

И. В. Балыкин^{1,2}, Т. А. Железнякова^{1,2}, А. А. Рыжевич¹

¹*Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

²*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*

ИЗМЕНЕНИЕ МОЩНОСТИ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СЛОЕВ РАССЕЙВАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Лазерное излучение широко используется для оптической диагностики различных рассеивающих сред. В подавляющем большинстве случаев для этих целей применяются лазерные пучки, имеющие гауссов профиль. В то же время световые пучки других типов имеют ряд особенностей, с помощью которых можно получить дополнительную информацию об исследуемых объектах. В данном контексте актуальной является задача выявления проникающей способности световых пучков различных типов в рассеивающей среде с целью их последующего применения для неразрушающего контроля различных объектов, в том числе биотканей. В настоящей работе проведен сравнительный анализ четырех различных конфигураций лазерных световых пучков: гауссова, лагерь-гауссова и бесселевых световых пучков нулевого и первого порядков в отношении сохраненной ими мощности после прохождения слоя рассеивающей среды. Для формирования световых пучков применялся гелий-неоновый лазер, излучающий на длине волны 0,633 мкм, и модульная оптическая схема, позволяющая изменять профиль светового пучка путем включения/исключения из светового тракта соответствующих модулей. В качестве рассеивающей среды использовались плоскопараллельные слои полупрозрачной силиконовой резины различных толщин в диапазоне от 0,17 до 6,61 мм. По результатам экспериментальных измерений построены аппроксимирующие кривые для зависимости мощности прошедших через слой рассеивающей среды световых пучков четырех типов от толщины слоя вида $I = \exp(-Dx)$, где D – показатель ослабления, I – суммарная мощность пучка, x – толщина слоя. Рассчитаны значения коэффициента D для разных типов пучков. Значения D мало (в пределах стандартной ошибки) отличаются для разных типов пучков, из чего следует, что тип пучка в данной конфигурации оптической схемы практически не влияет на его проникающие свойства и суммарную энергию света, прошедшего через слой рассеивающего материала.

Ключевые слова: гауссов световой пучок, лагерь-гауссов световой пучок, бесселев световой пучок нулевого порядка, бесселев световой пучок первого порядка, рассеивающая среда

I. V. Balykin^{1,2}, T. A. Zheleznyakova^{1,2}, A. A. Ryzhevich¹

¹*B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

²*Belarusian State University, Minsk, Belarus*

POWER CHANGES IN DIFFERENT-TYPE LIGHT BEAMS AFTER PASSING THROUGH THE LAYERS OF DIFFERENT-THICKNESS SCATTERING MEDIUM

Laser radiation is extensively used for optical diagnostics of various scattering media. In most cases, laser beams having a Gaussian profile are applied for this task. At the same time, other-type light beams have some features that can be used to obtain additional information about investigated objects. In this context, a relevant task is to reveal the penetrability of different-type light beams in a scattering medium with their subsequent application for the nondestructive testing of various objects, including biological tissues. In this article, a comparative analysis is carried out for four different configurations of laser light beams (Gaussian, Laguerre-Gaussian, and zero- and first-order Bessel light beams) in relation to the power stored by them after passing through a scattering medium layer. To form the light beams we used helium-neon laser emitting at a wavelength of 0.633 micrometers, and a modular optical system. This system makes it possible to change the light beam profile by the inclusion / exclusion of the corresponding modules from the light path. As the scattering medium we used plane-parallel layers of semi-transparent silastic with the thickness ranging from 0.17 to 6.61 mm. It is investigated experimentally how the power of the light beam passing through the scattering medium layer depends on the layer thickness. According to the obtained results, the approximating curves are plotted in the form $I = \exp(-Dx)$ where D is the attenuation coefficient, I is the total power of the beam, x is the layer thickness. The values of the coefficient D for different-type beams are calculated. The D values for different-type beams scarcely differ (within the standard error) from each other. It means that the beam type in the optical system configuration has almost no effect on the penetration properties of the light beam, and on the total energy of the light passing through the scattering medium layer.

Keywords: Gaussian light beam, Laguerre-Gaussian light beam, zero-and first-order Bessel light beam, first-order Bessel light beam, scattering media

Введение. В настоящее время лазерное излучение широко используется для оптической диагностики различных рассеивающих сред, включая биоткани. В подавляющем большинстве случаев для этих целей применяются лазерные пучки, имеющие гауссов профиль [1]. В то же время световые пучки других типов имеют ряд особенностей, с помощью которых можно получить дополнительную информацию об исследуемых объектах либо оказать дополнительное воздействие на них.

Одним из наиболее важных свойств световых пучков в данном контексте является их проникающая способность. Актуальной представляется задача выявления проникающей способности световых пучков различных типов в рассеивающей среде с целью последующего их использования для неразрушающего контроля различных объектов, в том числе биотканей [2–4]. В настоящей работе проведен сравнительный анализ четырех различных конфигураций лазерных световых пучков: гауссова, лаггерр-гауссова [5] и бесселевых световых пучков нулевого (БСП₀) [6] и первого (БСП₁) [7] порядков в отношении сохранения ими энергии после прохождения слоя рассеивающей среды [4].

