

УДК 53
EDN: VNAOQK

PACS: 42.25.Bs

Гибридные структуры интегральной фотоники для направленных микроисточников света на основе диэлектрических волноводов и фотолюминесцентных органических микрокристаллов

© В. Б. Новиков, И. О. Батуев, А. И. Майдыковский, Т. В. Мурзина*

МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, 119991 Россия

*E-mail: murzina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9.04.2026; после доработки 20.05.2026; принята к публикации 06.08.2026
Шифр научной специальности: 1.3.11

Предложен подход к созданию активных структур, позволяющих реализовать направленные микроисточники света за счет сочетания в них (а) волновода с адаптером ввода/вывода излучения изготовленного методом двухфотонной лазерной печати, и (б) излучающего микрокристалла из органического красителя. Показано, что предложенное устройство обеспечивает как возбуждение фотолюминесценции (ФЛ) кристалла излучением, заводимым через волноводную структуру, так и вывод излучения ФЛ кристалла через волновод и адаптер. Эти возможности сохраняются и применительно к резонансным модам Фабри-Перо, возбуждение которых продемонстрировано для случая кристаллов органических красителей, близких по форме к параллелепипеду.

Ключевые слова: фотоника, двухфотонная лазерная печать, органические микрокристаллы.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-4-77-82

Введение

Тенденция к миниатюризации элементов фотоники и фотонных интегральных схем стимулирует поиск новых подходов к их изготовлению и тестированию. В этом аспекте большой интерес представляет метод двухфотонной лазерной печати (ДФЛП), или прямая лазерная печать (direct laser writing), позволяющий изготавливать как планарные, так и трехмерные диэлектрические структуры произвольной формы и, более того, не требующие использования литографических шаблонов [1, 2]. При этом пространственное разрешение ДФЛП может достигать всего нескольких сотен нанометров. Как было отмечено в обзоре [3], к преимуществам ДФЛП относятся относительная простота реализации, отсутствие требования вакуумных условий, возможность изготовления структур в одном цикле (не поэтапно), а главное – печать в трех измерениях объектов произвольной формы. Последнее из

названных отличительных свойств метода ДФЛП позволяет, в частности, (а) печатать трехмерные адаптеры ввода-вывода, позволяющие осуществлять ввод и вывод оптического излучения в направлении нормали к планарной фотонной структуре; а также (б) изготавливать «подвешенные» структуры, расположенные над подложкой [4, 5]. Наконец, на этапе подготовки полимерной композиции для печати возможно вводить в нее различные функциональные добавки – такие, как растворы красителей, фотолюминесцирующие соединения, суспензии наночастиц [6, 7] и проч., в результате формируя качественно новые свойства материалов. Так, в работе [8] реализован однофотонный источник света на основе резонатора Фабри-Перо с наноалмазами; структура изготовлена методом ДФЛП.

Несмотря на то, что технология ДФЛП нуждается в дальнейшем совершенствовании и развитии, уже сейчас можно предложить новые методы для реализации активных

устройств фотоники, одно из которых рассмотрено в данной работе. Он основан на совмещении в одной планарной структуре источника фотолюминесценции (ФЛ) – микрокристалла из органического красителя и системы заведения – вывода излучения в виде адаптера с волноводом, изготовленных методом ДФЛП. Представленные результаты демонстрируют, что размещение ФЛ-микрокристалла на волноводной структуре позволяет реализовать локализованный эффективный источник широкополосной ФЛ в составе планарной фотонной схемы и, наоборот, выводить излучения ФЛ из микрокристалла непосредственно в волновод при сохранении резонансной части спектра. Предложенный подход перспективен для тестирования и генерации микрорезонаторов без использования прецизионных устройств ввода и вывода излучения, требуемых для обеспечения оптической связи устройств.

Экспериментальная часть

Для исследования была изготовлена серия коротких волноводов с адаптером вертикального ввода/вывода излучения; при этом был использован метод ДФЛП, подробно описанный в [9]. Печать проводилась с использованием излучения фемтосекундного лазера с центральной длиной волны 780 нм и длительностью импульса 380 фс; диаметр вокселя при

печати составил приблизительно 0,4 мкм при его высоте менее 0,8 мкм. Материалом для ДФЛП служил гибридный негативный фоторезист OrmoComp, в качестве подложки использованы пластины кристаллического фторида магния.

