای بسیاری از جمله سازگاری با محیط زیست، هزینه ساخت پایین و سمیت بسیار کمتر، به آن توجه شده است. در سال 2017 هو یوفنگ¹ و همکارانش با استفاده از این خواص ویژگی‌های جذب نور نقاط کوانتومی را بررسی کردند و رابطه بین طیف جذب و انتقال الکترون هسته و پوسته در نقاط کوانتومی را نشان دادند [1]. همچنین در سال 2007 لی کائو² و همکارانش با بررسی خواص فسفرسانس نقاط کوانتومی، درک بهتری در مورد چگونگی تنظیم فلورسانس و فسفرسانس نقاط کوانتومی ارائه دادند [2]. همچنین در سال 2018 کیجان لی³ و همکارانش نشان دادند که با استفاده از خواص فلورسانس و فسفرسانس نقاط کوانتومی، می‌توان از آنها در کاربردهای تصویربرداری زیستی در محیط‌های آبی استفاده کرد [3]. در سال 2020 منگلی لیو⁴ و همکارانش به بررسی مکانیسم‌های فلورسنت رایج نقاط کوانتومی مانند حالت سطحی، ساختارهای مزدوج، مراکز چند نشری و... پرداختند [4]. برای اولین بار در سال 2004 به صورت تصادفی هنگام خالص‌سازی نانولوله‌های کربنی تک جداره، نقاط کوانتومی را کشف کردند و پیشرفت‌های زیادی در سنتز، خصوصیات و کاربردهای نقاط کوانتومی حاصل شد [5]. نقاط کوانتومی به طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلفی همچون سنسور [6]، جاذب رنگ‌های صنعتی [7]، کاتالیزور تخریب‌کننده [8]، ذخیره‌سازی انرژی [9] و کاربردهای اپتوالکترونیک [10] بررسی شده است. عموماً پیش ماده‌های زیادی برای تولید نقاط کوانتومی مانند دوده شمع [11]، فیبر کربنی [12]، فولرن [13]، گلوکز [14]، نانولوله‌های کربنی تک و چند جداره [15] و بسیاری از مواد

زیستی مانند عسل [16]، ابریشم [17، 18]، پوست کیوی [19]، پوست سیب قرمز [20] و آب موز [21] استفاده شده است. همچنین روش‌های متفاوتی برای ساخت نقاط کوانتومی از قبیل هیدروترمال [22]، سل-ژل [23]، لیزر [24]، لایه نشانی شیمیایی از فاز بخار [25] و... وجود دارند. در بین روش‌های سنتز نقاط کوانتومی، روش هیدروترمال به دلیل مقرون به صرفه بودن و در دسترس بودن، بیشتر از روش‌های دیگر به آن توجه شده است.

در این پژوهش نقاط کوانتومی توسط پوست پرتقال به روش هیدروترمال به کمک سنتز سبز تهیه شده‌اند که یک روش مقرون به صرفه و در دسترس است. همچنین پوست پرتقالی که دور انداخته می‌شود به راحتی دوباره در چرخه تولید نانوذراتی همانند نقاط کوانتومی کربن قرار می‌گیرد.

روش آزمایشگاهی

پوست پرتقال خشک شده به عنوان پیش ماده، پلی وینیلیدین 7200 و آب مقطر استفاده شد. ابتدا برای سنتز نقاط کوانتومی 2 گرم پوست پرتقال را آسیاب و به صورت همگن درآورده شد. پیش ماده در 30 میلی‌لیتر آب حل و سپس 0/2 گرم PVP 7200 حل شده در 10 میلی‌لیتر آب مقطر به آن اضافه گردید. به مدت نیم ساعت محلول بر روی استیرر قرار گرفت تا زمانی که کاملاً محلول همگن شد. سپس محلول تهیه شده به اتوکلاو انتقال داده شد که به مدت 18 ساعت در دمای 220 درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پس از آن 18 ساعت زمان می‌دهیم تا اتوکلاو به دمای محیط برسد و محلول به دست آمده را از داخل آن خارج می‌کنیم. محلول به دست آمده با استفاده از سانتریفیوژ با دور 5000 دور بر دقیقه در مدت زمان 10 دقیقه چندین مرتبه سانتریفیوژ شد. فاز جامد جدا شده در دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 2 ساعت خشک گردید. فاز محلول به دست آمده نیز برای تعدادی از آنالیزها از قبیل فوتولومینسانس و طیف‌سنجی فرابنفش - مرئی استفاده شد.