1. Прохождение гауссова светового пучка через наборы тонких образцов фантомов биоткани. В данном случае для исследований нами были использованы два парных комплекта из четырех различных по толщине образцов фантомов, моделирующих биологическую ткань. Образцы были изготовлены из силикона методом центрифугирования и предоставлены авторам для исследования сотрудниками Yonsei University (Южная Корея). Всего четыре различных толщины имевшихся в наличии образцов не позволяли определить даже качественной зависимости, поэтому была использована следующая методика: образцы из обоих одинаковых наборов последовательно объединялись в группы по три с помощью жесткой направляющей и исследовались как единое целое (рис. 1). Таким образом было составлено 25 возможных групп образцов с различными общими средними толщинами, которые варьировались от 315,4 до 401,9 мкм с переменной разницей между ближайшими толщинами от 2,3 до 9,4 мкм.

Для большей репрезентативности полученных данных измерения энергии проходящего через образцы пучка производились не в одной отдельной точке за образцом, а в двадцати шести, расположенных на отрезке длиной 25 мм с шагом 1 мм. Эта процедура автоматически осуществлялась с использованием моторизованного актуатора 6, который перемещал направляющую 3 с образцами вдоль прямой в плоскости, перпендикулярной оси пучка.

Однородность фантомов биологической ткани исследовалась путем измерения средней интенсивности проходящего гауссова светового пучка с длиной волны 0,633 мкм и диаметром примерно 1 мм в различных точках за образцами. Средняя яркость пиксела в данном случае отождествлялась с мощностью лазерного излучения в условных единицах. Для исключения эффектов, связанных со стационарностью режима работы лазера, измерения проводились дважды: один раз при движении направляющей с образцами в направлении увеличения поперечной координаты, второй – при движении в направлении уменьшения поперечной координаты. Результаты для 4 серий измерений приведены в табл. 1. На графиках зависимости показаны не экспериментальными точками, а линиями, их соединяющими, потому что таким образом легче визуально оценить, насколько полученные экспериментальные зависимости близки друг к другу. Видно, что внешне распределения интенсивности для одних и тех же координат очень схожи между собой, что свидетельствует о хорошей воспроизводимости результатов при использовании актуатора. Из сравнения распределений понятно, что флуктуации интенсивности по большей части не являются случайными, а вызваны, в основном, неоднородностью образца. Значения флуктуаций интенсивности зачастую превышают 10 % от максимального значения, поэтому однородность образцов, изготовленных методом центрифугирования, нельзя признать удовлетворительной.

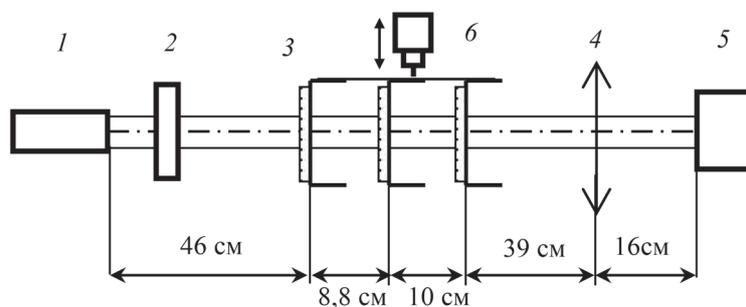
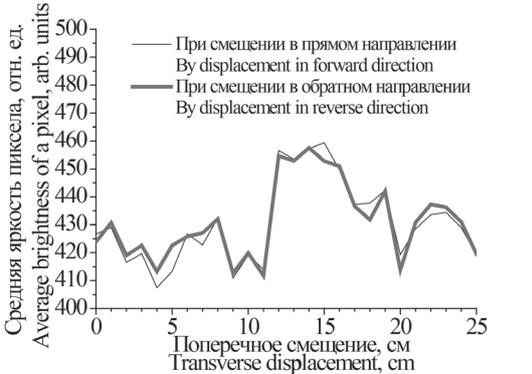
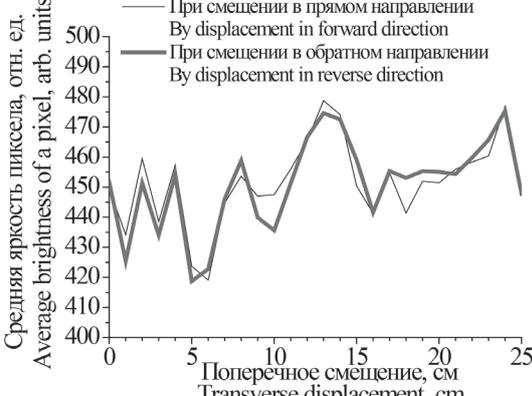
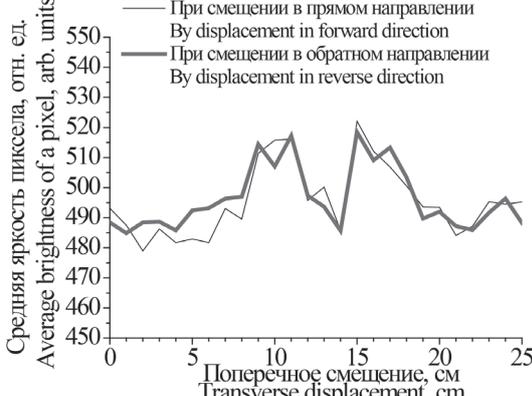
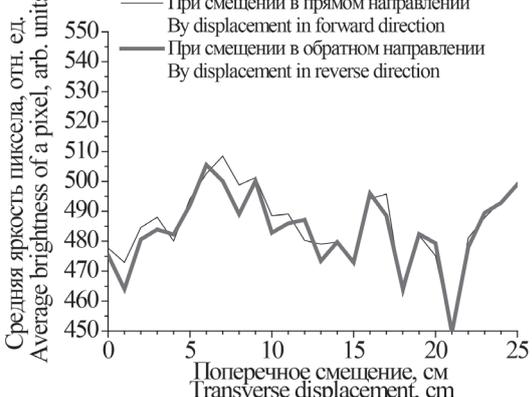


