

Научная статья
УДК 535.3
ББК 22.343
ГРНТИ 29.31.21
ВАК 1.3.6.
PACS 42.25.Bs
OCIS 310.6628
MSC 00A79

Исследование направленного оптического излучения квантовых точек в наноматериале

О. Н. Захарова , А. С. Федотова  ¹

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432071, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 9 октября 2023 года октября 2023 года*
Опубликована 12 декабря 2023 года

Аннотация. Обсуждаются физические особенности описания излучения системы квантовых точек в наноматериале. Предложено использовать теоретическую модель для расчёта интенсивности оптического излучения системы квантовых точек в наноматериале.

Ключевые слова: квантовая точка, наноматериал, оптическое излучение, интенсивность излучения

Введение

В настоящее время с помощью современных нанотехнологий получено большое количество наноматериалов, обладающих уникальными физическими свойствами. Наноматериалы находят всё более широкое применение в различных технологических процессах получения новых наноразмерных оптоэлектронных приборов. Например, для получения наноструктур используются специальные методы такие, как метод осаждения из раствора, который позволяет получать металлические наночастицы. Существуют и активно развиваются методы синтеза наночастиц из неорганических и органических соединений с использованием различных нанотехнологий.

Целью работы является исследование физических явлений излучения и рассеяния оптического излучения наноматериалами с квантовыми точками.

Задачи исследования состоят в том, чтобы написать обзор работ по физическим свойствам наноматериалов, разработать теоретическую модель излучения наноматериала с квантовыми точками, провести численное исследование интенсивности оптического излучения наноматериала с квантовыми точками.

Объектом исследования является наноматериал с квантовыми точками. Предметом исследования является совокупность физических свойств наноматериала с квантовыми точками.

¹E-mail: farista2006@mail.ru

В качестве материалов исследования используются наноматериалы, содержащие квантовые точки. Материалами исследования являются наноматериалы с квантовыми точками, находящимися в поле оптического излучения.

Научная новизна исследования состоит в том, что впервые проведено численное исследование угловой зависимости интенсивности оптического излучения системы квантовых точек в наноматериале.

Гипотезой исследования является предположение о том, что наноматериалы с квантовыми точками обладают уникальными физическими свойствами, которые могут быть использованы для создания высокоэффективных компьютерных дисплеев с улучшенными характеристиками в зависимости от формы и расположения квантовых точек.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что исследование вносит вклад в понимание физических процессов, происходящих в наноматериалах с квантовыми точками. Практическая значимость исследования состоит в том, что результаты исследования наноматериалов с квантовыми точками могут быть использованы при разработке новых технологий создания компьютерных дисплеев с улучшенными характеристиками в зависимости от формы и расположения квантовых точек.

Обзор

Рассеяние света является частью нашего повседневного опыта. Голубое небо, красное небо на закате, белый свет от облаков, рассеяние от поверхностей и рассеяние Томпсона — всё это проявления рассеяния света. Рэлеевское рассеяние — это упругое рассеяние света частицами, намного меньшими, чем длина волны света в прозрачных жидкостях и газах. Общий случай рассеяния частиц любого размера называется рассеянием Ми. Рассеяние в рэлеевском пределе легко получить в замкнутой форме.

В 1909 году Густав Ми разработал строгий метод расчёта интенсивности света, рассеянного однородными сферами любого размера, по сравнению с длиной волны падающего света. Решение значительно сложнее, чем приближение Рэлея, хотя это просто случай использования уравнений Максвелла для удовлетворения граничных условий на поверхности рассеивающих сфер. Система имеет сферическую симметрию, поэтому падающая волна разлагается в бесконечный ряд векторных сферических гармоник с учетом граничных условий на поверхности сферы. После значительных манипуляций определяются рассеянные поля и могут быть рассчитаны дифференциальные и полные сечения. Этот формализм редко использовался до 1980-х годов, когда стали доступны большие мейнфреймы. Однако в настоящее время расчёты можно выполнять на персональных компьютерах, и код рассеяния Ми легко доступен.