مشخصه‌یابی

جهت بررسی خواص ساختاری و کریستالی نمونه از آنالیزهای طیف پراش اشعه ایکس⁵ (XRD)، میکروسکوپ

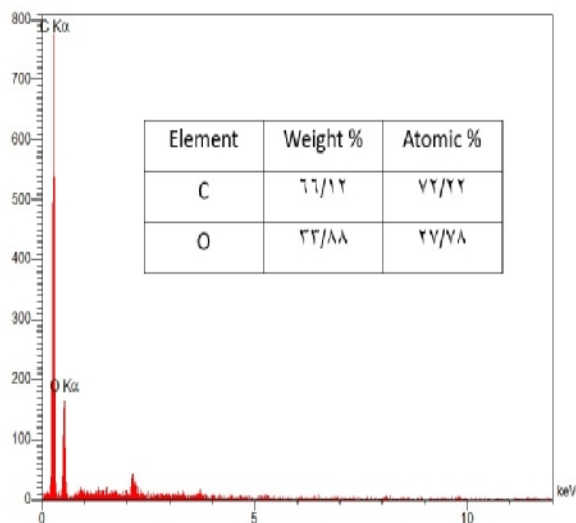
1 Hu Yuefang

2 Li Cao

3 Qijun Li

4 Mengli Liu

پوست پرتقال در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل 2. طیف پراش انرژی اشعه ایکس نمونه تهیه شده

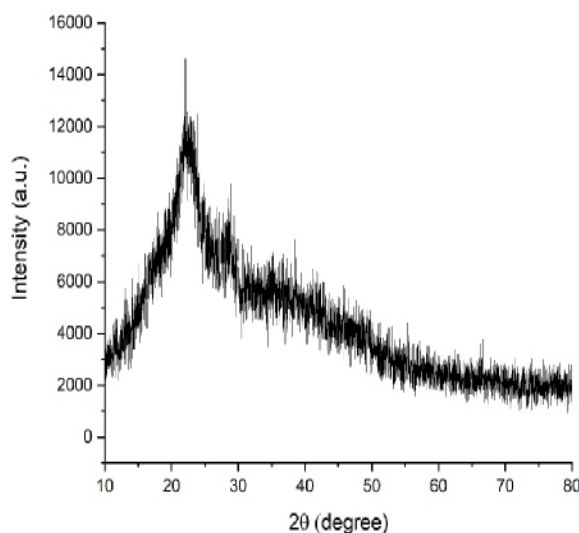
همان طور که از تصویر 2 پیداست میزان درصد وزنی عنصر کربن تقریباً 66 درصد است و همچنین عنصری همانند اکسیژن نیز به دلیل وجود گروه‌های عاملی موجود در سطح و فعال بودن سطح نقاط کوانتومی با مقدار درصد وزنی 34 درصد است می‌توان دریافت که نتیجه طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس با نتیجه طیف پراش اشعه ایکس همخوانی بسیار خوبی دارند که نشان می‌دهد عناصر کربن در ساختار دارای بیشترین مقدار است.

جهت مطالعه ریخت‌شناسی از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی استفاده گردید که در دو بزرگ‌نمایی 500 نانومتر و 1 میکرومتر صورت گرفته است (شکل 3). از شکل 3 میانگین سایز میکروسکوپی ذرات سنتز شده اندازه گرفته شد که تقریباً 29/19 نانومتر است که رشد چنین ساختارهایی در کارهای محققان دیگری نیز گزارش شده است [27].

