

Научная статья
УДК 535.337
ББК 22.343
ГРНТИ 29.31.15
БАК 1.3.6.
PACS 42.25.Bs
OCIS 260.2110
MSC 78A10

Исследование физических свойств светоизлучающих структур с квантовыми точками

П. А. Мащенко  ¹

Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис»,
420500, Иннополис, Республика Татарстан, Россия

Поступила в редакцию 11 февраля 2025 года

После переработки 12 февраля 2025 года

Опубликована 31 марта 2025 года

Аннотация. Рассматриваются физические свойства излучающих структур с квантовыми точками. Проведены численные расчёты физических характеристик излучающих структур с квантовыми точками. Исследовано влияние различных параметров структур на интенсивность излучения света структурами с квантовыми точками. Показано, что изменение внешнего напряжения, действующего на массив квантовых точек, может существенно влиять на интенсивность излучения света.

Ключевые слова: оптическое излучение, свет, интенсивность, дисплей, квантовая точка, массив квантовых точек, наноструктура с квантовыми точками, светодиод

Введение

В современном мире технологии развиваются с невероятной скоростью, и одним из самых ярких примеров является разработка и внедрение новых типов дисплеев. Одной из наиболее перспективных технологий в области создания новых типов дисплеев является применение структур с квантовыми точками. Квантовые точки представляют собой наноразмерные полупроводниковые кристаллы, которые обладают уникальными оптическими свойствами. Квантовые точки способны излучать свет при определённых условиях, что делает их идеальными кандидатами для использования в качестве элементов дисплеев на основе светодиодов на квантовых точках. Актуальность исследования обусловлена развитием технологий в области нанoeлектроники и оптоэлектроники, а также растущим спросом на создание новых типов дисплеев с улучшенными характеристиками яркости, контрастности и цветовой гаммы.

Целью работы является исследование физических свойств излучающих структур с квантовыми точками и их влияния на оптические и электрические характеристики структур, а также определение возможностей использования этих свойств для создания высокоэффективных дисплеев на основе светодиодов на квантовых точках.

¹E-mail: ulpam2005@gmail.com

Задачи работы заключаются в исследовании оптических свойств структур с квантовыми точками с учётом влияния различных параметров структур на интенсивность и спектр излучения света, разработке теоретического подхода для описания физических свойств структур с квантовыми точками для улучшения характеристик дисплеев на основе светодиодов на квантовых точках.

Научная новизна исследования состоит в том, что впервые проведено численное исследование физических характеристик наноструктур с массивами квантовых точек с выбранными значениями параметров.

Гипотеза исследования заключается в том, что если использовать структуры с квантовыми точками, то можно создать высокоэффективные дисплеи на основе светодиодов на квантовых точках, обладающие уникальными физическими свойствами.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что исследование вносит вклад в понимание физических процессов, происходящих в структурах с квантовыми точками при изменении внешнего напряжения, действующего на массив квантовых точек. Размещение квантовых точек на подложке из кремния позволяет улучшить эффективность излучения света и увеличить яркость дисплея. Практическая значимость исследования состоит в том, что результаты исследования полупроводниковых материалов для наноструктур с квантовыми точками могут быть использованы при разработке новых технологий создания дисплеев на основе светодиодов на квантовых точках с улучшенными характеристиками в зависимости от формы и расположения квантовых точек.

Обзор

На интенсивность излучения светодиодов существенное влияние оказывают как напряжение, так и температура, о чем свидетельствуют различные научные исследования. Зависимость между напряжением и излучаемой оптической мощностью, как правило, линейная, причем оптическая мощность увеличивается пропорционально току, в то время как она уменьшается экспоненциально с ростом температуры перехода [1]. В статье [1] предлагается теоретическая модель оптической мощности мощных белых светодиодных устройств, которая учитывает совместное влияние тока и температуры перехода на излучаемую оптическую мощность. В статье [1] основное внимание уделяется зависимости оптической мощности от температуры перехода и тока, предлагая модель для оценки производительности светодиода без детализации эффектов напряжения. Кроме того, тепловое поведение светодиодов показывает, что кривые равной интенсивности в плоскости ток-напряжение остаются почти линейными в широком диапазоне температур, что позволяет предположить, что эффективное управление температурой может стабилизировать световой поток, несмотря на колебания температуры [2]. В статье [2] показано, что кривые равной интенсивности в плоскости ток-напряжение диодов представляют собой почти прямую линию в очень широком диапазоне температур. Интенсивность излучения светодиода изменяется экспоненциально с температурой и линейно с прямым током диода, на который влияют смещённое вперед напряжение диода и температура. В статье [2] показано, что кривые равной интенсивности остаются почти прямыми в широком диапазоне температур, обеспечивая постоянный световой поток. Кроме того, комплексная модель, объединяющая фотометрические, электрические и тепловые характеристики, показывает, что оптимальный световой поток не всегда достигается при номинальной мощности, что подчеркивает важность теплового проектирования для максимизации производительности [3]. В статье [3] представлена общая теория, связывающая фотометрические, электрические и тепловые характеристики светодиодной системы, которая может быть использована для определения оптимальной рабочей точки для светодиодной системы, чтобы максимальный световой поток мог