Термин «рассеяние света» также применим к случаю рассеяния на флуктуациях плотности. Именно эти флуктуации плотности вызывают рассеяние в оптически плотных средах. Хотя математические выражения похожи, лежащая в их основе физика несколько отличается, поскольку рассеяние флуктуациями включает термодинамические аргументы, а рассеяние частицами — нет. Рассеяние на флуктуациях плотности в идеальных газах имеет ту же функциональную форму, что и рассеяние на разбавленных взвешах частиц, малых по сравнению с длиной волны в однородной среде. Под гомогенностью подразумевается, что атомная или молекулярная неоднородность мала по сравнению с длиной волны падающего света. Производство, контроль, манипулирование и использование света лежат в основе многих технологий в современной оптоэлектронике. Рассеяние света играет ключевую роль во всех этих процессах. Конечно, рассеяние света мелкими частицами имеет долгую историю, где его изучали в таких контекстах, как кучевые облака, цвет неба и радуга, и использовали в различных стеклянных изделиях и окнах средневековья. Дело в том, что такая классическая тема лежит в основе многих принципиально новых и неожиданных достижений науки и техники. Ключевым

моментом является текущее внимание к наномасштабу и особенно эффектам ближнего поля в наномасштабе, в то время как большая часть более старых классических исследований была ориентирована на доступное поведение дальнего поля.

Современные наноструктурные материалы, обладающие высокой диэлектрической проницаемостью, вызвали интерес как в научных, так и в промышленных областях из-за их широкого применения, таких как оружие с высокой кинетической энергией [1] и устройства хранения энергии [2–7]. Полимерные нанокомпозиты с высокой диэлектрической проницаемостью находят широкое применение в электронной и электротехнической промышленности из-за простоты обработки и низкой стоимости.

В статье [8] было продемонстрировано, что наноструктурные материалы с квази нулевой диэлектрической проницаемостью обладают уникальными электромагнитными свойствами, а также предложена концепция ширины запрещённой зоны по энергии излучения для наночастицы из материала с квази нулевой диэлектрической проницаемостью, связанной с квантовым излучателем.

В статье [9] исследованы физические свойства наноструктур в форме эллипсоидов, вытянутых сфероидов, колец и цилиндров, которые проявляют резонансные поверхностные и резонаторные моды с приложениями в нанофотонике и нанолазмонике.

В статье [10] рассматриваются физические свойства наноструктуры, состоящая из полупроводниковой квантовой точки, связанной с металлической наночастицей.

Неклассические излучательные системы на основе полупроводниковых квантовых точек, изготовленные по эпитаксиальной технологии, были продемонстрированы как перспективные кандидаты в качестве фундаментальных компонентов многих нанофотонных устройств, включая лазеры [11–13], оптические усилители [14, 15] и широкополосные источники [16–18].

В начале 90-х годов активная и пассивная синхронизация мод лазеров с квантовыми ямами с краевым излучением была продемонстрирована несколькими группами [19–24].

Представленный обзор литературы показывает актуальность проблемы исследования излучения и рассеяния оптического излучения системой квантовых точек в наноструктурах.

Результаты

Интенсивность излучения частиц наноматериала вычисляется по формуле:

$$I = I_0 \frac{9V^2}{32\pi a^2} k_0^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \exp(-s n d_1) F(\theta_0) (1 + \cos^2 \theta_0) , \quad (1)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число вакуума, λ – длина волны излучения.

$$F(\theta_0) = \exp \left(- \frac{3f_1 d_1 \sqrt{n_1^2 - n_0^2} \sin \theta_0 a^3}{4\lambda^4} \right) , \quad (2)$$

где $n = n_p/n_m$, f_1 – фактор заполнения квантовыми точками наноматериала, d_1 – толщина плёнки активного наноматериала, a – характерный радиус квантовых точек в наноматериале.

$$s = 24\pi^3 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) \frac{V^2}{\lambda^4} , \quad (3)$$

где $I_0 = 0.482 \cdot 10^{-9}$ Вт/м². Приведём результаты численных расчётов.

На рис. 1 изображена диаграмма направленности излучения системы квантовых точек в наноматериале в случае а) узконаправленного излучения, б) широконаправленного излучения.

