



Научная статья  
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)  
УДК 691.175; 535

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.031

EDN: BNVSUS

## ПОЛУЧЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК В МАТРИЦЕ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

Марфа Никитична Егорова <sup>1</sup>, Ирина Ивановна Куркина <sup>2</sup>,  
Афанасий Алексеевич Дьяконов <sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

<sup>1</sup> mn.egorova@s-vfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8204-0000>

<sup>2</sup> ii.kurkina@s-vfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4863-0000>

<sup>3</sup> afonya71185@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6959-368X>

**Аннотация.** В работе приведены результаты исследования оптических и структурных свойств раствора углеродных точек, синтезированных из лимонной кислоты и этилендиамина гидротермальным методом. В ходе работы установлено, что фотолюминесценция углеродных точек зависит от изменения длины волны возбуждения, средний диаметр полученных углеродных точек составил 80 нм, с толщиной 4 нм. Также приведены результаты исследования оптических и электрических свойств пленок из поливинилового спирта, содержащих углеродные точки. Наибольшей электропроводностью и фотолюминесценцией обладают пленки с долей углеродных точек 10 %.

**Ключевые слова:** углеродные точки, лимонная кислота, этилендиамин, люминесценция, гидротермальный синтез, светодиоды, электролюминесценция.

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке МНУВО РФ НИР № FSRG-2023-0026 и Гранта Главы РС(Я) для молодых ученых, специалистов и студентов.

**Для цитирования:** Егорова М. Н., Куркина И. И., Дьяконов А. А. Получение углеродных точек в матрице поливинилового спирта и исследование их свойств // Ползуновский вестник. 2023. № 1. С. 245–251. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.031. EDN: <https://elibrary.ru/BNVSUS>.

Original article

## OBTAINING CARBON DOTS IN A POLYVINYL ALCOHOL MATRIX AND INVESTIGATION OF THEIR PROPERTIES

Marfa N. Egorova <sup>1</sup>, Irina I. Kurkina <sup>2</sup>, Afanasii A. Dyakonov <sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

<sup>1</sup> mn.egorova@s-vfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8204-0000>

<sup>2</sup> ii.kurkina@s-vfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4863-0000>

<sup>3</sup> afonya71185@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6959-368X>

**Abstract.** Fluorescent carbon dots were synthesized via a one-step hydrothermal approach using citric acid as the carbon source and ethylenediamine as a nitrogenous additive. The synthesized carbon dots exhibit excitation-dependent photoluminescence emission and have an average diameter of 80 nm, and thickness of 4 nm. The results of a study of the optical and electrical properties of polyvinyl alcohol films containing carbon dots are also presented. Films with a carbon dots fraction of 10% have the highest electrical conductivity and photoluminescence.

**Keywords:** carbon dots, citric acid, ethylenediamine, luminescence, hydrothermal synthesis, polyvinyl alcohol, LEDs, electroluminescence.

**Acknowledgements:** the work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the State Assignments No. FSRG-2023-0026 and the Grant of the Head of the Republic of Sakha (Yakutia) for young scientists, specialists and students.

**For citation:** Egorova, M.N., Kurkina, I.I. & Dyakonov, A.A. (2023). Obtaining carbon dots in a polyvinyl alcohol matrix and investigation of their properties. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 245-251. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.031. EDN: <https://elibrary.ru/BNVSUS>.

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время квантовые точки и светодиоды на их основе привлекли большое внимание исследователей во всем мире, и за последние несколько лет были достигнуты большие успехи в области высокопроизводительных устройств такого типа [1–8]. Однако высокая токсичность, низкая стабильность и высокая стоимость тяжелых металлов (таких, как Cd<sup>2+</sup> и Pb<sup>2+</sup>) могут серьезно затруднить их дальнейшее развитие и практическое использование на потребительских рынках.

Углеродные точки (УТ) представляют собой люминесцирующие углеродные наноматериалы с размерами менее 10 нм. УТ не содержат тяжелых металлов и состоят из большого количества органических элементов, таких как углерод, водород, азот и кислород [9]. УТ обладают высокой химической инертностью, низкой токсичностью, и в ряде случаев могут заменить токсичные полупроводниковые квантовые точки [10, 11].