Изображение одной из изготовленных структур, полученное в оптическом микроскопе, приведено на рис. 1; на вставке показана трехмерная модель структуры, реализованная при печати. Адаптер ввода/вывода излучения состоял из линзы со сферической поверхностью радиусом 9 мкм, обеспечивающей фокусировку излучения в направлении вдоль нормали к поверхности подложки в волновод длиной около 42 мкм, сечение которого составляло $4 \times 4 \text{ мкм}^2$; плоское основание линзы, наклоненное под углом 48° к плоскости подложки, направляло падающий свет в торец волновода за счет эффекта полного внутреннего отражения. Значение этого угла было выбрано для оптимизации условий заведения сходящегося лазерного пучка в волновод. Благодаря наличию контраста показателей преломления между подложкой (1.38) и полимером (1.51) такой волновод поддерживает многомодовый режим распространения излучения в видимом спектральном диапазоне. Для придания адаптеру большей прочности использовано кольцевое основание, увеличивающее площадь контакта структуры с подложкой.

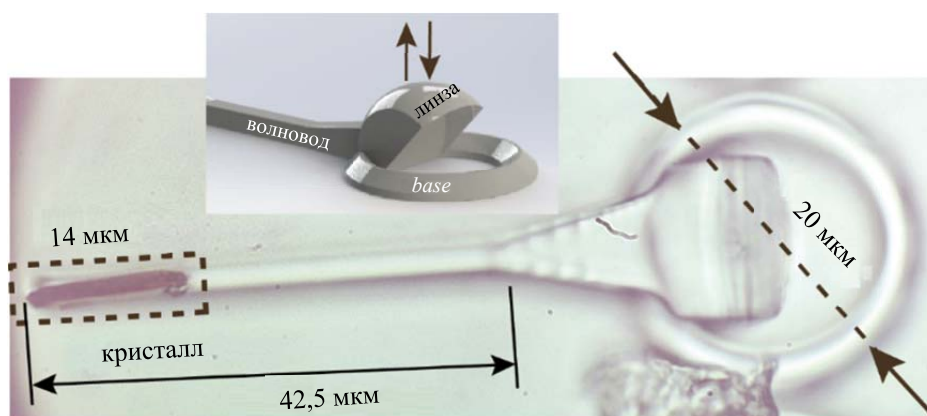


Рис. 1. Изображение в оптическом микроскопе изготовленной структуры волновода с адаптером ввода-вывода излучения. На вставке: модель, использованная при печати методом ДФЛП; стрелками указано направление заведения/выведения излучения

Микрокристаллы из органических красителей DCM или HDMAC были синтезиро-

ваны на отдельных стеклянных подложках методом десублимации из газовой фазы, как

подробно описано в работах [10, 11]. Красители имеют полосу яркой ФЛ в видимом диапазоне спектра. Затем выбранный микрокристалл с помощью химически заточенного оптического волокна [12] был механически отделен от подложки и перемещен в область перед торцом волновода либо на его поверхность. На рис. 1 приведено изображение одной из исследованных структур, в которой микрокристалл красителя HDMAC в виде полоски с размерами $1,2 \times 7 \times 14,2 \text{ мкм}^3$ расположен на конце изготовленного полимерного волновода; его длинная сторона почти параллельна волноводу, а плоскость с хорошей точностью перпендикулярна подложке.

Эксперименты выполнены с использованием метода однофотонно возбуждаемой ФЛ на установке конфокальной микроскопии (см. вставку к рис. 2); в качестве оптической накачки использовалось излучение непрерывного полупроводникового лазера с длиной волны эмиссии 405 нм, сфокусированное объективом Plan Apo 50×/0.55NA в пятно с диаметром около 0,9 мкм. Излучение ФЛ собиралось аналогичным объективом, проходило через систему фильтров, отсекающих излучение накачки, затем сигнал ФЛ от микрокристалла направлялся в спектрометр с субнанометровым спектральным разрешением. Экспериментальная установка позволяла измерять спектры ФЛ в разных точках структуры, пространственно «разводя» области возбуждения и сбора ФЛ сигнала.