быть достигнут для заданной тепловой конструкции. В статье [3] обсуждается, как тепловая конструкция существенно влияет на электрическую схему светодиодной системы, влияя на пиковую световую отдачу. В целом, понимание этих взаимозависимостей имеет решающее значение для оптимизации применения светодиодов в различных условиях [4, 5]. В статье [4] спектральный поток излучения коммерческих одноцветных светодиодных корпусов измерялся в изготовленной на заказ интегрирующей сфере при нескольких температурах перехода путём активного охлаждения и нагрева с помощью элемента Пельтье. В статье [4] основное внимание уделяется моделированию спектрального потока излучения светодиодов относительно температуры перехода, включая такие факторы, как изменение температуры носителей и сдвиг энергии запрещённой зоны. В статье [5] основное внимание уделяется разработке ламбертовских светодиодов для стандартов с низким потоком излучения и их применению в количественных измерениях интенсивности люминесценции. Результаты продемонстрировали полезность и применимость стандартов светодиодов в количественных измерениях интенсивности люминесценции в источниках с низким потоком излучения ламбертовского типа [5]. В статье [6] рассмотрено влияние температуры на электрические и световые параметры светодиодов с различными типами драйверов в составе светодиодных осветительных приборов, таких как светодиодные лампы и светодиодные прожекторы, с целью предложения возможных конструктивных решений для частичного снижения или устранения проблемы снижения светового потока светодиодных приборов в условиях их эксплуатации при высоких температурах. В работе [6] указано, что интенсивность излучения светодиодов снижается с ростом температуры, несмотря на постоянный ток. Это снижение объясняется безызлучательной рекомбинацией и другими физическими процессами, подчеркивающими сложную взаимосвязь между напряжением, температурой и производительностью светодиодов [6]. В работе [7] было рассмотрено влияние изменения тепловых граничных условий на световое излучение светодиода, и был дан обобщённый процесс расчёта для реализации. В работе [7] обсуждается, что световой выход светодиода, включая интенсивность излучения, зависит от прямого напряжения и температуры перехода. Эта взаимосвязь является сложной, требующей итеративных расчётов прямого напряжения, рассеивания тепла и температуры для эффективного определения светового потока. В статье [8] расширение уравнения светового выхода было использовано для оценки светового потока и эффективности маломощного поверхностного светодиода, а также были определены оптимизированные условия эксплуатации тестируемого светодиода. В статье [8] основное внимание уделяется световому потоку и эффективности, связанным с током инжекции и температурой окружающей среды, подчеркивая связь между световым потоком и температурой перехода. В статье [9] световая эффективность светодиода белого света высокой мощности при различных температурах и токах драйвера измеряется с помощью анализатора фотометрических, хроматических и электрических характеристик. В статье [9] основное внимание уделяется изменениям световой эффективности в зависимости от температуры и тока драйвера, что указывает на снижение эффективности с ростом температуры и тока. В статье [10] наблюдалась температурная зависимость электрических и оптических свойств алмазных светодиодов от температуры и показано, что внешняя квантовая эффективность светодиодов увеличивается с ростом температуры, что является обратной тенденцией температурой зависимости коммерчески доступных светодиодов.