В связи с быстрым развитием УТ в последние годы исследования светодиодов на их основе привлекают все большее внимание и являются быстрорастущей областью исследований [12]. В настоящее время существуют две стратегии использования УТ в светодиодах: 1) УТ в качестве люминофоров; 2) УТ в качестве активных излучателей (излучательного слоя). Первый реализуется путем использования УТ в качестве люминофоров на УФ- или синем светодиоде на основе GaN [13–17]. Вторая стратегия связана с электролюминесцентными свойствами УТ. Электролюминесцентные светодиоды на основе УТ имеют структуру многослойного устройства, в которых УТ служат средним эмиссионным слоем.

УТ синтезируются различными методами с использованием большого количества разных прекурсоров. УТ, синтезированные путем карбонизации лимонной кислоты (ЛК), наиболее интересны, так как обладают наиболее яркой и интенсивной фотолюминесценцией (ФЛ) [18, 19]. С целью увеличения интенсивности люминесценции применяется легиро-

вание гетероатомами (N, B, P и др.). Легирование УТ атомами азота (водный раствор аммиака, этилендиамин, цистеин, этаноламин и др. [20]) является наиболее исследованным из-за его эффективного и простого одностадийного метода синтеза [21].

Целью работы является нахождение параметров синтеза УТ с интенсивной фотолюминесценцией и высокой электропроводностью для получения УТ в прозрачной матрице для дальнейшего использования в структурах светодиодов.

## МЕТОДЫ

Для простого и эффективного приготовления УТ был выбран одностадийный гидротермальный метод. Для изготовления раствора углеродных точек в качестве источника углерода использовалась лимонная кислота (10 г), в качестве азотсодержащей добавки – этилендиамин (5 мл) и деионизованная вода (50 мл) в качестве растворителя. Полученный прозрачный раствор помещали в автоклав из нержавеющей стали с политетрафторэтиленовым вкладышем и нагревали в сушильном шкафу при 180 °С. Длительность синтеза варьировали. Синтез углеродных точек продолжался в течение 4 ч, 6 ч, 8 ч и 10 ч. После охлаждения до комнатной температуры раствор центрифугировали 10 мин при 3000 об/мин и очищали от непрореагировавших частиц при помощи диализа (размер пор 3,5 кДа) в течение 6 ч.

Для изготовления пленок, содержащих углеродные точки в матрице поливинилового спирта (ПВС-УТ), 1 г поливинилового спирта растворяли в 5 мл деионизованной воды при 100 °С. Для исследования свойств ПВС-УТ были созданы 4 вида структур с разным содержанием УТ в матрице ПВС: 0,5 мл (10 %), 0,35 мл (7 %), 0,25 мл (5 %), 0,015 мл (1 %). Пленки были получены при помощи стержня Мейера. Поверх нанесенного первого слоя помещали алюминиевые контакты, затем наносили второй слой ПВС-УТ. Схематическая иллюстрация синтеза УТ для создания пленок ПВС-УТ показана на рисунке 1.

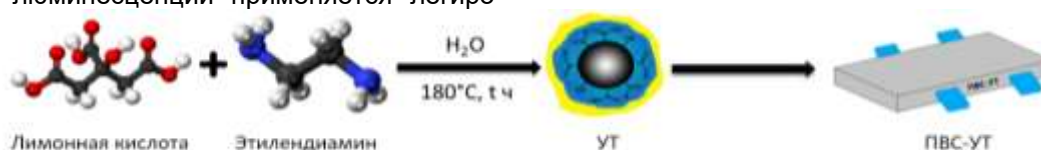


Рисунок 1 – Схематическая иллюстрация синтеза УТ для создания пленок ПВС-УТ

Figure 1 - Schematic illustration of the synthesizing of CDs for PVA/CDs films

## ПОЛУЧЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК В МАТРИЦЕ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

Исследования морфологии поверхности и структуры углеродных точек проводили при помощи атомно-силовой (Ntegra Spectra, NT-MDT, Россия) и сканирующей микроскопии (JSM-7800F, Jeol, Япония). Люминесценцию раствора УТ измеряли на спектрометре LS 50B (Perkin Elmer, США), пленок УТ и ПВС-УТ на Ntegraspectra, спектры поглощения измеряли на спектрофотометре Lambda 750 (Perkin Elmer, США). Вольт-амперные характеристики пленок ПВС-УТ измеряли на установке электрофизических измерений при дневном освещении, в темноте и под ультрафиолетовым излучением (УФ).