Рис. 1. Схема установки: 1 – лазер ЛГН-207а; 2 – фильтр 0,3×0,8; 3 – направляющая с образцами; 4 – положительная линза; 5 – CCD-камера CoolSnapEZ; 6 – моторизованный актуатор, сопряженный с компьютером

Fig. 1. Schematic of the experimental setup: 1 – He-Ne laser LGN-207a; 2 – 0.3×0.8 filter; 3 – guide with samples; 4 – positive lens; 5 – CCD-camera CoolSnapEZ; 6 – motorized actuator connected to PC

Таблица 1. Зависимость средней яркости пиксела от величины поперечного смещения образца

Table 1. Average pixel brightness dependence on the transverse displacement of a sample

Наименование серии	Суммарная толщина, мкм	График полученной зависимости
'1-1', '1-2', '1-4'	359,8	 <p>Средняя яркость пиксела, отн. ед. Average brightness of a pixel, arb. units</p> <p>— При смещении в прямом направлении By displacement in forward direction</p> <p>— При смещении в обратном направлении By displacement in reverse direction</p> <p>Поперечное смещение, см Transverse displacement, cm</p>
'1-1', '1-3', '1-4'	348,2	 <p>Средняя яркость пиксела, отн. ед. Average brightness of a pixel, arb. units</p> <p>— При смещении в прямом направлении By displacement in forward direction</p> <p>— При смещении в обратном направлении By displacement in reverse direction</p> <p>Поперечное смещение, см Transverse displacement, cm</p>
'1-3', '1-4', '2-3'	324,8	 <p>Средняя яркость пиксела, отн. ед. Average brightness of a pixel, arb. units</p> <p>— При смещении в прямом направлении By displacement in forward direction</p> <p>— При смещении в обратном направлении By displacement in reverse direction</p> <p>Поперечное смещение, см Transverse displacement, cm</p>
'1-4''2-2''2-4'	329,5	 <p>Средняя яркость пиксела, отн. ед. Average brightness of a pixel, arb. units</p> <p>— При смещении в прямом направлении By displacement in forward direction</p> <p>— При смещении в обратном направлении By displacement in reverse direction</p> <p>Поперечное смещение, см Transverse displacement, cm</p>

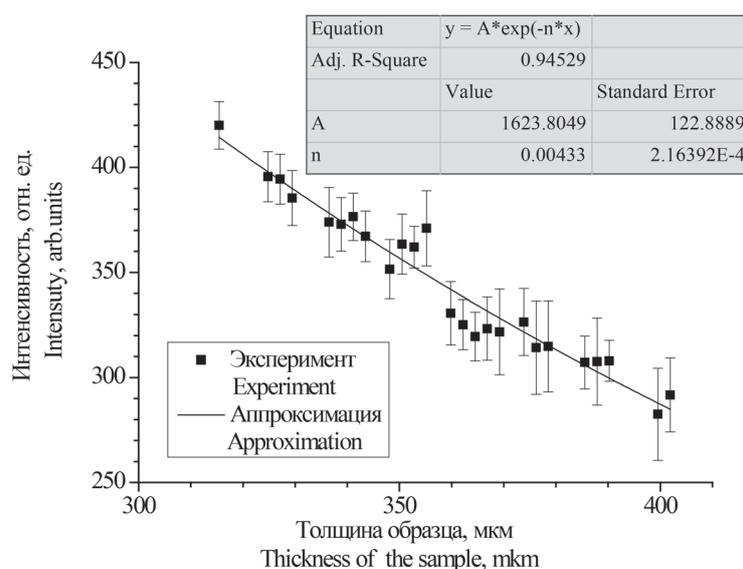


Рис. 2. Зависимость интенсивности прошедшего излучения от толщины образца и ее аппроксимация экспоненциальной функцией

Fig. 2. Dependence of the passed radiation intensity on the sample thickness and its approximation by the exponential function

После обработки данных был получен график зависимости интенсивности проходящего излучения от толщины образца, приведенный на рис. 2.

Точки соответствуют среднему значению средней яркости всех кадров в серии (яркость кадра определяется как среднее по всем пикселям), отрезки с засечками обозначают стандартное отклонение значения яркости кадра.