Квантовые точки являются привлекательным материалом для лазерных диодов, обрабатываемых в растворе, благодаря длинам волн излучения с контролируемым размером, низким порогами оптического усиления и простоте интеграции с фотонными и электронными схемами [11]. В статье [11] обсуждаются проблемы достижения усиленного спонтанного излучения из коллоидных квантовых точек с электрической накачкой. В

статье [11] упоминается использование компактных, непрерывно градуированных квантовых точек с подавленной Оже-рекомбинацией и фотонного волновода с низкими потерями для достижения сильного широкополосного оптического усиления. Квантовые точки могут обеспечить широкое разнообразие цветов в светодиодах, регулируя их размер и состав [12]. Нанокристаллы теллурида ртути (HgTe) обладают широкими резонансами ТГц поглощения и могут использоваться для генерации терагерцовых импульсов и микроскопических исследований [13]. Квантовые точки CdSe, внедрённые в нанопроволоки (Zn,Mg)Se, действуют, как однофотонные эмиттеры в сине-зеленом диапазоне и были охарактеризованы при криогенной температуре [14]. Квантовые точки предлагают преимущества для построения сетей квантовой связи, включая внутреннюю квантовую эффективность, близкую к единице, и способность излучать одиночные фотоны высокой чистоты с почти ограниченным преобразованием Фурье и запутанные фотоны [15]. В статье [15] обсуждается разработка квантовых точек на основе InP, которые излучают одиночные фотоны с длиной волны 1550 нм, что находится в диапазоне длин волн телекоммуникационного диапазона. В статье [16] обсуждается спектр излучения квантовых точек в фотонно-кристаллических микрорезонаторах и поддерживается теория квантовой электродинамики резонаторов. В статье [16] упоминается, что излучение квантовой точки в микрорезонаторе отличается от излучения в объёмном полупроводнике и зависит от поляризации. Асимметрия спектра излучения объясняется интерференцией оптических мод в свободном пространстве и в полости.

Проведённый анализ литературы показывает актуальность исследования физических свойств излучающих структур с квантовыми точками.

Теоретическая модель

Теоретическая модель интенсивности излучения светодиода как функции напряжения и температуры объединяет различные факторы, влияющие на выходную оптическую мощность. Теоретическая модель интенсивности излучения светодиодов как функции напряжения и температуры включает нелинейные эффекты посредством различных механизмов, в первую очередь фокусируясь на взаимодействии между температурой, плотностью тока и квантовой эффективностью. Теоретическое моделирование интенсивности излучения светодиодов в зависимости от напряжения и температуры в различных условиях окружающей среды поддерживается несколькими комплексными подходами. Интенсивность излучения массива квантовых точек из GaN в наноструктуре, расположенной на подложке из кремния, будем вычислять по формуле:

$$I(\hbar\omega) = \frac{\hbar\omega}{\hbar\omega - E_g^{\text{eff}}} \frac{\hbar\omega - eU}{\exp\left(\frac{\hbar\omega - eU}{mk_B T}\right)} \exp\left(-\frac{4}{3} \left(\frac{\hbar\omega - E_g^{\text{eff}}}{E_0}\right)\right), \quad (1)$$

$$E_g^{\text{eff}} = E_{g0} - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} + \frac{\hbar^2 \xi_n^2}{8m_R r_0}, \quad (2)$$

$$E_0 = \left(\frac{\hbar e \mathcal{E}_{\text{ext}}}{\sqrt{2m_{cv}^*}}\right)^{\frac{2}{3}}, \quad (3)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ext}}$ – напряжённость внешнего электрического поля, r_0 – радиус квантовой точки, ξ_n – нули функции Бесселя, k_B – постоянная Больцмана. Таким образом, теоретическая модель интенсивности излучения светодиодов как функции напряжения и температуры эффективно фиксирует сложные соотношения, управляющие производительностью светодиодов в различных условиях эксплуатации.

Результаты численных расчётов

Далее вычислим интенсивность излучения наноструктуры с квантовыми точками из GaN как функцию длины волны оптического излучения по формуле (1) при различных значениях внешнего управляющего напряжения. Для проведения численных расчётов выбраны следующие параметры: $E_{g0} = 3.470$ эВ, $\alpha = 7.70$ эВ, $\beta = 600$ К. Эффективные массы носителей заряда $m_c^* = 0.17m_e$, $m_v^* = 0.42m_e$. Отношение эффективных масс $m = m_c^*/m_{cv}^*$. Результаты численных расчётов интенсивности излучения наноструктуры с квантовыми точками из GaN от длины волны оптического излучения при различных значениях внешнего управляющего напряжения представлены на рис. 1.