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно литературным данным [22–25], наиболее распространенное время синтеза УТ с высокой интенсивностью ФЛ составляет

8 ч. Исходя из этого был синтезирован раствор УТ из лимонной кислоты со временем синтеза 8 ч и исследованы его оптические свойства. Полученный раствор углеродных точек коричневого цвета обладает ярким зеленым свечением под УФ светом.

Для характеристики полученных УТ были сняты спектры люминесценции и поглощения. Как видно из рисунка 2, а, люминесценция зависит от изменения длины волны возбуждения. При изменении длины волны возбуждения от 300 до 500 нм спектры люминесценции сдвигались от 440 нм до 540 нм, с максимумом при 442 нм ( $\lambda_{ex} = 400$  нм). Оптические переходы в спектральной области 200–300 нм можно отнести к  $\pi-\pi^*$ -переходам в  $sp^2$ -гибридизированных углеродных доменах. Пик на 346 нм соответствует  $n-\pi^*$  переходу связи C = O (рисунок 2, б) [26].

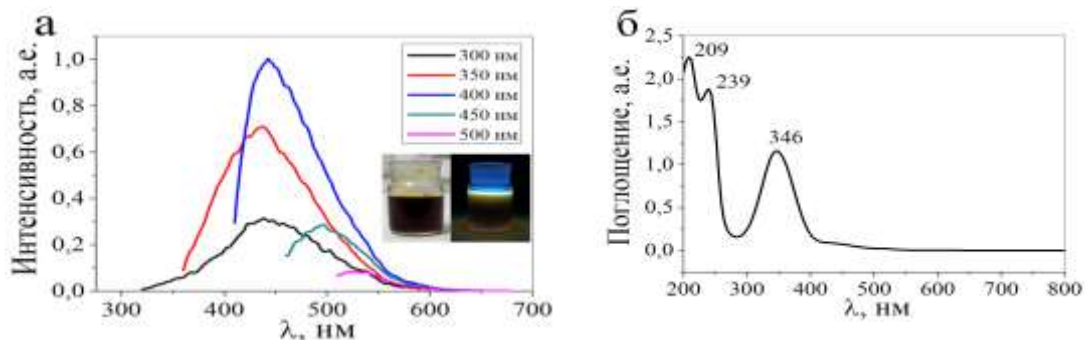


Рисунок 2 – а) спектры ФЛ раствора УТ; б) спектр поглощения раствора УТ (вставка: раствор УТ при дневном освещении и под УФ светом)

Figure 2 - a) PL spectra of CDs solution, b) UV-VIS absorption spectra of CDs solution (insert: CDs solution in daylight and under UV light)

### Пленки УТ

Для получения пленок углеродных точек раствор УТ был нанесен на гибкую подложку.

Спектры люминесценции пленок УТ представлены на рисунке 2. При возбуждении лазером длиной волны 532 нм наблюдаются пики люминесценции в области от 550 нм до 640 нм. Благодаря тому, что спектры снимались на установке Интегра Спектра и материал возбуждали лазером, мы могли наблюдать 4 широких пика в районе 577–580 (C = N + C = C) нм, 594 нм (C = C = C или C = O), 605 нм (N = C = O) и 620 нм (C = C). Образец со временем синтеза 10 ч обладает наибольшей интенсивностью ФЛ, тогда как для времени синтеза 8 ч интенсивность ФЛ оказалась наименьшей.

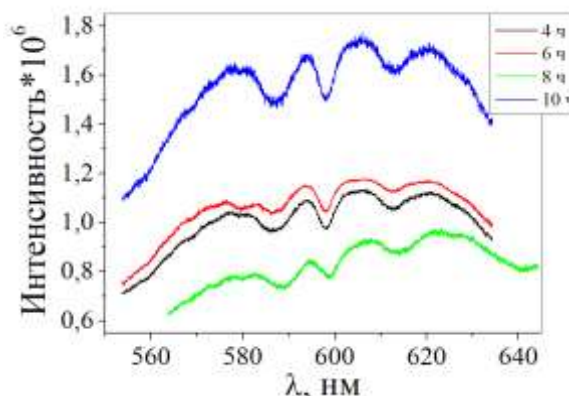


Рисунок 3 – Спектры ФЛ пленок УТ при разном времени синтеза (длина волны лазера 532 нм)

Figure 3 - PL spectra of CDs films at different synthesis times (laser wavelength 532 nm)

На рисунке 4, а представлены данные со сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Диаметр сферических УТ оценен как ~ 80 нм. На рисунке 4, б приведены данные АСМ, из

которых средняя толщина УТ составила 4 нм. Средние латеральные размеры УТ, полученные методом АСМ и СЭМ, согласуются между собой.