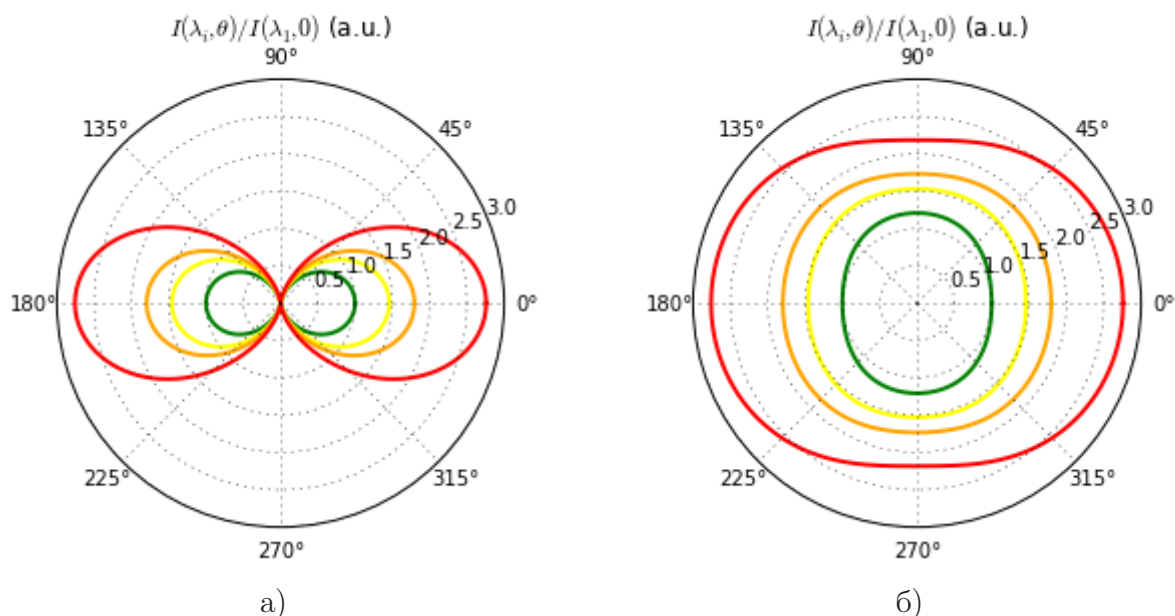


Рис. 1. Диаграмма направленности излучения системы квантовых точек в наноматериале в случае а) узконаправленного излучения, б) широконаправленного излучения.

Заключение

Численное исследование интенсивности направленного оптического излучения квантовых точек в наноматериале показывает возможность получить узкую направленность излучения системы квантовых точек в наноматериале. Оптические свойства наноматериалов могут быть улучшены за счёт введения в состав наноматериала системы квантовых точек со специальными физическими свойствами, например с различной степенью фотолюминесценции, которой можно управлять, изменяя структуру и химический состав системы квантовых точек.

Гипотеза исследования, заключающаяся в том, что наноматериалы с квантовыми точками обладают уникальными физическими свойствами, которые могут быть использованы для создания высокоэффективных компьютерных дисплеев с улучшенными характеристиками в зависимости от формы и расположения квантовых точек, подтверждена полностью.

Список использованных источников

1. Core@Double-shell structured BaTiO₃-polymer nanocomposites with high dielectric constant and low dielectric loss for energy storage application / Liyuan Xie [et al.] // The Journal of Physical Chemistry C. — 2013. — oct. — Vol. 117, no. 44. — P. 22525–22537. — URL: <https://doi.org/10.1021/jp407340n>.
2. Dielectric, mechanical and thermal properties of all-organic PI/PSF composite films by in situ polymerization / Peng Li [et al.] // e-Polymers. — 2020. — jan. — Vol. 20, no. 1. — P. 226–232. — URL: <https://doi.org/10.1515/epoly-2020-0020>.
3. Lee Ji-Won, Koh Jung-Hyuk. Enhanced dielectric properties of Ag-doped CCTO ceramics for energy storage devices // Ceramics International. — 2017. — aug. — Vol. 43, no. 12. — P. 9493–9497. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.04.130>.
4. Flexible hdC-G reinforced polyimide composites with high dielectric permittivity / Xiaojian Liao [et al.] // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. — 2017. —