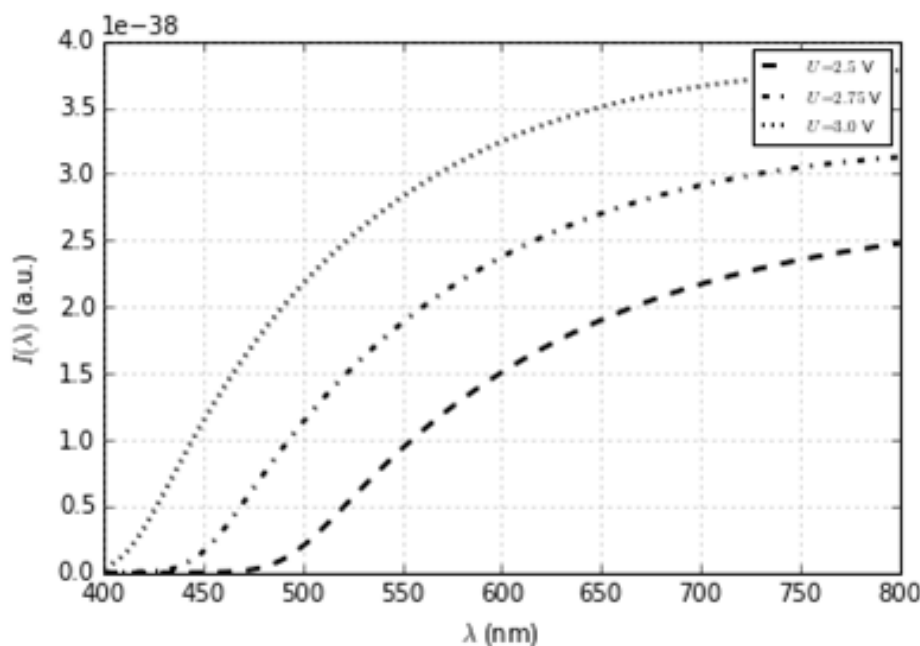


Рис. 1. Интенсивность излучения наноструктуры с квантовыми точками из GaN от длины волны оптического излучения при различных значениях внешнего управляющего напряжения.

Расположение квантовых точек в структуре играет важную роль в определении оптических свойств. Установлено, что изменение внешнего напряжения, действующего на массив квантовых точек, может существенно влиять на интенсивность излучения света. Полученные данные могут быть полезны для создания более эффективных и ярких дисплеев на основе светодиодов на квантовых точках с улучшенными характеристиками излучения света.

Заключение

Исследование физических свойств структур с квантовыми точками является важным шагом в развитии технологии дисплеев на основе светодиодов на квантовых точках и открывает новые перспективы для создания более эффективных и экономичных устройств отображения информации. Исследование расширяет теоретические представления о возможностях использования наноструктур с квантовыми точками в различных областях оптоэлектроники. Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых методов управления оптическими и электрическими свойствами структур с квантовыми точками. Применение структур с квантовыми точками открывает новые возможности для разработки дисплеев на основе светодиодов на квантовых точках.

Гипотеза исследования, заключающаяся в том, что если использовать структуры с квантовыми точками, то можно создать высокоэффективные дисплеи на основе светодиодов на квантовых точках, обладающие уникальными физическими свойствами, подтверждена полностью.

Задачи работы решены полностью.

Теоретическая модель интенсивности излучения светодиодов, основанная на фототермической теории, точно предсказывает связь между напряжением, температурой, температурой перехода и оптическими свойствами. Теоретическая модель интенсивности излучения светодиодов эффективно фиксирует тепловые эффекты и оптические характеристики светодиодных систем.

Результаты исследования полупроводниковых материалов для наноструктур с квантовыми точками могут быть использованы в процессе разработке новых технологий создания дисплеев на основе светодиодов на массивах с квантовыми точками с улучшенными характеристиками в зависимости от формы и расположения квантовых точек.