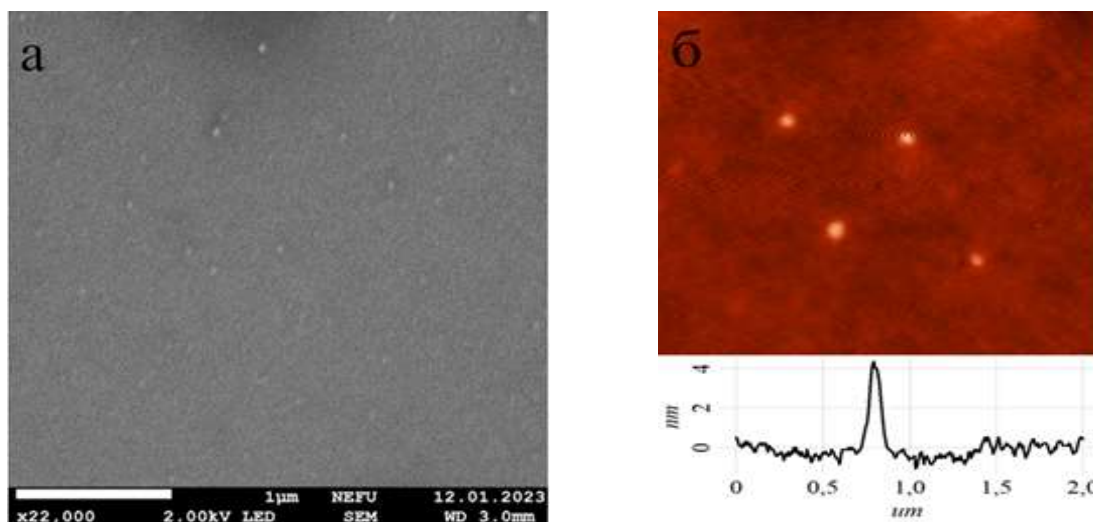


Рисунок 4 – а) СЭМ-изображение УТ; б) АСМ изображение и распределение высоты УТ

Figure 4 - a) SEM image of CDs, b) AFM image and height distribution of CDs

#### Пленки ПВС-УТ

Для определения влияния времени синтеза на люминесцентные свойства пленок ПВС-УТ были изготовлены образцы с разным временем синтеза УТ – 4, 6, 8 и 10 ч. Для определения влияния доли углеродных точек в ПВС на электропроводность пленок, для

образцов со временем синтеза 8 ч рассматривались следующие доли УТ – 1, 5, 7 и 10 %. Результаты исследования оптических свойств пленок ПВС-УТ представлены на рисунке 5.

Из рисунков видно, что с изменением длины волны лазера с 473 нм до 532 нм интенсивность ФЛ уменьшается.

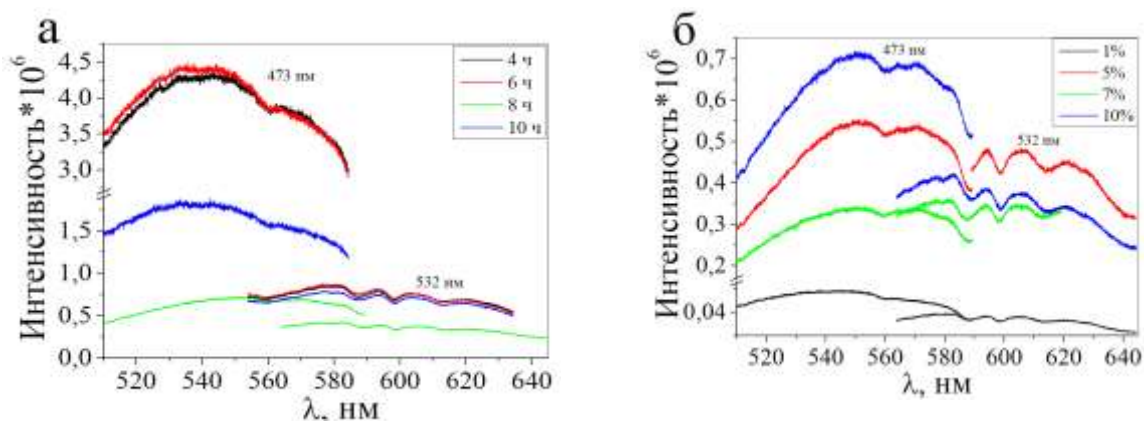


Рисунок 5 – Спектры ФЛ пленки ПВС-УТ ЛК: а) при разном времени синтеза; б) с разным содержанием УТ (длина волны лазера 473 нм и 532 нм)