- oct. — Vol. 101. — P. 50–58. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.011>.
5. High energy density nanocomposites based on surface-modified BaTiO₃ and a ferroelectric polymer / Philseok Kim [et al.] // ACS Nano. — 2009. — aug. — Vol. 3, no. 9. — P. 2581–2592. — URL: <https://doi.org/10.1021/nn9006412>.
 6. Highly foldable PANi@CNTs/PU dielectric composites toward thin-film capacitor application / Wenhui Xu [et al.] // Materials Letters. — 2017. — apr. — Vol. 192. — P. 25–28. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.01.064>.
 7. Silicone elastomers with high-permittivity ionic liquids loading / Xue Liu [et al.] // Advanced Engineering Materials. — 2019. — aug. — Vol. 21, no. 10. — URL: <https://doi.org/10.1002/adem.201900481>.
 8. Radiative energy band gap of nanostructures coupled with quantum emitters around the epsilon-near-zero frequency / Tao Gong [et al.] // Physical Review B. — 2022. — aug. — Vol. 106, no. 8. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.085422>.
 9. Bagherian M., Passian A. Quantum states of cylindrical surface charge density for modeling plasmonic circuit elements: Nanowires, nanorods, cavities, and waveguides // Physical Review A. — 2022. — jun. — Vol. 105, no. 6. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.105.063507>.
 10. Efficient exciton generation in a semiconductor quantum-dot–metal–nanoparticle composite structure using conventional chirped pulses / Dionisis Stefanatos [et al.] // Physical Review A. — 2022. — may. — Vol. 105, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.105.052604>.
 11. Perspectives on advances in quantum dot lasers and integration with Si photonic integrated circuits / Chen Shang [et al.] // ACS Photonics. — 2021. — aug. — Vol. 8, no. 9. — P. 2555–2566. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/acsp Photonics.1c00707>.
 12. Recent developments of quantum dot materials for high speed and ultrafast lasers / Zhonghui Yao [et al.] // Nanomaterials. — 2022. — mar. — Vol. 12, no. 7. — P. 1058. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/nano12071058>.
 13. Edge emitting mode-locked quantum dot lasers / Amit Yadav [et al.] // Progress in Quantum Electronics. — 2023. — jan. — Vol. 87. — P. 100451. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pquantelec.2022.100451>.
 14. 1.5- μm indium phosphide-based quantum dot lasers and optical amplifiers: the impact of atom-like optical gain material for optoelectronics devices / Sven Bauer [et al.] // IEEE Nanotechnology Magazine. — 2021. — apr. — Vol. 15, no. 2. — P. 23–36. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/MNANO.2020.3048103>.
 15. Khan Mohammed Zahed Mustafa, Ng Tien Khee, Ooi Boon S. Self-assembled InAs/InP quantum dots and quantum dashes: material structures and devices // Progress in Quantum Electronics. — 2014. — nov. — Vol. 38, no. 6. — P. 237–313. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pquantelec.2014.11.001>.
 16. Integration of emission-wavelength-controlled InAs quantum dots for ultra-broadband near-infrared light source / Nobuhiko Ozaki [et al.] // Nanomaterials and Nanotechnology. — 2014. — jan. — Vol. 4. — P. 26. — URL: <http://dx.doi.org/10.5772/59315>.

17. Broadband light sources based on InAs/InGaAs metamorphic quantum dots / L. Seravalli [et al.] // Journal of Applied Physics. — 2016. — apr. — Vol. 119, no. 14. — P. 143102–1–143102–8. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4945436>.
18. Optical and electronic properties of symmetric InAs/(In, Al, Ga)As/InP quantum dots formed by ripening in molecular beam epitaxy: a potential system for broad-range single-photon telecom emitters / P. Holewa [et al.] // Physical Review Applied. — 2020. — dec. — Vol. 14, no. 6. — P. 064054–1–064054–13. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.064054>.
19. Monolithic hybrid mode-locked 1.3 μm semiconductor lasers / P. A. Morton [et al.] // Applied Physics Letters. — 1990. — jan. — Vol. 56, no. 2. — P. 111–113. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.103046>.
20. Actively mode-locked semiconductor lasers / J. E. Bowers [et al.] // IEEE Journal of Quantum Electronics. — 1989. — jun. — Vol. 25, no. 6. — P. 1426–1439. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/3.29278>.
21. Transform-limited 1.4 ps optical pulses from a monolithic colliding-pulse mode-locked quantum well laser / M. C. Wu [et al.] // Applied Physics Letters. — 1990. — aug. — Vol. 57, no. 8. — P. 759–761. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.103413>.
22. Sub-picosecond 38 W optical pulses from a hybrid mode locked semiconductor laser system / P. J. Delfyett [et al.] // Ultrafast Phenomena VII. — Springer Berlin Heidelberg, 1990. — P. 78–80. — ISBN: 9783642842696. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-84269-6_25.
23. Delfyett P. J., Silberberg Y., Alphonse G. A. Hot-carrier thermalization induced self-phase modulation in semiconductor traveling wave amplifiers // Applied Physics Letters. — 1991. — jul. — Vol. 59, no. 1. — P. 10–12. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.105561>.
24. 200-fs optical pulse generation and intracavity pulse evolution in a hybrid mode-locked semiconductor diode-laser/amplifier system / Peter J. Delfyett [et al.] // Optics Letters. — 1992. — may. — Vol. 17, no. 9. — P. 670. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OL.17.000670>.