الکترونی روبشی گسیل میدانی¹ (FESEM)، طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز² (FTIR) و طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس³ (EDAX) بررسی شده است و همچنین خواص نوری نمونه‌های به دست آمده توسط طیف جذبی مرئی - فرابنفش⁴ (UV-Visible) و فوتولومینسانس⁵ (PL) بررسی شده است.

نتایج و بحث

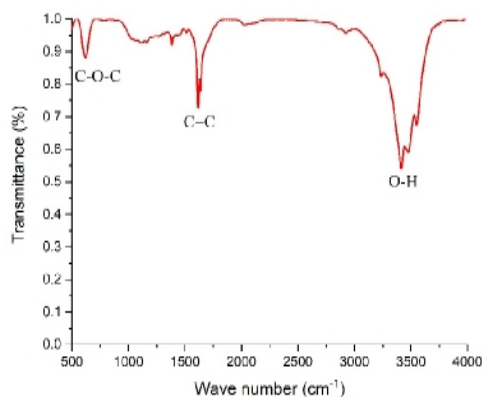
برای بررسی خواص ساختاری در ابتدا آنالیز طیف پراش اشعه ایکس نمونه سنتز شده بررسی شد. تصویر 1 طیف پراش اشعه ایکس نمونه نقاط کوانتومی را نشان می‌دهد که یک پیک شارپ در 20 درجه مشاهده می‌شود؛ که مربوط به صفحه (002) کربن است که طبق گزارش در کار محققان دیگر گزارش شده است [26].



شکل 1. طیف پراش اشعه ایکس نمونه تهیه شده

نمودار طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس مربوط به نقاط کوانتومی تهیه شده با روش هیدروترمال با استفاده از

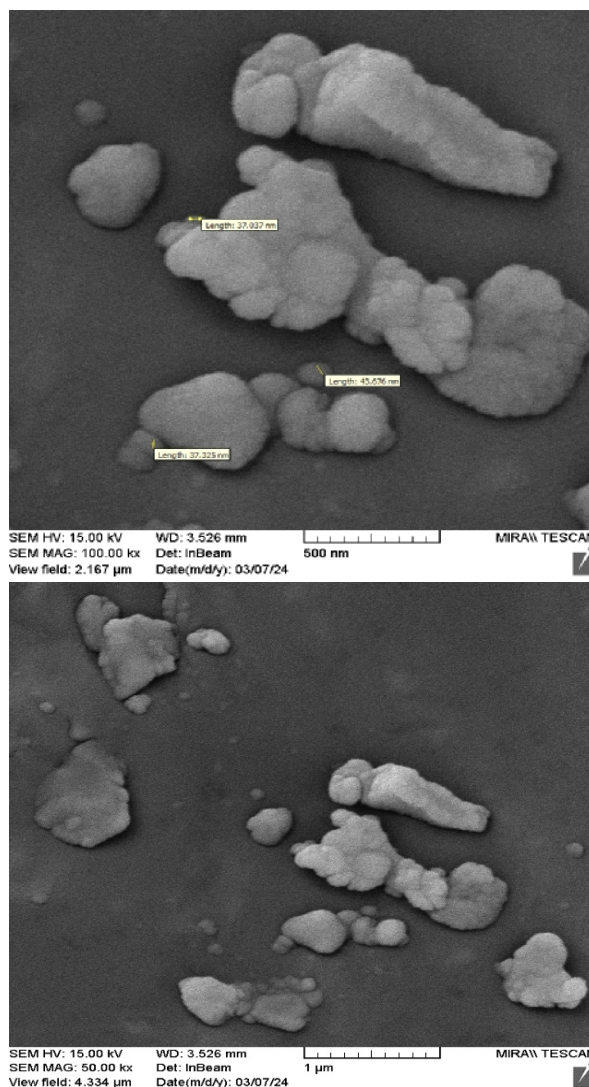
- 1 Field Emission Scanning Electron Microscope – TESCAN(MIRAI3)
- 2 Fourier Transform Infrared Spectrometer – Thermo (Biomate5)
- 3 Energy Dispersive X-ray – TESCAN (VEGA3)
- 4 Ultraviolet Visible Spectrometer – Thermo (Biomate5)
- 5 Photoluminescence