Figure 5 - PL spectra of PVA/CDs film: a) at different synthesis times, b) with different content of CDs (laser wavelength 473 nm and 532 nm)

Для определения электропроводности пленок УТ в матрице ПВС были измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ). На рисунке 6, а приведена ВАХ пленок ПВС-УТ, где

видно, что плотность тока пленок при свете и в темноте не меняется, а при освещении УФ становится в ~2 раза больше. Для сравнения на графике также приведена плотность тока исход-

## ПОЛУЧЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК В МАТРИЦЕ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

ной пленки ПВС. На рисунке 6, б представлены ВАХ пленок ПВС-УТ с концентрацией УТ 10 % в зависимости от времени синтеза УТ. Измерения проводились под УФ излучением. Видно, что плотность тока для ПВС-УТ со временем синте-

за УТ 8 ч наибольшая, более чем в 4 раза, по сравнению с ПВС-УТ со временем синтеза УТ 10 ч. Плотность тока для образцов со временем синтеза УТ 4 и 6 ч оказалась незначительно больше, чем для исходной пленки ПВС.

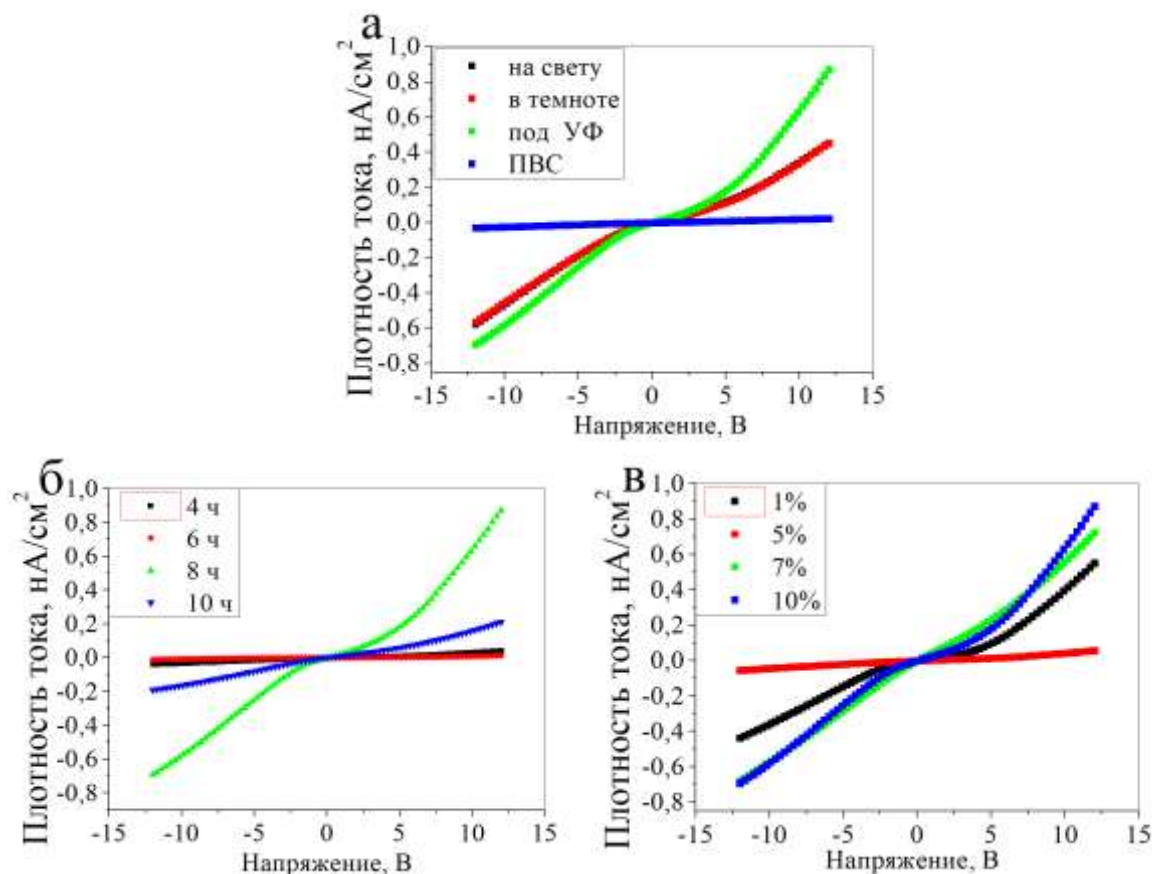


Рисунок 6 – ВАХ ПВС-УТ: а) 8 ч 10 %; б) пленки ПВС-УТ при разном времени синтеза УТ концентрация 10 % под УФ излучением; в) пленки ПВС-УТ при 8 ч синтеза УТ с разной концентрацией под УФ излучением

Figure 6 - I-V characterization PVS/CDs: a) 8 h 10%, b) PVS/CDs films at different times of synthesis of CDs and concentration of CDs 10 % under UV radiation, c) PVS/CDs films at 8 h of synthesis of CDs with different concentrations under UV radiation

Исследование вольт-амперных характеристик ПВС-УТ в зависимости от концентрации УТ в матрице ПВС показало, что значения плотности тока для концентраций 1, 7 и 10 % близки, а для 5 % значительно меньше.

### ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящем исследовании продемонстрировано, что люминесценция пленок из раствора УТ зависит от времени синтеза. Пленки УТ с наиболее популярным временем синтеза 8 ч обладают наименьшей люминесценцией (рис. 3). При исследовании пленок УТ со временем синтеза 4, 6, 8 и 10 ч оказалось, что наибольшей люминесценцией об-

ладают пленки со временем синтеза 10 ч при возбуждении лазером длиной волны 532 нм.

При внесении раствора УТ в матрицу поливинилового спирта на конечную люминесценцию влияет не только время синтеза УТ, но также соотношение УТ к ПВС, что продемонстрировано на рисунке 5, б. Оказалось, что при длине волны возбуждающего лазера 532 нм наибольшей люминесценцией обладают пленки с долей УТ 5 %, для лазера 473 нм – 10 %.