Поскольку по меньшей мере три отрезка среднеквадратических отклонений даже не пересекают построенную аппроксимирующую кривую, можно усомниться в том, что эта кривая, если ее продлить, достаточно точно опишет закономерность ослабления светового пучка после прохождения рассеивающих слоев большей толщины (10 и более миллиметров).

2. Сравнение проникающей способности различных типов пучков. Так как в ходе исследований стало очевидным, что объединение предоставленных образцов в серии не позволяет достичь достаточно информативного диапазона толщин, было принято решение изготовить

Таблица 2. Толщины изготовленных плоскопараллельных силиконовых образцов
Table 2. Thicknesses of the produced plane-parallel silicone samples

Комплект 1. «Тонкие»		Комплект 2. «Толстые»	
Наименование	Толщина, мм	Наименование	Толщина, мм
1	0,17	1	1,07
2	0,34	2	2,2
3	0,51	3	3,31
4	0,68	4	4,37
5	0,85	5	5,585
6	1,02	6	6,615
7	1,19		
8	1,36		
9	1,53		
10	1,70		
11	1,87		
12	2,04		

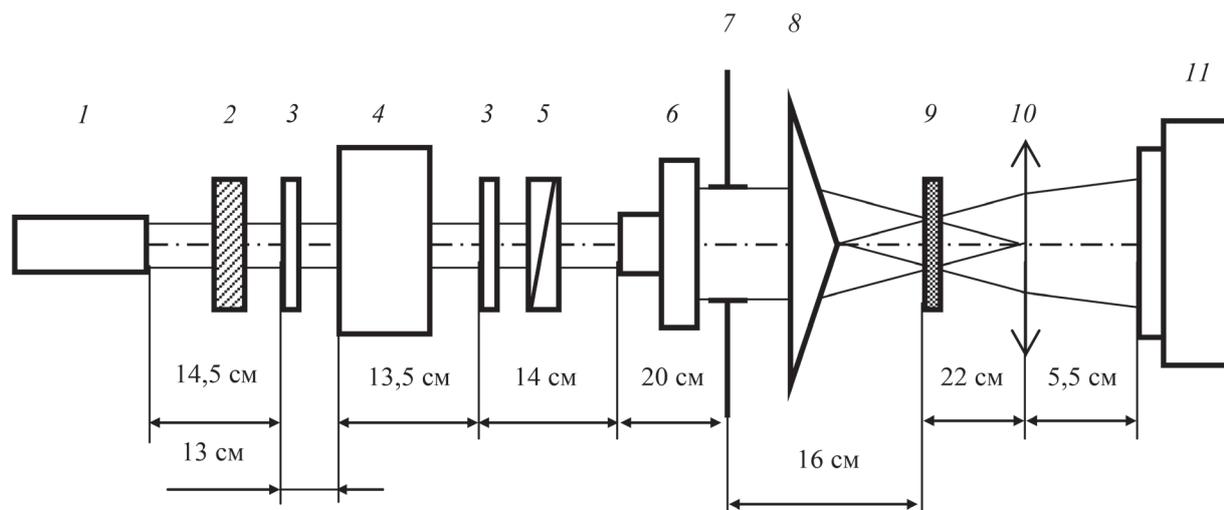


Рис. 3. Установка для изучения закономерностей прохождения световых пучков различных типов через тонкие образцы фантомов биологической ткани:

1 – лазер ЛГН-207; 2 – фильтр; 3 – пластинки $\lambda/4$; 4 – двуосный кристалл; 5 – поляризатор; 6 – телескоп; 7 – диафрагма; 8 – аксикон с углом при основании конуса 1° ; 9 – образец; 10 – линза; 11 – CCD-камера

Fig. 3. Experimental setup for investigation of the regularities of different-type light beams passing through the thin samples of biological tissue phantoms:

1 – He-Ne laser LGN-207a; 2 – filter; 3 – $\lambda/4$ -plates; 4 – biaxial crystal; 5 – polarizer; 6 – telescope; 7 – diaphragm; 8 – axicon with an angle of 1° at the cone base; 9 – sample; 10 – lens; 11 – CCD-camera

удовлетворяющий всем требованиям набор плоскопараллельных образцов из полупрозрачной силиконовой резины на уксусном растворителе, при этом их плоскопараллельность и определенная толщина (табл. 2) обеспечивались полированными до оптической чистоты стеклянными пластинами, находящимися на фиксированном расстоянии друг от друга.

Именно на этом наборе образцов и выполнялся сравнительный анализ характеристик разных световых пучков. Оптическая модульная схема установки, на которой проводились исследования, приведена на рис. 3.