شکل 4. آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز

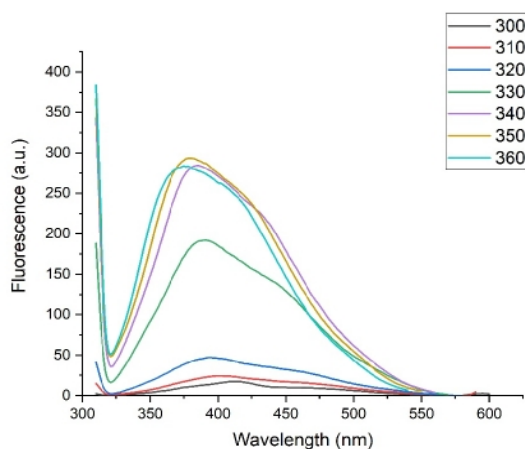
طبق تصویر طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز، قله قوی حدود 1620 cm^{-1} مد کششی ویژه پیوند $\text{C}=\text{C}$ در بلور نقاط کوانتومی را نشان می‌دهد. قله پهن که در 3407 cm^{-1} متعلق به گروه هیدروکسیل ($\text{O}-\text{H}$) است که به دلیل فعال بودن سطح نقاط کوانتومی روی سطح قرار گرفته است [28]. گروه عاملی $\text{O}-\text{H}$ پراکندگی نقاط کوانتومی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این یک قله در 610 cm^{-1} نیز مشاهده می‌شود که مربوط به گروه عاملی دیوکسی ($\text{C}-\text{O}-\text{C}$) است [29]. اوج جذب مربوط به 3500 و 1500 cm^{-1} است که مربوط به ارتعاشات کششی $\text{O}-\text{H}$ و $\text{C}=\text{C}$ است که با توجه به قسمت‌های قبل می‌توان دریافت که نتیجه طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز با نتیجه آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس همخوانی بسیار بالایی دارد که می‌توان انتظار داشت در آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز گروه‌های عاملی هیدروکسیل و دیوکسی روی سطح قرار گرفته باشند. وجود این گروه‌های عاملی نشان می‌دهد که نقاط کربن سنتز شده دارای حلالیت عالی در آب هستند.

در ادامه جهت بررسی خواص نوری از دو آنالیز طیف جذبی مرئی - فرابنفش و فوتولومینسانس استفاده شد. در ابتدا با استفاده از طیف جذبی مرئی - فرابنفش در گستره 200 تا 800 نانومتر که در شکل 5 نمایش داده شده است، بررسی شد.



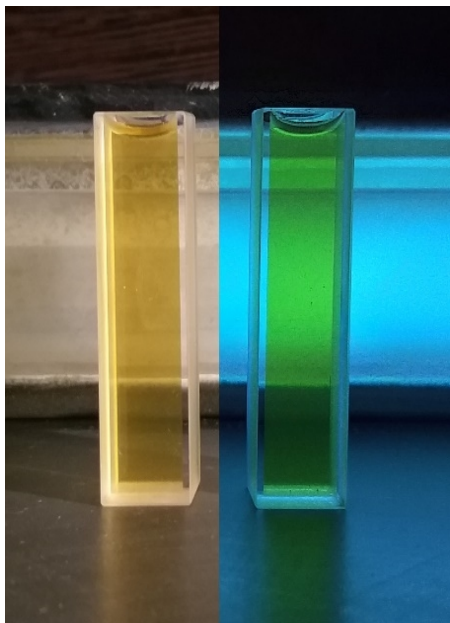
شکل 3. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی نمونه

برای تجزیه و شناسایی پیوندها از آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز استفاده می‌شود و طیف مادون قرمز در محدوده 600 cm^{-1} تا 4000 cm^{-1} ثبت گردید. در شکل 4 طیف طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز نمونه ساخته شده مربوط به نقاط کوانتومی تهیه شده با روش هیدروترمال با استفاده از پوست پرتقال نشان داده شده است. گروه‌های عاملی در سطح نمونه‌ها نشان داده شده است که به تفصیل بررسی خواهند شد.