Список использованных источников

1. Tao Xuehui. Performance characterization and theoretical modeling of emitted optical power for high-power white-LED devices // IEEE Transactions on electron devices. — 2015. — may. — Vol. 62, no. 5. — P. 1511–1515. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TED.2015.2410032>.
2. Bera S. C., Singh R. V., Garg V. K. Temperature behavior and compensation of light-emitting diode // IEEE Photonics technology letters. — 2005. — nov. — Vol. 17, no. 11. — P. 2286–2288. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2005.858154>.
3. Hui S. Y., Qin Y. X. A general photo-electro-thermal theory for light emitting diode (LED) systems // IEEE Transactions on power electronics. — 2009. — aug. — Vol. 24, no. 8. — P. 1967–1976. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2009.2018100>.
4. Modeling high power light-emitting diode spectra and their variation with junction temperature / A. Keppens [et al.] // Journal of applied physics. — 2010. — aug. — Vol. 108, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3463411>.
5. Light-emitting-diode Lambertian light sources as low-radiant-flux standards applicable to quantitative luminescence-intensity imaging / Masahiro Yoshita [et al.] // Review of scientific instruments. — 2017. — sep. — Vol. 88, no. 9. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5001733>.
6. Operation of electronic devices for controlling LED light sources when the environment temperature changes / Iryna Belyakova [et al.] // Applied system innovation. — 2023. — may. — Vol. 6, no. 3. — P. 57. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/asi6030057>.
7. Biber Cathy. LED light emission as a function of thermal conditions // 2008 Twenty-fourth annual IEEE semiconductor thermal measurement and management symposium. — IEEE, 2008. — mar. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/STHERM.2008.4509387>.
8. Estimation of luminous flux and luminous efficacy of low-power SMD LED as a function of injection current and ambient temperature / Muna E. Raypah [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. — 2016. — jul. — Vol. 63, no. 7. — P. 2790–2795. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TED.2016.2556079>.

9. Rao Feng, Ge Zhi Chen, Zhu Jin Lian. Effect of temperature and current on luminous efficiency of high power LED // Advanced materials research. — 2011. — oct. — Vol. 347-353. — P. 310–313. — URL: <http://dx.doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.347-353.310>.
10. Unique temperature dependence of deep ultraviolet emission intensity for diamond light emitting diodes / Daisuke Kuwabara [et al.] // Japanese journal of applied physics. — 2014. — apr. — Vol. 53, no. 5S1. — P. 05FP02. — URL: <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.53.05FP02>.
11. Electrically driven amplified spontaneous emission from colloidal quantum dots / Namyoung Ahn [et al.] // Nature. — 2023. — may. — Vol. 617, no. 7959. — P. 79–85. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-023-05855-6>.
12. Armaselu Anca, Jangid Monika. Application of quantum dots in light-emitting diodes // Quantum Dots. — Elsevier, 2023. — P. 205–244. — ISBN: 9780128241530. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-824153-0.00010-0>.
13. Coherent THz wave emission from HgTe quantum dots / T. Apretna [et al.] // Applied Physics Letters. — 2022. — dec. — Vol. 121, no. 25. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/5.0134396>.
14. Quantitative analysis of the blue-green single-photon emission from a quantum dot in a thick tapered nanowire / Saransh Raj Gosain [et al.] // Physical Review B. — 2022. — dec. — Vol. 106, no. 23. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.106.235301>.
15. Benyoucef Mohamed, Musial Anna. Telecom wavelengths InP-based quantum dots for quantum communication // Photonic quantum technologies. — 2023. — may. — P. 463–507. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/9783527837427.ch18>.
16. Wells Sarah. Explaining asymmetric emission from quantum dots // Physics. — 2022. — may. — Vol. 15. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physics.15.s64>.

Сведения об авторах:

Павел Антонович Мащенко — студент факультета компьютерных и инженерных наук Автономной некоммерческой организации высшего образования «Университет Иннополис», 420500, Иннополис, Республика Татарстан, Россия.

E-mail: ulpam2005@gmail.com

ORCID iD  0009-0004-7603-444X

Web of Science ResearcherID  JQW-3640-2023

Original article
 PACS 42.25.Bs
 OCIS 260.2110
 MSC 78A10

Investigation of physical properties of light-emitting structures with quantum dots

P. A. Mashchenko 

Autonomous Non-Commercial Organization of Higher Education “Innopolis University”, 420500, Innopolis, Republic of Tatarstan, Russia

Submitted February 11, 2025
 Resubmitted February 12, 2025
 Published March 31, 2025

Abstract. The physical properties of emitting structures with quantum dots are considered. Numerical calculations of the physical characteristics of emitting structures with quantum dots are performed. The influence of various structure parameters on the intensity of light emission by structures with quantum dots is investigated. It is shown that a change in the external voltage acting on the array of quantum dots can significantly affect the intensity of light emission.