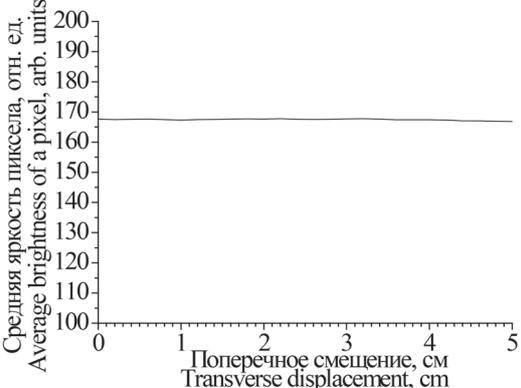
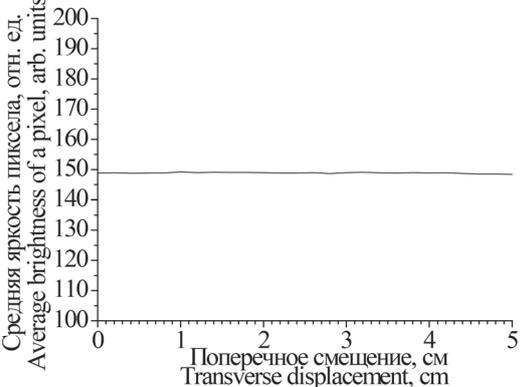
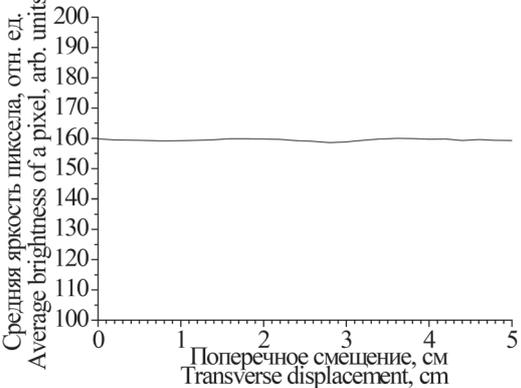
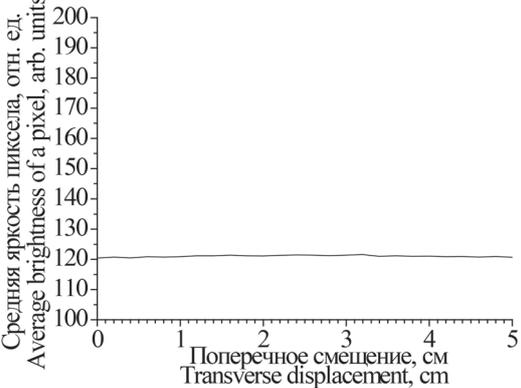
Конфигурация установки была подобрана таким образом, чтобы, извлекая или добавляя в нее оптические элементы, можно было формировать четыре различных вида световых пучков: гауссов (стоят элементы 1–3, 5–7, 9–11), лаггерр-гауссов (стоят элементы 1–7, 9–11), бесселевы нулевого (стоят элементы 1–3, 5–11) и первого (стоят элементы 1–11) порядков. Следует отметить, что для достижения равных диаметров светового пучка в плоскости образца увеличение телескопа было различным для разных пучков: для БСП₀ и БСП₁ оно составляло 6, для гауссова и лаггерр-гауссова – 3. При изучении закономерностей распространения БСП₀ и БСП₁ образец помещался в середину ромбоида, формируемого аксиконом с углом при основании 1 градус. Методика измерений была аналогична описанной в разделе 1: образец смещался вдоль отрезка в плоскости, поперечной оси пучка, всего проводилось 26 измерений с интервалом в 0,2 мм, затем полученные значения средней яркости кадра усреднялись.

Сделанные авторами образцы показали более высокую однородность, нежели изготовленные методом центрифугирования. В табл. 3 приведены зависимости средней по кадру яркости пиксела от поперечного смещения образца в одном направлении для наиболее тонкого и наиболее толстого образцов из комплекта 1 и аналогичной пары образцов из комплекта 2. Данные зависимости были получены для всех образцов, и во всех случаях максимальная разница значений мощности светового пучка, прошедшего сквозь образец в разных местах, не превышала 1 % от максимального значения мощности прошедшего пучка.

Конечные результаты для мощности прошедших сквозь образец пучков с усреднением по 26 значениям приведены на рис. 4.

Таблица 3. Зависимость средней по кадру яркости пиксела от величины поперечного смещения образца

Table 3. Dependence of frame-average pixel brightness on the transverse displacement of a sample

Наименование образца	Толщина, мм	График полученной зависимости
Комплект 1, образец 1	0,17	
Комплект 1, образец 12	2,04	
Комплект 2, образец 1	1,07	
Комплект 2, образец 6	6,615	