تصویر 6. آنالیز فوتولومینسانس

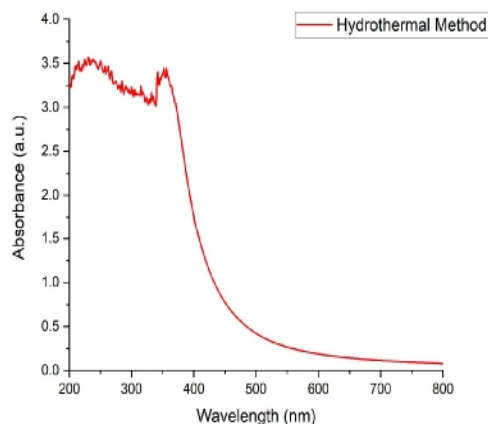
در تصویر 7 نمونه حل شده در آب تحت لامپ فرابنفش با طول موج 495 تا 570 نانومتر در دو حالت خاموش و روشن بودن لامپ فرابنفش نشان داده شده است که می‌توان مشاهده کرد نمونه دارای خاصیت فلورسانس است و از خود نور سبز را ساطع نموده است. این نتایج نشان دهنده این است که توزیع اندازه ذرات بسیار مناسب است و نقاط کوانتومی سنتز شده از خواص نوری بسیار خوبی برخوردار هستند.



تصویر 7. نمونه فاز محلول تحت لامپ فرابنفش

جمع بندی

نقاط کربنی از پوست پرتقال به روش هیدروترمال با موفقیت سنتز شد. نتیجه طیف پراش اشعه ایکس نشان می‌دهد که در



شکل 5. طیف جذبی نمونه

برای بررسی خواص نوری نمونه در ابتدا آنالیز طیف جذبی مرئی - فرابنفش بررسی شد. تصویر 5 طیف جذبی نمونه پرتقال را نشان می‌دهد که از محدوده 200 تا 400 نانومتر دارای پیک است که قوی‌ترین پیک جذب نقاط کوانتومی در حدود 350 نانومتر مشاهده شد [29]. طیف فرابنفش یک پیک ضعیف در محدوده 251 تا 363 نانومتر مشاهده می‌شود که نشان دهنده نوار انتقال $\pi-\pi^*$ است. این باند به دلیل وجود پیوندهای آروماتیک C-C در ساختار نقاط کوانتومی است [28, 30].

یکی از دلایل رفتار فوتولومینسانس وابسته به تحریک نقاط کربن و ماهیت سطح آن‌ها است. وجود گروه‌های عملکردی مختلف روی سطح نقاط کربن، ممکن است منجر به یک سری تله‌های انتشاری بین نقاط کربن شود. شدت فوتولومینسانس به غلظت نقاط کربن حساس است، در حالی که در غلظت‌های پایین تغییر شدت فوتولومینسانس ناچیز است. علاوه بر این، فوتولومینسانس به طول موج تحریک نیز حساس است [31]. شکل 6 آنالیز فوتولومینسانس نمونه سنتز شده را نشان می‌دهد. با توجه به تصویر داریم که حداکثر طول موج تحریک 350 نانومتر است. با افزایش طول موج تحریک از 300 به 400 نانومتر، حداکثر طول موج انتشار از 370 به 450 نانومتر تغییر می‌کند [32]. بهترین تحریک نقاط کوانتومی در 345 نانومتر است در حالی که انتشار بهینه در 390 نانومتر است [28]. با توجه به شکل 6 شدت آنالیز فوتولومینسانس به غلظت نقاط کربن بستگی دارد. شدت طیف فوتولومینسانس با کاهش غلظت نقاط کربن به شدت افزایش می‌یابد. اندازه نقاط کوانتومی تاثیر قابل توجهی بر فعالیت فوتوکاتالیستی آن‌ها در تخریب رنگ‌های آلی دارد [33].