Вначале был измерен спектр ФЛ микрокристалла, при этом области облучения и сбора сигнала ФЛ совпадали; соответствующие результаты приведены на рис. 2. Черной кривой показана измеренная спектральная зависимость ФЛ, промодулированная набором резонансных особенностей; спектр микрокристалла за вычетом спектральной зависимости нерезонансной составляющей ФЛ показан фиолетовой линией на рис. 2. На вставке к рисунку показана часть спектра в увеличенном масштабе, приведены длины волн, соответствующие наиболее интенсивным максимумам интенсивности ФЛ, I . Отметим, что в данной схеме эксперимента возбуждению микрорезонаторных мод соответствуют максимумы ФЛ, возникающие из-за рассеяния света на неоднородностях в приповерхност-

ной области структуры. Это относится, в том числе, к модам Фабри-Перо в случае их возбуждения в рассматриваемом микрокристалле; рост интенсивности ФЛ в этом случае является следствием увеличения плотности состояний электромагнитного поля в резонансных условиях [13].

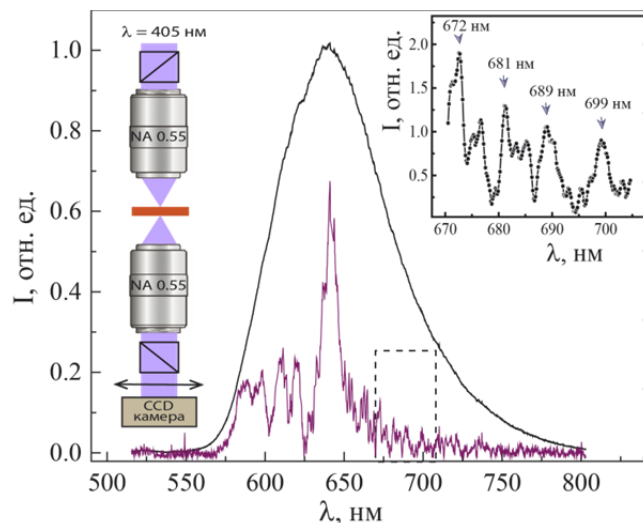


Рис. 2. Спектр интенсивности ФЛ микрокристалла HDMAC, помещенного сверху волновода, измеренный при совмещении областей возбуждения ФЛ и ее регистрации (черная кривая), и выделенный из него спектр микрорезонаторных мод (фиолетовая кривая). На вставке слева – принципиальная схема установки конфокальной оптической микроскопии; справа – спектр выделенных резонансных мод (соответствующая область обведена прямоугольником) в увеличенном масштабе

Для спектра, показанного на вставке к рис. 2, среднее межмодовое расстояние для наиболее выделенных максимумов составляет около 9 нм, что соответствует модам Фабри-Перо, возбуждаемым вдоль длинной стороны микрокристалла ($L = 14,2 \text{ мкм}$) с показателем преломления $n = 1,7$. В этом случае оценки межмодового расстояния для длины волны $\lambda = 670 \text{ нм}$ с использованием выражения $\Delta\lambda \approx \lambda^2 / (2nL)$ дают значение около 9,3 нм, что близко к полученному в эксперименте. С учетом спектральной ширины ФЛ максимумов $\delta\lambda \approx 5 \text{ нм}$ добротность мод $Q = \lambda / \delta\lambda$ составляет около 130. Следует отметить, что сложная структура спектра ФЛ отражает наличие мод Фабри-Перо разных порядков и разных состояний поляризации, а также другие семейства резонаторных мод, которые могут возбуж-

даться вдоль всех трех направлений в микрокристалле с формой параллелепипеда.

На рис. 3 представлены результаты, демонстрирующие способность рассматриваемой структуры выводить излучение ФЛ из микрокристалла, расположенного на торце волновода. В эксперименте лазерный пучок, сфокусированный на микрокристалл, возбуждает в нем ФЛ, при этом регистрируется спектр сигнала на выходе адаптера; в этом случае образец располагался подложкой к лучу накачки, выход адаптера был направлен в сторону собирающего объектива. Форма полученного таким образом спектра интенсивности ФЛ аналогична исходному спектру ФЛ микрокристалла; в то же время параметры выделенных резонансных мод отличаются от представленного на рис. 2, среднее межмодовое расстояние оказалось значительно больше и для наиболее ярко проявленных мод составило около 18 нм (см. вставку к рис. 3). Оценка межмодового расстояния для вертикально ориентированной стороны микрокристалла с $L \approx 7$ мкм для $\lambda = 625$ нм дает значение межмодового расстояния $\approx 16,4$ нм, что близко к экспериментальному значению, при этом добротность $Q \approx 60$. Таким образом, мы предполагаем, что в этом случае наблюдается рассеяние другого вида мод Фабри-Перо – по сравнению с представленными на рис. 2, а именно – осциллирующих вдоль стороны микрокристалла длиной около 7 мкм, расположенной вертикально относительно подложки.