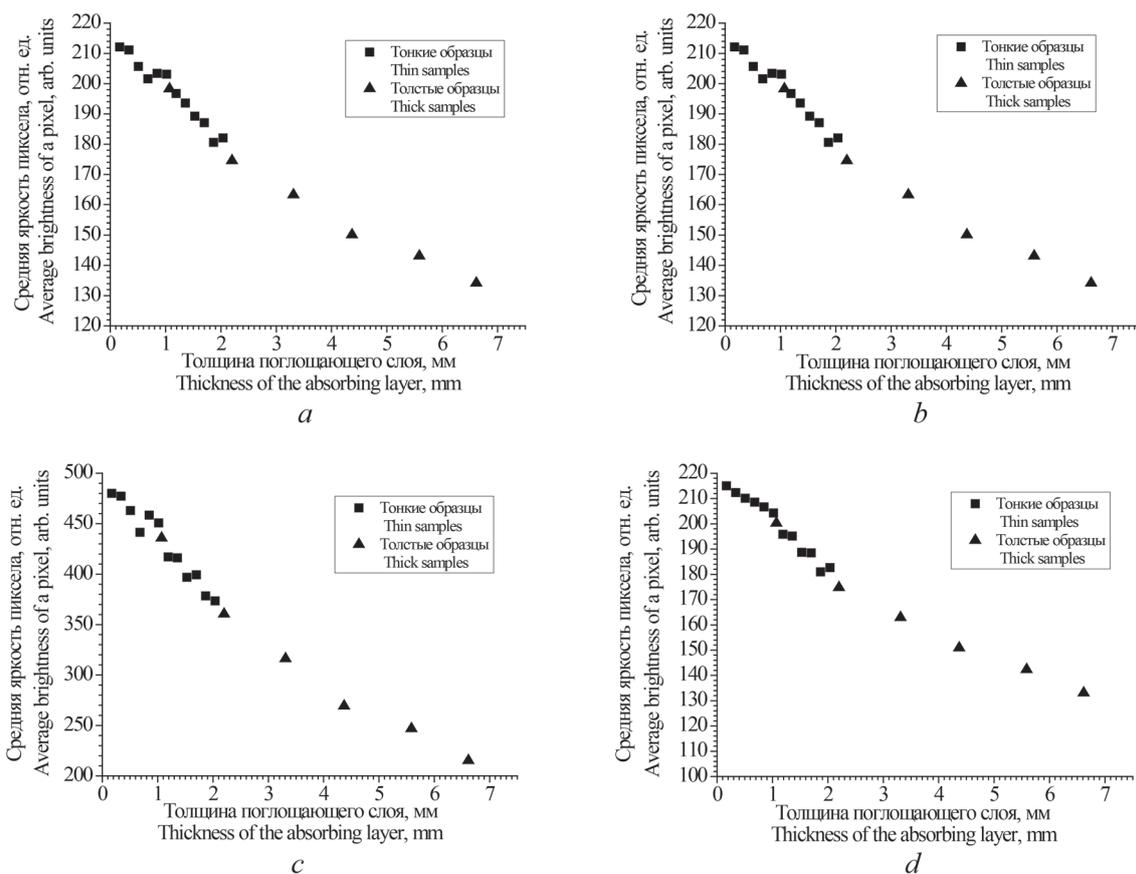


Рис. 4. Зависимость мощности прошедшего через образец излучения от толщины образца:
 а – гауссов световой пучок; б – лаггерр-гауссов световой пучок; с – БСП₀; д – БСП₁

Fig. 4. Dependence of the power of radiation passed through the sample on the sample thickness:
 а – Gaussian light beam; б – Laguerre-Gaussian light beam; с – BLB₀; д – BLB₁

По результатам экспериментальных измерений построены аппроксимирующие кривые для зависимости мощности прошедших через слой рассеивающей среды световых пучков четырех типов от толщины слоя, имеющие вид $I = \exp(-Dx)$, где D – показатель ослабления, I – суммарная мощность пучка, x – толщина слоя. Рассчитанные значения коэффициента D со значениями стандартной ошибки для разных типов пучков приведены в табл. 4.

Таблица 4. Значения показателя ослабления D для различных пучков

Table 4. Attenuation coefficients D for different beams

Тип пучка	D , 1/мм	Стандартная ошибка среднего, 1/мм
БСП ₀	0,192	0,007
БСП ₁	0,197	0,009
Гауссов световой пучок	0,188	0,009
Лагерр-гауссов световой пучок	0,189	0,009

Видно, что значения коэффициента D мало (в пределах стандартной ошибки) отличаются для разных типов пучков, особенно хорошо это демонстрирует рис. 5, на котором представлены нормированные по динамическому диапазону сигнала графики аппроксимаций для разных типов пучков. Поскольку на рис. 5, а различить кривые практически невозможно, на рис. 5, б мы показали участки кривых в диапазоне толщин 6–10 см, что позволило увидеть хотя бы незначительную ранжировку по мощности различных типов световых пучков, прошедших через образцы.