ریخت کروی گونه است. از بررسی خواص نوری داریم که نمونه در طول موج تحریک 350 نانومتر بیشترین خاصیت فلورسانس را از خود نشان می‌دهد و تحت لامپ فرابنفش دارای رنگ سبز است.

منابع

- [1] Hu, Y., et al., Green preparation of S and N Co-doped carbon dots from water chestnut and onion as well as their use as an off-on fluorescent probe for the quantification and imaging of coenzyme A. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017. 5(6): p. 4992-5000.
- [2] Cao, L., et al., Carbon dots for multiphoton bioimaging. *Journal of the American Chemical Society*, 2007. 129(37): p. 11318-11319.
- [3] Li, Q., et al., Induction of long-lived room temperature phosphorescence of carbon dots by water in hydrogen-bonded matrices. *Nature Communications*, 2018. 9(1): p. 734.
- [4] Liu, M., Optical properties of carbon dots: a review. *Nanoarchitectonics*, 2020: p. 1-12.
- [5] Rajendran, K., et al., Synthesis and characterization of biocompatible zinc oxide nanorod doped-titanium dioxide nanosheet. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2018. 57: p. 387-395.
- [6] Li, X., et al., Carbon dot-based fluorescent and colorimetric sensor for sensitive and selective visual detection of benzoyl peroxide. *Chinese Chemical Letters*, 2022. 33(3): p. 1632-1636.
- [7] Momina, M., K. Ahmad, and Z.A. Khan, Facile synthesis of biomass derived economically viable carbon dot polymer nanocomposite: A perspective towards sustainable removal of dyes from synthetic wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 2024. 58: p. 104748.
- [8] Perumal, S., et al., Green-routed carbon dot-adorned silver nanoparticles for the catalytic degradation of organic dyes. *Catalysts*, 2022. 12(9): p. 937.
- [9] Zhai, Y., et al., Carbon dots as new building blocks for electrochemical energy storage and electrocatalysis. *Advanced Energy Materials*, 2022. 12(6): p. 2103426.
- [10] Yuan, F., et al., Shining carbon dots: synthesis and biomedical and optoelectronic applications. *Nano Today*, 2016. 11(5): p. 565-586.
- [11] Liu, H., T. Ye, and C. Mao, Fluorescent carbon nanoparticles derived from candle soot. *Angewandte chemie*, 2007. 119(34): p. 6593-6595.
- [12] Peng, J., et al., Graphene quantum dots derived from carbon fibers. *Nano letters*, 2012. 12(2): p. 844-849.
- [13] Lu, J., et al., Transforming C60 molecules into graphene quantum dots. *Nature nanotechnology*, 2011. 6(4): p. 247-252.
- [14] Egorova, M., et al., Hydrothermal synthesis of luminescent carbon dots from glucose and birch bark soot. *Journal of Structural Chemistry*, 2018. 59: p. 780-785.
- [15] Zhou, J., et al., An electrochemical avenue to blue luminescent nanocrystals from multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs). *Journal of the American Chemical Society*, 2007. 129(4): p. 744-745.
- [16] Surendran, P., et al., Bioinspired fluorescence carbon quantum dots extracted from natural honey: efficient material for photonic and antibacterial applications. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 2020. 24: p. 100589.
- [17] Wu, Z.L., et al., One-pot hydrothermal synthesis of highly luminescent nitrogen-doped amphoteric carbon dots for bioimaging from *Bombyx mori* silk-natural proteins. *Journal of Materials Chemistry B*, 2013. 1(22): p. 2868-2873.
- [18] Colusso, E., et al., Photoluminescence properties of silk-carbon quantum dots composites. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2023. 107(1): p. 170-177.
- [19] Atchudan, R., et al., Leftover kiwi fruit peel-derived carbon dots as a highly selective fluorescent sensor for detection of ferric ion. *Chemosensors*, 2021. 9(7): p. 166.
- [20] Zhao, S.-S., et al., Hydrothermal Synthesis of Carbon Dots from Luochuan Red Fuji Apple Peel and Application for the Detection of Fe³⁺ Ions. *Nano*, 2021. 16(13): p. 2150156.
- [21] De, B. and N. Karak, A green and facile approach for the synthesis of water soluble fluorescent carbon dots from banana juice. *Rsc Advances*, 2013. 3(22): p. 8286-8290.
- [22] Han, Z., et al., Hydrothermal synthesis of carbon dots and their application for detection of chlorogenic acid. *Luminescence*, 2020. 35(7): p. 989-997.
- [23] Mura, S., et al., Integrating sol-gel and carbon dots chemistry for the fabrication of fluorescent hybrid organic-inorganic films. *Scientific Reports*, 2020. 10(1): p. 4770.
- [24] Kaczmarek, A., et al., Luminescent carbon dots synthesized by the laser ablation of graphite in polyethylenimine and ethylenediamine. *Materials*, 2021. 14(4): p. 729.
- [25] Park, J., et al., Solvent-free growth of carbon dots by sputter-plasma assisted chemical vapour deposition over large areas. *Carbon*, 2019. 146: p. 28-35.