На рис. 3б приведено оптическое изображение структуры при накачке микрокристалла лазерным излучением с $\lambda = 405$ нм, сфокусированным в адаптер, расположенный на рисунке справа (применен отрезающий накачку светофильтр). По ФЛ сигналу подложки (оранжевый цвет) видно относительно небольшое рассеяние света накачки в областях адаптера и сопряжения конусообразной части системы заведения излучения с волноводом, что связано с неоднородностью структуры в этих областях. Наибольшая интенсивность рассеянного излучения наблюдается на выходе из волновода через адаптер. Согласно выполненным расчетам [14] коэффициент пропускания структуры составляет не менее 50 %, тогда как экспериментальное значение пропускания для аналогичной структуры с двумя адаптерами ввода/вывода излучения составило около 14 %.

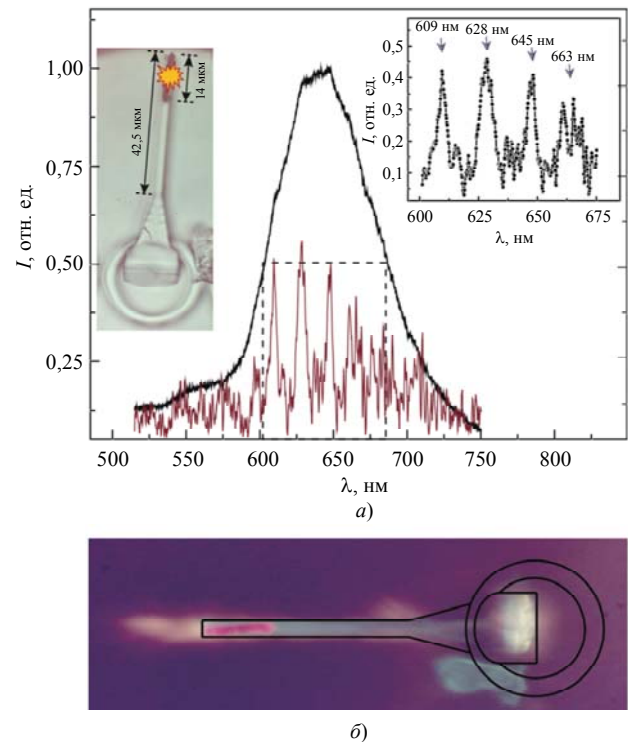


Рис. 3. (а) Спектр излучения (черная кривая) на выходе из адаптера ввода-вывода излучения при возбуждении ФЛ в микрокристалле и выделенный из него спектр мод Фабри-Перо. На вставке справа – в увеличенном масштабе спектр выделенных резонансных мод (соответствующая область обведена прямоугольником). (б) Оптическое изображение структуры при заведении излучения с $\lambda = 405$ нм в адаптер (справа на рисунке)

Наиболее яркое свечение в исследованной структуре соответствует ФЛ микрокристалла красителя, что указывает на его эффективное оптическое возбуждение излучением, распространяющимся через волновод. Для такой геометрии эксперимента спектр ФЛ микрокристалла, зарегистрированный напрямую из области его расположения, аналогичен приведенному на рис. 2. Следует отметить, что при мощности возбуждающего излучения до 0,5 мВт не наблюдалось фотодегradации микрокристалла в течение по крайней мере десятков минут, что соответствует результатам предыдущих исследований [11].