Для определения влияния времени синтеза на люминесцентные свойства пленок ПВС-УТ была выбрана доля УТ в ПВС 10 %, как обладающая наиболее интенсивной люминесценцией. Обнаружили, что люминесценция УТ с синтезом 10 ч, которая была

наибольшей для пленок УТ, при помещении в матрицу ПВС уменьшилась. Для 8 ч люминесценция осталась наименьшей среди исследуемых.

Для выявления электролюминесценции в структурах диодов необходимо, чтобы пленки УТ обладали электропроводностью. Для исследуемых нами образцов выяснили (рис. 6), что наибольшей плотностью тока обладают пленки ПВС-УТ со временем синтеза УТ 8 ч и долей УТ 10 %, причем обычное дневное освещение не влияет на значение тока, а УФ освещение увеличивает ток, протекающий через структуру Al/PVC-UT/Al ~ в 2 раза.

Углеродные точки, введенные в матрицу ПВС, сохраняют свои люминесцентные свойства и обладают электропроводностью.

### ВЫВОДЫ

Углеродные точки были синтезированы простым гидротермальным методом с использованием ЛК и этилендиамина в качестве прекурсора и легирующего агента соответственно. Полученные УТ имеют средний диаметр 80 нм и толщину 4 нм. Для образования твердых люминофоров была использована матрица ПВС, содержащая УТ. Наибольшей электропроводностью и люминесценцией обладают ПВС-УТ с долей УТ 10 %. Люминесценция исходного раствора УТ и ПВС-УТ зависит от изменения длины волны возбуждения. Несмотря на наименьшую люминесценцию, ПВС-УТ со временем синтеза 8 ч обладают наибольшей плотностью тока, что является перспективным для использования в качестве эмиссионного слоя при создании светодиодов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Dai, X., Deng, Y., Peng, X. & Jin, Y. (2017). Quantum-dot light-emitting diodes for large-area displays: towards the dawn of commercialization. *Advanced materials*, 29(14), 1607022. <https://doi.org/10.1002/adma.201607022>.
2. Dai, X., Zhang, Z., Jin, Y., Niu, Y., Cao, H., Liang, X. & Peng, X. (2014). Solution-processed, high-performance light-emitting diodes based on quantum dots. *Nature*, 515(7525), 96-99. <https://doi.org/10.1038/nature13829>.
3. Pietryga, J.M., Park, Y.S., Lim, J., Fidler, A.F., Bae, W.K., Brovelli, S. & Klimov, V.I. (2016). Spectroscopic and device aspects of nanocrystal quantum dots. *Chemical reviews*, 116(18), 10513-10622. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00169>.
4. Cho, H., Jeong, S.H., Park, M.H., Kim, Y.H., Wolf, C., Lee, C.L., ... & Lee, T.W. (2015). Overcoming the electroluminescence efficiency limitations of

perovskite light-emitting diodes. *Science*, 350(6265), 1222-1225. DOI: 10.1126/science.aad1818.