زاویه 20 درجه یک پیک شارپ مربوط به صفحه (002) وجود دارد. همچنین از نتیجه طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس داریم که ساختار دارای بیشترین مقدار کربن است و وجود عنصر اکسیژن به دلیل وجود گروه‌های عاملی و فعال بودن سطح نقاط کوانتومی است؛ که با آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز همخوانی بسیار بالایی دارد. از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی سائز میکروسکوپی نمونه که تقریباً 30 نانومتر به دست آمد و دارای

- [26] Fang, H.-Y., W.-M. Huang, and D.-H. Chen, One-step synthesis of positively charged bifunctional carbon dot/silver composite nanoparticles for killing and fluorescence imaging of Gram-negative bacteria. *Nanotechnology*, 2019. 30(36): p. 365603.
- [27] Warule, S.S., et al., Decoration of CdS nanoparticles on 3D self-assembled ZnO nanorods: a single-step process with enhanced field emission behaviour. *CrystEngComm*, 2015. 17(1): p. 140-148.
- [28] Atchudan, R., et al., Facile green synthesis of nitrogen-doped carbon dots using *Chionanthus retusus* fruit extract and investigation of their suitability for metal ion sensing and biological applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017. 246: p. 497-509.
- [29] Guo, J., et al., Green synthesis of carbon dots toward anti-counterfeiting. *ACS sustainable chemistry & engineering*, 2019. 8(3): p. 1566-1572.
- [30] Li, Y., et al., Formation and Band Gap Tuning Mechanism of Multicolor Emissive Carbon Dots from m-Hydroxybenzaldehyde. *Advanced Science*, 2023. 10(18): p. 2300543.
- [31] Zhou, Y., et al., Size-dependent photocatalytic activity of carbon dots with surface-state determined photoluminescence. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2019. 248: p. 157-166.
- [32] Aydin, S., et al., Hydrothermal Synthesis of Nitrogen-Doped and Excitation-Dependent Carbon Quantum Dots for Selective Detection of Fe³⁺ in Blood Plasma. *Coatings*, 2022. 12(9): p. 1311.
- [33] Wang, Y., et al., Hydrothermal synthesis of nitrogen-doped carbon quantum dots from lignin for formaldehyde determination. *RSC advances*, 2021. 11(47): p. 29178-2. 9185.