Сведения об авторах:

Ольга Николаевна Захарова — студент магистратуры факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.


E-mail: zkhrvolly@gmail.com


ORCID iD  0000-0003-4052-3212

Web of Science ResearcherID  АВВ-9746-2021

Арина Станиславовна Федотова — студент лица ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: farista2006@mail.ru

ORCID iD  0000-0003-2897-6390

Web of Science ResearcherID  HGB-1329-2022

Original article
 PACS 42.25.Bs
 OCIS 310.6628
 MSC 00A79

Investigation of directed optical emission of quantum dots in nanomaterial

O. N. Zakharova , A. S. Fedotova 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted October 9, 2023
 Resubmitted October 11, 2023
 Published December 12, 2023

Abstract. The physical features of the description of the radiation of a system of quantum dots in a nanomaterial are discussed. It is proposed to use a theoretical model to calculate the intensity of optical radiation from a system of quantum dots in a nanomaterial.

Keywords: quantum dot, nanomaterial, optical radiation, radiation intensity

References

1. Core@Double-shell structured BaTiO₃-polymer nanocomposites with high dielectric constant and low dielectric loss for energy storage application / Liyuan Xie [et al.] // *The Journal of Physical Chemistry C*. — 2013. — oct. — Vol. 117, no. 44. — P. 22525–22537. — URL: <https://doi.org/10.1021/jp407340n>.
2. Dielectric, mechanical and thermal properties of all-organic PI/PSF composite films by in situ polymerization / Peng Li [et al.] // *e-Polymers*. — 2020. — jan. — Vol. 20, no. 1. — P. 226–232. — URL: <https://doi.org/10.1515/epoly-2020-0020>.
3. Lee Ji-Won, Koh Jung-Hyuk. Enhanced dielectric properties of Ag-doped CCTO ceramics for energy storage devices // *Ceramics International*. — 2017. — aug. — Vol. 43, no. 12. — P. 9493–9497. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.04.130>.
4. Flexible hdC-G reinforced polyimide composites with high dielectric permittivity / Xiaojian Liao [et al.] // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. — 2017. — oct. — Vol. 101. — P. 50–58. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.011>.
5. High energy density nanocomposites based on surface-modified BaTiO₃ and a ferroelectric polymer / Philseok Kim [et al.] // *ACS Nano*. — 2009. — aug. — Vol. 3, no. 9. — P. 2581–2592. — URL: <https://doi.org/10.1021/nn9006412>.
6. Highly foldable PANi@CNTs/PU dielectric composites toward thin-film capacitor application / Wenhui Xu [et al.] // *Materials Letters*. — 2017. — apr. — Vol. 192. — P. 25–28. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.01.064>.