Keywords: optical radiation, light, intensity, display, quantum dot, quantum dot array, quantum dot nanostructure, light-emitting diode

References

1. Tao Xuehui. Performance characterization and theoretical modeling of emitted optical power for high-power white-LED devices // IEEE Transactions on electron devices. — 2015. — may. — Vol. 62, no. 5. — P. 1511–1515. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TED.2015.2410032>.
2. Bera S. C., Singh R. V., Garg V. K. Temperature behavior and compensation of light-emitting diode // IEEE Photonics technology letters. — 2005. — nov. — Vol. 17, no. 11. — P. 2286–2288. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2005.858154>.
3. Hui S. Y., Qin Y. X. A general photo-electro-thermal theory for light emitting diode (LED) systems // IEEE Transactions on power electronics. — 2009. — aug. — Vol. 24, no. 8. — P. 1967–1976. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2009.2018100>.
4. Modeling high power light-emitting diode spectra and their variation with junction temperature / A. Keppens [et al.] // Journal of applied physics. — 2010. — aug. — Vol. 108, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3463411>.
5. Light-emitting-diode Lambertian light sources as low-radiant-flux standards applicable to quantitative luminescence-intensity imaging / Masahiro Yoshita [et al.] // Review of scientific instruments. — 2017. — sep. — Vol. 88, no. 9. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5001733>.

6. Operation of electronic devices for controlling LED light sources when the environment temperature changes / Iryna Belyakova [et al.] // Applied system innovation. — 2023. — may. — Vol. 6, no. 3. — P. 57. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/asi6030057>.
7. Biber Cathy. LED light emission as a function of thermal conditions // 2008 Twenty-fourth annual IEEE semiconductor thermal measurement and management symposium. — IEEE, 2008. — mar. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/STHERM.2008.4509387>.
8. Estimation of luminous flux and luminous efficacy of low-power SMD LED as a function of injection current and ambient temperature / Muna E. Raypah [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. — 2016. — jul. — Vol. 63, no. 7. — P. 2790–2795. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TED.2016.2556079>.
9. Rao Feng, Ge Zhi Chen, Zhu Jin Lian. Effect of temperature and current on luminous efficiency of high power LED // Advanced materials research. — 2011. — oct. — Vol. 347–353. — P. 310–313. — URL: <http://dx.doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.347-353.310>.
10. Unique temperature dependence of deep ultraviolet emission intensity for diamond light emitting diodes / Daisuke Kuwabara [et al.] // Japanese journal of applied physics. — 2014. — apr. — Vol. 53, no. 5S1. — P. 05FP02. — URL: <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.53.05FP02>.
11. Electrically driven amplified spontaneous emission from colloidal quantum dots / Namyoung Ahn [et al.] // Nature. — 2023. — may. — Vol. 617, no. 7959. — P. 79–85. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-023-05855-6>.
12. Armaselu Anca, Jangid Monika. Application of quantum dots in light-emitting diodes // Quantum Dots. — Elsevier, 2023. — P. 205–244. — ISBN: 9780128241530. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-824153-0.00010-0>.
13. Coherent THz wave emission from HgTe quantum dots / T. Apretna [et al.] // Applied Physics Letters. — 2022. — dec. — Vol. 121, no. 25. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/5.0134396>.
14. Quantitative analysis of the blue-green single-photon emission from a quantum dot in a thick tapered nanowire / Saransh Raj Gosain [et al.] // Physical Review B. — 2022. — dec. — Vol. 106, no. 23. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.106.235301>.
15. Benyoucef Mohamed, Musial Anna. Telecom wavelengths InP-based quantum dots for quantum communication // Photonic quantum technologies. — 2023. — may. — P. 463–507. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/9783527837427.ch18>.
16. Wells Sarah. Explaining asymmetric emission from quantum dots // Physics. — 2022. — may. — Vol. 15. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physics.15.s64>.

Information about authors:

Pavel Antonovich Mashchenko — student of the Faculty of Computer Science and Engineering of the Autonomous Non-Commercial Organization of Higher Education “Innopolis University”, 420500, Innopolis, Republic of Tatarstan, Russia.

E-mail: ulpam2005@gmail.com

ORCID iD  0009-0004-7603-444X

Web of Science ResearcherID  JQW-3640-2023