Заключение

Таким образом, в настоящей работе предложен подход к созданию активных фотонных структур, объединяющий потенциал метода двухфотонной лазерной печати для создания полимерных волноводов и устройств ввода и вывода оптического излучения, и

микрорезонаторов с высоким выходом ФЛ. Показана возможность эффективного оптического возбуждения ФЛ микрокристалла красителя (например, HDMAC), расположенного на поверхности волновода, при этом в зависимости от метода регистрации ФЛ отклика наблюдаются разные семейства резонансных мод. А именно, в сигнале ФЛ, рассеянной на микрокристалле, преимущественно детектируются моды Фабри-Перо, распространяющиеся без контакта с волноводом (параллельно подложке), тогда как через волновод эффективно проходит и регистрируется сигнал от мод Фабри-Перо, максимально связанных с полимерной структурой.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда,
грант № 24-42-02009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zyla G., Farsari M. / *Laser Photonics Rev.* 2024. Vol. 18. P. 2301312 (30).
<https://doi.org/10.1002/lpor.202301312>.
2. Arun Jaiswal, Chandresh Kumar Rastogi, Sweta Rani, Gaurav Pratap Singh, Sumit Saxena, Shobha Shukla / *iScience*. 2023. Vol. 26. P. 106374 (30).
<https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106374>.
3. Kawata S., Sun H. B., Tanaka T., Takada K. / *Nature*. 2001. Vol. 412. P. 697–698.
<https://doi.org/10.1038/35089130>.
4. Serbin J., Egbert A., Ostendorf A., Chichkov B. N., Houbertz R., Domann G., Schulz J., Cronauer C., Fröhlich L., Popall M. / *Opt. Lett.* 2003. Vol. 28. P. 301–303.
5. Flynn C., Cao H., Applegate B. E., Tkaczyk T. S. / *Opt. Express*. 2023. Vol. 31. P. 26323–26334.
<https://doi.org/10.1364/OE.495363>.
6. Peng Y., Jradi S., Yang X., Dupont M., Hamie F., Dinh X. Q., Sun X. W., Xu T., Bachelot R. / *Advanced Materials Technologies*. 2019. Vol. 4. № 2. P. 1800522.
7. Yu Y., Prudnikau A., Lesnyak V., Kirchner R. / *Advanced Materials*. 2023. Vol. 35. № 29. P. 2211702.
<https://doi.org/10.1002/adma.202211702>
8. Майдыковский А. И., Апостолов Д. О., Мамоннов Е. А., Копылов Д. А., Дагесян С. А., Мурзина Т. В. / *Письма в ЖЭТФ*. 2023. Т. 117. Вып. 1. С. 37–42.
<https://doi.org/10.31857/S1234567823010044>
9. Ortiz-Huerta F., Chen L., Taverne M., Had-den J. P., Johnson M., Ho Y. L. D., Rarity J. G. / *Opt. Express*. 2018. Vol. 26. P. 33245–33252.
<https://doi.org/10.1364/oe.26.033245>.
10. Mamonov E. A., Maydykovskiy A. I., Mitetelo N. V., Venkatakrishnarao D., Chandrasekar R., Murzina T. V. / *Laser Phys. Lett.* 2018. Vol. 15. P. 035401(4).
<https://doi.org/10.1088/1612-202X/aa9b23>.
11. Chosenyah M., Swaraj R., Novikov V., Maydykovskiy A., Khapre A., Murzina T., Chandrasekar R. / *J. Am. Chem. Soc.* 2026. Vol. 148. P. 5243–5252.
<https://doi.org/10.1021/jacs.5c17711>
12. Stöckle R., Fokas Ch., Deckert V., Zenobi R., Sick B., Hecht B., Wild U. P. / *Appl. Phys. Lett.* 1999. Vol. 75. P. 160–162/ <https://doi.org/10.1063/1.124305>
13. Purcell E. M. / *Physical Review*. 1946. Vol. 69. P. 681.
14. Мурзина Т. В., Майдыковский А. И., Новиков В. Б., Циняйкин И. И., Смирнов К. А., Батуев И. О. / *Письма в ЖЭТФ*. 2026. Т. 123. Вып. 10. В печати

PACS: 42.25.Bs

Hybrid structures of integrated photonics for directional micro-light sources based on dielectric waveguides and photoluminescent organic microcrystals

V. B. Novikov, I. O. Batuev, A. I. Maydykovskiy, and T. V. Murzina*

Lomonosow Moscow State university, Physics Department, Moscow, 119991 Russia

* E-mail: murzina@mail.ru

Received 9.04.2026; revised 20.04.2026; accepted 06.08.2026

The development of the element base of modern photonics is a relevant and promising area of research. This paper proposes an approach to creating active structures that enable the implementation of directional light microsources by combining a waveguide with an input/output adapter fabricated using two-photon laser printing and an emitting microcrystal made of an organic dye. It is demonstrated that the proposed device enables both the excitation of the crystal's photoluminescence (PL) by radiation coupled through the waveguide structure and, conversely, the extraction of the crystal's PL radiation through the waveguide and adapter. These

capabilities also apply to resonant Fabry-Perot modes, the excitation of which is demonstrated for organic dye crystals with a shape similar to a parallelepiped.