7. Silicone elastomers with high-permittivity ionic liquids loading / Xue Liu [et al.] // *Advanced Engineering Materials*. — 2019. — aug. — Vol. 21, no. 10. — URL: <https://doi.org/10.1002/adem.201900481>.
8. Radiative energy band gap of nanostructures coupled with quantum emitters around the epsilon-near-zero frequency / Tao Gong [et al.] // *Physical Review B*. — 2022. — aug. — Vol. 106, no. 8. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.085422>.
9. Bagherian M., Passian A. Quantum states of cylindrical surface charge density for modeling plasmonic circuit elements: Nanowires, nanorods, cavities, and waveguides // *Physical Review A*. — 2022. — jun. — Vol. 105, no. 6. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.105.063507>.
10. Efficient exciton generation in a semiconductor quantum-dot–metal-nanoparticle composite structure using conventional chirped pulses / Dionisis Stefanatos [et al.] // *Physical Review A*. — 2022. — may. — Vol. 105, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.105.052604>.
11. Perspectives on advances in quantum dot lasers and integration with Si photonic integrated circuits / Chen Shang [et al.] // *ACS Photonics*. — 2021. — aug. — Vol. 8, no. 9. — P. 2555–2566. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/acsp Photonics.1c00707>.
12. Recent developments of quantum dot materials for high speed and ultrafast lasers / Zhonghui Yao [et al.] // *Nanomaterials*. — 2022. — mar. — Vol. 12, no. 7. — P. 1058. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/nano12071058>.
13. Edge emitting mode-locked quantum dot lasers / Amit Yadav [et al.] // *Progress in Quantum Electronics*. — 2023. — jan. — Vol. 87. — P. 100451. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pquantelec.2022.100451>.
14. 1.5- μm indium phosphide-based quantum dot lasers and optical amplifiers: the impact of atom-like optical gain material for optoelectronics devices / Sven Bauer [et al.] // *IEEE Nanotechnology Magazine*. — 2021. — apr. — Vol. 15, no. 2. — P. 23–36. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/MNANO.2020.3048103>.
15. Khan Mohammed Zahed Mustafa, Ng Tien Khee, Ooi Boon S. Self-assembled InAs/InP quantum dots and quantum dashes: material structures and devices // *Progress in Quantum Electronics*. — 2014. — nov. — Vol. 38, no. 6. — P. 237–313. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pquantelec.2014.11.001>.
16. Integration of emission-wavelength-controlled InAs quantum dots for ultra-broadband near-infrared light source / Nobuhiko Ozaki [et al.] // *Nanomaterials and Nanotechnology*. — 2014. — jan. — Vol. 4. — P. 26. — URL: <http://dx.doi.org/10.5772/59315>.
17. Broadband light sources based on InAs/InGaAs metamorphic quantum dots / L. Seravalli [et al.] // *Journal of Applied Physics*. — 2016. — apr. — Vol. 119, no. 14. — P. 143102–1–143102–8. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4945436>.
18. Optical and electronic properties of symmetric InAs/(In, Al, Ga)As/InP quantum dots formed by ripening in molecular beam epitaxy: a potential system for broad-range single-photon telecom emitters / P. Holewa [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2020. — dec. — Vol. 14, no. 6. — P. 064054–1–064054–13. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.064054>.

19. Monolithic hybrid mode-locked 1.3 μm semiconductor lasers / P. A. Morton [et al.] // Applied Physics Letters. — 1990. — jan. — Vol. 56, no. 2. — P. 111–113. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.103046>.
20. Actively mode-locked semiconductor lasers / J. E. Bowers [et al.] // IEEE Journal of Quantum Electronics. — 1989. — jun. — Vol. 25, no. 6. — P. 1426–1439. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/3.29278>.
21. Transform-limited 1.4 ps optical pulses from a monolithic colliding-pulse mode-locked quantum well laser / M. C. Wu [et al.] // Applied Physics Letters. — 1990. — aug. — Vol. 57, no. 8. — P. 759–761. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.103413>.
22. Sub-picosecond 38 W optical pulses from a hybrid mode locked semiconductor laser system / P. J. Delfyett [et al.] // Ultrafast Phenomena VII. — Springer Berlin Heidelberg, 1990. — P. 78–80. — ISBN: 9783642842696. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-84269-6_25.
23. Delfyett P. J., Silberberg Y., Alphonse G. A. Hot-carrier thermalization induced self-phase modulation in semiconductor traveling wave amplifiers // Applied Physics Letters. — 1991. — jul. — Vol. 59, no. 1. — P. 10–12. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.105561>.
24. 200-fs optical pulse generation and intracavity pulse evolution in a hybrid mode-locked semiconductor diode-laser/amplifier system / Peter J. Delfyett [et al.] // Optics Letters. — 1992. — may. — Vol. 17, no. 9. — P. 670. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OL.17.000670>.

Information about authors:

Olga Nikolaevna Zakharova — Master’s student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: zkhrvolly@gmail.com

ORCID iD  0000-0003-4052-3212

Web of Science ResearcherID  ABB-9746-2021

Arina Stanislavovna Fedotova — lyceum student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: farista2006@mail.ru

ORCID iD  0000-0003-2897-6390

Web of Science ResearcherID  HGB-1329-2022