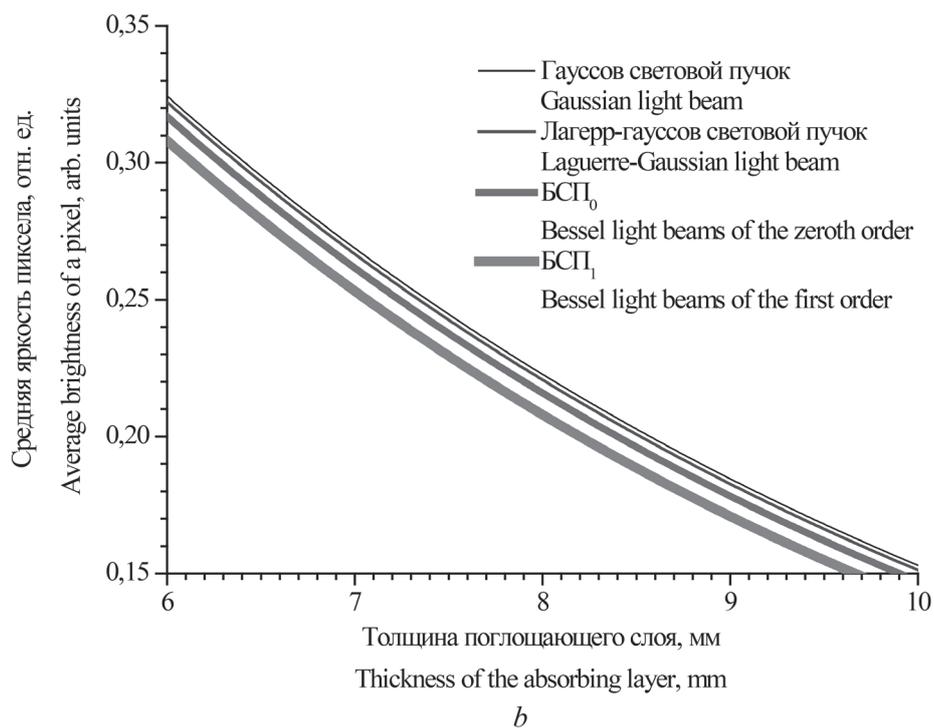
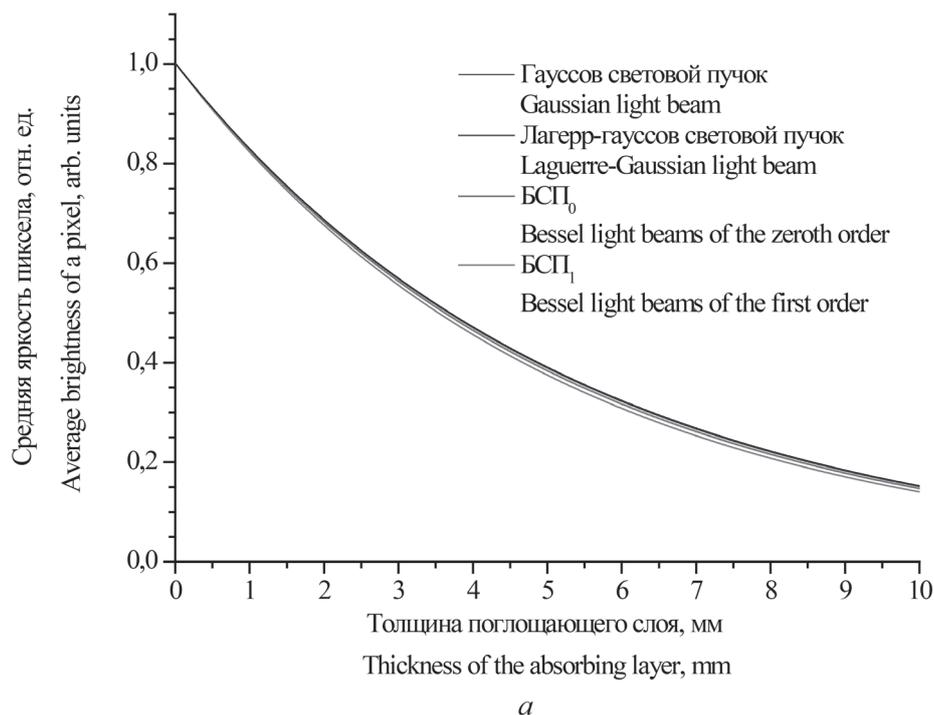


Рис. 5. Зависимости энергии проходящих пучков от толщины поглощающего слоя, полученные аппроксимацией экспериментальных данных: *a* – аппроксимация в диапазоне 0–10 мм; *b* – аппроксимация в диапазоне 6–10 мм

Fig. 5. Dependences of the energy of passing beams on the absorbing layer thickness obtained by the approximation of the experimental data: *a* – approximation over the range 0–10 mm; *b* – approximation over the range 6–10 mm

Из этого следует, что тип пучка в данной конфигурации экспериментальной схемы практически не влияет на его проникающие свойства и суммарную энергию света, прошедшего через слой рассеивающего материала.

Выводы. В результате экспериментов не обнаружилось существенного преимущества какого-либо типа пучка перед другими в отношении проникающей способности. При этом следует привести довод в пользу применения в клинической практике бесселевых пучков по сравнению с гауссовыми и лаггерр-гауссовыми. Так, в процессе неинвазивной диагностики и лечения продольные (вдоль направления распространения света) колебания локальных участков кожи, обусловленные дыханием, дрожью и другими перемещениями участков организма, не оказывают влияния на эффект от применяемого метода. Это объясняется тем, что бесселев пучок имеет относительно длинный локализованный пик интенсивности на оси, который распространяется без изменения ширины даже в сильно рассеивающих средах, таких как биологические ткани, на расстояния, на порядок превосходящие достижимые с обычными гауссовыми пучками. Благодаря стабильности диаметра осевого максимума БСП, их можно также использовать для обнаружения и изучения очень небольших подозрительных объектов внутри толстого образца, что невозможно при использовании гауссова пучка.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника», 2016–2017 гг., задание 1.1.01. Авторы выражают благодарность профессору Бюнгю Джангу (Yonsei University, Южная Корея) за предоставленные для исследования образцы фантомов биоткани.