Keywords: photonics, two-photon laser printing, organic microcrystals.

REFERENCES

1. Zyla G. and Farsari M., Laser Photonics Rev. **18**, 2301312 (30) (2024). <https://doi.org/10.1002/lpor.202301312>.
2. Arun Jaiswal, Chandresh Kumar Rastogi, Sweta Rani, Gaurav Pratap Singh, Sumit Saxena, and Shobha Shukla, iScience **26**, 106374 (30) (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106374>.
3. Kawata S., Sun H. B., Tanaka T., and Takada K., Nature **412**, 697–698 (2001). <https://doi.org/10.1038/35089130>.
4. Serbin J., Egbert A., Ostendorf A., Chichkov B. N., Houbertz R., Domann G., Schulz J., Cronauer C., Fröhlich L., and Popall M., Opt. Lett. **28**, 301–303 (2023).
5. Flynn C., Cao H., Applegate B. E., and Tkaczyk T. S., Opt. Express **31**, 26323–26334 (2023). <https://doi.org/10.1364/OE.495363>.
6. Peng Y., Jradi S., Yang X., Dupont M., Hamie F., Dinh X. Q., Sun X. W., Xu T., and Bachelot R., Advanced Materials Technologies **4** (2), 1800522 (2019).
7. Yu Y., Prudnikau A., Lesnyak V., and Kirchner R., Advanced Materials **35** (29), 2211702 (2023). <https://doi.org/10.1002/adma.202211702>.
8. Maydykovskiy A. I., Apostolov D. O., Mamonov E. A., Kopylov D. A., Dagesyan S. A., and Murzina T. V., JETP Letters **117** (1), 31–37 (2023). <https://doi.org/10.1134/s0021364022602743>.
9. Ortiz-Huerta F., Chen L., Taverne M., Hadden J. P., Johnson M., Ho Y. L. D., and Rarity J. G., Opt. Express **26**, 33245–33252 (2018). <https://doi.org/10.1364/oe.26.033245>.
10. Mamonov E. A., Maydykovskiy A. I., Mitetelo N. V., Venkatakrishnarao D., Chandrasekar R., and Murzina T. V., Laser Phys. Lett. **15**, 035401(4) (2018). <https://doi.org/10.1088/1612-202X/aa9b23>.
11. Chosenyah M., Swaraj R., Novikov V., Maydykovskiy A., Khapre A., Murzina T., and Chandrasekar R., J. Am. Chem. Soc. **148**, 5243–5252 (2026). <https://doi.org/10.1021/jacs.5c17711>.
12. Stöckle R., Fokas Ch., Deckert V., Zenobi R., Sick B., Hecht B.; and Wild U. P., Appl. Phys. Lett. **75**, 160–162 (1999). <https://doi.org/10.1063/1.124305>.
13. Purcell E. M., Physical Review **69**, 681 (1946).
14. Murzina T. V., Maydykovskiy A. I., Novikov V. B., Tsinyaykin I. I., Smirnov K. A., and Batuev I. O., JETP Letters (2026) in print.

Об авторах

Новиков Владимир Борисович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический факультет (119991, Россия, Москва, Ленинское горы, 1, стр. 62). E-mail: vb.novikov@physics.msu.ru SPIN-код: 5985-8409, AuthorID: 764257

Батуев Илья Олегович, аспирант, МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический факультет (119991, Россия, Москва, Ленинское горы, 1, стр. 62). E-mail: batuev.io18@physics.msu.ru

Майдыковский Антон Игоревич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический факультет (119991, Россия, Москва, Ленинское горы, 1, стр. 62). E-mail: anton@shg.ru SPIN-код: 6731-2010, AuthorID: 34191

Мурзина Татьяна Владимировна, д.ф.-м.н., доцент, МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический факультет (119991 Россия, Москва, Ленинское горы, 1, стр. 62). E-mail: mur@shg.ru SPIN-код: 2223-6681, AuthorID: 31148