5. Cao, Y., Wang, N., Tian, H., Guo, J., Wei, Y., Chen, H. & Huang, W. (2018). Perovskite light-emitting diodes based on spontaneously formed submicrometre-scale structures. *Nature*, 562(7726), 249-253. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0576-2>.

6. Lin, K., Xing, J., Quan, L.N., de Arquer, F.P.G., Gong, X., Lu, J., ... & Wei, Z. (2018). Perovskite light-emitting diodes with external quantum efficiency exceeding 20 per cent. *Nature*, 562(7726), 245-248. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0575-3>.

7. Zhao, B., Bai, S., Kim, V., Lamboll, R., Shivanna, R., Auras, F. & Di, D. (2018). High-efficiency perovskite-polymer bulk heterostructure light-emitting diodes. *Nature Photonics*, 12(12), 783-789. <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0283-4>.

8. Xu, W., Hu, Q., Bai, S., Bao, C., Miao, Y., Yuan, Z. & Gao, F. (2019). Rational molecular passivation for high-performance perovskite light-emitting diodes. *Nature Photonics*, 13(6), 418-424. <https://doi.org/10.1038/s41566-019-0390-x>.

9. Yuan, F., Li, S., Fan, Z., Meng, X., Fan, L. & Yang, S. (2016). Shining carbon dots: Synthesis and biomedical and optoelectronic applications. *Nano Today*, 11(5), 565-586. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2016.08.006>.

10. Gao, F., Ma, S., Li, J., Dai, K., Xiao, X., Zhao, D. & Gong, W. (2017). Rational design of high quality citric acid-derived carbon dots by selecting efficient chemical structure motifs. *Carbon*, 112, 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.10.089>.

11. Dong, Y., Shao, J., Chen, C., Li, H., Wang, R., Chi, Y. & Chen, G. (2012). Blue luminescent graphene quantum dots and graphene oxide prepared by tuning the carbonization degree of citric acid. *Carbon*, 50 (12), 4738-4743. doi: 10.1016/j.carbon.2012.06.002.

12. Zhao, B., Wang, Z. & Tan, Z.A. (2020). Deep-blue carbon dots offer high colour purity. *Nature Photonics*, 14(3), 130-131. <https://doi.org/10.1038/s41566-020-0595-z>.

13. Wang, Z., Yuan, F., Li, X., Li Y., Zhong, H., Fan, L. & Yang, S. (2017). 53% efficient red emissive carbon quantum dots for high color rendering and stable warm white-light-emitting diodes. *Advanced Materials*, 29(37), 1702910. <https://doi.org/10.1002/adma.201702910>.

14. Tian, Z., Zhang, X., Li, D., Zhou, D., Jing, P., Shen, D. & Rogach, A.L. (2017). Full-color inorganic carbon dot phosphors for white-light-emitting diodes. *Advanced Optical Materials*, 5(19), 1700416. <https://doi.org/10.1002/adom.201700416>.

15. Wang, J., Zhang, F., Wang, Y., Yang, Y. & Liu, X. (2018). Efficient resistance against solid-state quenching of carbon dots towards white light emitting diodes by physical embedding into silica. *Carbon*, 126, 426-436. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.10.041>.

16. Liu, Y., Zhang, M., Wu, Y., Zhang, R., Cao, Y., Xu, X. & Xu, Q. (2019). Multicolor tunable highly luminescent carbon dots for remote force measurement and white light emitting diodes. *Chemistry*

## ПОЛУЧЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК В МАТРИЦЕ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

cal Communications, 55(81), 12164-12167. <https://doi.org/10.1039/C9CC05581A>.

17. Wang, Q., Gao, Y., Wang, B., Guo, Y., Ahmad, U., Wang, Y. & Zhou, G. (2020). S, N-Codoped oil-soluble fluorescent carbon dots for a high color-rendering WLED. *Journal of Materials Chemistry C*, 8(13), 4343-4349. <https://doi.org/10.1039/D0TC00016G>.