Acknowledgements. This work is executed within the framework of the State Program of Scientific Investigations “Photonics, Opto- and Microelectronics”, 2016–2017, Task 1.1.01. The authors are grateful to Prof. Byungio Jung (Yonsei University, Gangwon-do, Korea) for the biological tissue phantom samples given for investigation.

Список использованных источников

1. Гончаренко, А. М. Гауссовы пучки света / А. М. Гончаренко. – Минск: Наука и техника, 1977. – 144 с.
2. Rohrbach, A. Artifacts resulting from imaging in scattering media: a theoretical prediction / A. Rohrbach // *Opt. Lett.* – 2009. – Vol. 34. № 19. – P. 3041–3043.
3. Peculiarities of propagation of quasi-diffraction-free light beams in strongly scattering absorbing media / I. L. Katsev [et al.] // *Quant. Electron.* – 2006. – Vol. 36, № 4. – P. 357–362.
4. Kulikov, K. *Laser Interaction with Biological Material* / K. Kulikov. – [S. l.]: Springer Int. Publ., Switzerland, 2014. – 155 p. – (Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering).
5. Kazak, N. S. Formation and Transformation of Non-Bessel Multiring Light Beams / N. S. Kazak, E. G. Katranzhi, A. A. Ryzhevich // *J. Appl. Spectrosc.* – 2002. – Vol. 69, № 2. – P. 279–285.
6. Durnin, J. Diffraction-Free Beams / J. Durnin, J. J. Jr. Miceli, J. H. Eberly // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – Vol. 58, № 15. – P. 1499–1501.
7. Formation of higher-order Bessel light beams in biaxial crystals / T. A. King [et al.] // *Opt. Commun.* – 2001. – Vol. 187, № 4/6. – P. 407–414.

References

1. Goncharenko A. M. *Gauss Light Beam*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1977. 144 p. (in Russian).
2. Rohrbach A. Artifacts resulting from imaging in scattering media: a theoretical prediction. *Optical Letters*, 2009, vol. 34, no. 19, pp. 3041–3043. Doi: 10.1364/OL.34.003041
3. Katsev I. L., Prikhach A. S., Kazak N. S., Kroening M. Peculiarities of propagation of quasi-diffraction-free light beams in strongly scattering absorbing media. *Quantum Electronics*, 2006, vol. 36, no. 4, pp. 357–362. Doi: 10.1070/qe2006v-036n04abeh013151
4. Kulikov K. *Laser Interaction with Biological Material. Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering*. Springer International Publishing Switzerland, 2014. 155 p. Doi: 10.1007/978-3-319-01739-6
5. Kazak N. S. Katranzhi E. G., Ryzhevich A. A. Formation and Transformation of Non-Bessel Multiring Light Beams. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2002, vol. 69, no. 2, pp. 279–285. Doi: 10.1023/A:1016105706082
6. Durnin J., Miceli J. J. Jr., Eberly J. H. Diffraction-Free Beams. *Physics Review Letters*, 1987, vol. 58, no. 15, pp. 1499–1501. Doi: 10.1103/physrevlett.58.1499
7. King T. A. Hogervorst W., Kazak N. S., Khilo N. A., Ryzhevich A. A. Formation of higher-order Bessel light beams in biaxial crystals. *Optics Communications*, 2001, vol. 187, no. 4/6, pp. 407–414. Doi: 10.1016/s0030-4018(00)01124-x

Информация об авторах

Балыкин Игорь Валерьевич – лаборант Центра «Диагностические системы» (лаборатория оптической диагностики), Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Республика Беларусь); студент факультета радиопизики и компьютерных технологий, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: b97@dragon.bas-net.by

Железнякова Татьяна Александровна – младший научный сотрудник Центра «Диагностические системы» (лаборатория оптической диагностики), Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Республика Беларусь); старший преподаватель кафедры физики и аэрокосмических технологий Белорусского государственного университета (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: zhelez@bsu.by

Рыжевич Анатолий Анатольевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Центра «Диагностические системы» (лаборатория оптической диагностики), Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: tol@dragon.bas-net.by

Для цитирования

Балыкин, И. В. Изменение мощности световых пучков различных типов при прохождении слоев рассеивающей среды / И. В. Балыкин, Т. А. Железнякова, А. А. Рыжевич // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2017. – № 2. – С. 91–100.

Information about the authors

Balykin Igor Valerievich – Laboratory Assistant, the Centre “Diagnostic Systems” (Laboratory for Optical Diagnostics), B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Student of Radiophysics and Computer Technologies Faculty, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: b97@dragon.bas-net.by

Zheleznyakova Tatyana Aleksandrovna – Junior Researcher, Centre “Diagnostic Systems” (Laboratory for Optical Diagnostics), B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Senior Lecturer at the Department of Physics and Aerospace Technologies, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zhelez@bsu.by

Ryzhevich Anatol Anatolievich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Centre “Diagnostic Systems” (Laboratory for Optical Diagnostics), B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tol@dragon.bas-net.by

For citation

Balykin I. V., Zheleznyakova T. A., Ryzhevich A. A. Power changes in different-type light beams after passing through the layers of different-thickness scattering medium. *Vesti Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series], 2017, no. 2, pp. 91–100. (in Russian).