18. Bagheri, Z., Ehtesabi, H., Rahmandoust, M., Ahadian, M.M., Hallaji, Z., Eskandari, F. & Jokar, E. (2017). New insight into the concept of carbonization degree in synthesis of carbon dots to achieve facile smartphone based sensing platform. *Scientificreports*, 7(1), 1-11. DOI: 10.1038/s41598-017-11572-8.

19. Song, Y., Zhu, S., Zhang, S., Fu, Y., Wang, L., Zhao, X. & Yang, B. (2015). Investigation from chemical structure to photoluminescent mechanism: a type of carbon dots from the pyrolysis of citric acid and an amine. *Journal of Materials Chemistry C*, 3(23), 5976-5984. <https://doi.org/10.1039/C5TC00813A>.

20. Lin, C., Zhuang, Y., Li, W., Zhou, T.L. & Xie, R.J. (2019). Blue, green, and red full-color ultralong afterglow in nitrogen-doped carbon dots. *Nanoscale*, 11(14), 6584-6590. <https://doi.org/10.1039/C8NR09672D>.

21. Zhou, X., Zhao, G., Tan, X., Qian, X., Zhang, T., Gui, J. & Xie, X. (2019). Nitrogen-doped carbon dots with high quantum yield for colorimetric and fluorometric detection of ferric ions and in a fluorescent ink. *Microchimica Acta*, 186, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s00604-018-3176-9>.

22. Zhang, W., Shi, L., Liu, Y., Meng, X., Xu, H., Xu, Y. & Ding, T. (2017). Supramolecular interactions via hydrogen bonding contributing to citric-acid derived carbon dots with high quantum yield and sensitive photoluminescence. *RSC advances*, 7(33), 20345-20353. DOI: 10.1039/C7RA02160G.

23. Xu, J., Wang, C., Li, H. & Zhao, W. (2020). Synthesis of green-emitting carbon quantum dots with double carbon sources and their application as a fluorescent probe for selective detection of Cu<sup>2+</sup> ions. *RSC advances*, 10(5), 2536-2544. DOI: 10.1039/C9RA08654D.

24. Li, C., Wang, Y., Zhang, X., Guo, X., Kang, X., Du, L. & Liu, Y. (2018). Red fluorescent carbon dots with phenylboronic acid tags for quick detection of Fe (III) in PC12 cells. *Journal of colloid and interface science*, 526, 487-496. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.05.017>.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 07.01.2023; одобрена после рецензирования 13.03.2023; принята к публикации 21.03.2023.*

*The article was received by the editorial board on 07 Jan 2023; approved after editing on 13 Mar 2023; accepted for publication on 21 Mar 2023.*

25. Kim, M.C., Yu, K.S., Kim, J.J., Han, S.Y., Lee, N.S., Jeong, Y.G. & Kim, D.K. (2017). Highly Photoluminescent Nitrogen-Doped Carbon Dots Prepared by Hydrothermal Decomposition of Piperazine Citrate. (preprint) doi: 10.20944/preprints201709.0169.v1.

26. Ragazzon, G., Cadranel, A., Ushakova, E.V., Wang, Y., Guldi, D.M., Rogach, A.L. & Prato, M. (2021). Optical processes in carbon nanocolloids. *Chem*, 7(3), 606-628. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2020.11.012>.

### **Информация об авторах**

*М. Н. Егорова – н.с. УНТЛ «Графеновые нанотехнологии» Физико-технического института ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова».*

*И. И. Куркина – кандидат физико-математических наук, с.н.с. УНТЛ «Графеновые нанотехнологии» Физико-технического института ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова».*

*А. А. Дьяконов – кандидат технических наук, с.н.с. УНТЛ «Технологии полимерных наноконструкций» Института естественных наук ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова».*

### **Information about the authors**

*M.N. Egorova - researcher of the educational, scientific and technological laboratory "Graphene nanotechnology" Institute of Physics and Technologies, NEFU.*

*I.I. Kurkina - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, researcher of the educational, scientific and technological laboratory "Graphene nanotechnology" Institute of Physics and Technologies, NEFU.*

*A.A. Dyakonov – Candidate of Technical Sciences, researcher of the educational, scientific and technological laboratory "Technologies of polymernanocomposites", Institute of Natural Sciences.*