

## Датчик волнового фронта широкоапертурных лазерных пучков и его применения

© Л.В. Волкова,<sup>1</sup> С.Ю. Казанцев,<sup>2</sup> А.Ю. Музыка,<sup>1</sup> В.С. Скобелева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский политехнический университет,  
107023 Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский технический университет связи и информатики,  
111024 Москва, Россия  
s.i.kazantsev@mtuci.ru

Поступило в Редакцию 5 марта 2022 г.

В окончательной редакции 6 апреля 2022 г.

Принято к публикации 6 апреля 2022 г.

Представлены результаты исследований датчика волнового фронта на основе эффекта Тальбота, в котором применена периодическая решетка, изготовленная методом лазерной печати. Исследованы оптические характеристики периодических решеток, напечатанных на полимерных пленках, при воздействии на них непрерывного излучения плотностью до  $0.9 \text{ W/cm}^2$ , и продемонстрирована возможность создания эффективных конфигурируемых датчиков волнового фронта для лазеров видимого и среднего ИК диапазона спектра.

**Ключевые слова:** датчик волнового фронта, эффект Тальбота, широкоапертурные лазерные пучки, полимерные пленки, периодические решетки.

DOI: 10.21883/JTF.2022.09.52933.49-22

### Введение

Задача контроля волнового фронта (ВФ) широкоапертурных пучков актуальна для многих приложений лазерной физики и атмосферной оптики [1–3]. Кроме того, датчики ВФ могут использоваться для контроля формы различных линз и зеркал, входящих в состав сложных оптических систем с большими поперечными размерами, которые применяются в системах наблюдения [4,5]. Необходимость сканировать площади зеркальных поверхностей с поперечными размерами свыше 10 см или необходимость оперативного контроля широкоапертурных пучков мощных лазеров среднего ИК диапазона спектра вызывает известные трудности при использовании стандартных датчиков ВФ (на основе схемы Шака–Гартмана) [5]. Главным образом эти трудности связаны с тем, что для регистрации излучения с длиной волны, большей  $3 \mu\text{m}$ , в датчиках волнового фронта на основе схемы Шака–Гартмана приходится использовать специальную оптику и матрицы приемников. Поэтому подходы, реализованные, например, в [6,7], даже с учетом современных успехов в создании широкоапертурной оптики из ZnSe и фотоприемников для спектральной области  $2\text{--}20 \mu\text{m}$ , приводят к значительному увеличению стоимости прибора, что делает его недоступным для широкого использования. При этом известно, что для контроля волнового фронта мощных широкоапертурных ИК лазеров с успехом может применяться подход, основанный на эффекте Тальбота [8,9]. Эффект Тальбота реализуется на волновых пучках самой различной природы, некоторые примеры представлены в работах [10–12]. Важным преимуществом применения

интерферометрических методик на основе эффекта Тальбота является отсутствие необходимости использования большого количества оптических элементов, изготавливаемых из материалов, которые должны быть прозрачны для исследуемого излучения. В эффекте Тальбота ключевым элементом является двумерная периодическая решетка, на которой происходит дифракционное разложение волнового фронта, при этом размеры такой решетки могут быть достаточно большими, что позволяет проводить диагностику активной среды лазеров с большим рабочим объемом [9,13]. Известно, что методика тальбот-интерферометрии эффективна также для диагностики газодинамических потоков и измерения оптических неоднородностей прозрачных сред [5,14]. Поэтому данная методика будет особенно привлекательна для выявления неоднородностей в прозрачных диэлектриках или газоразрядной плазме [15]. Однако анализ с применением этой методики самоорганизующихся плазменных структур, описанных в работах [16,17], выявил ряд проблем. Оказалось, что период плазменных структур в зависимости от условий (удельный энергозатрат, давление и состав газовой среды, состояние поверхности электрода) сильно меняется [16], в результате чего возникает необходимость подбора оптимального периода для решетки, которая используется в интерферометре Тальбота. Периодические решетки, которые применялись в экспериментах [9], были изготовлены из металлической фольги с применением достаточно сложной фотолитографической технологии. Очевидно, что изготовление специальной металлической решетки под каждый новый эксперимент не целесообразно. Поэтому в работах [15,18] было предложено изготавливать

периодические решетки методом лазерной печати на полимерной пленке, однако подробного анализа материала, качества и стабильности характеристик напечатанных периодических решеток в [15,18] не проводилось. Целью настоящей работы являлось исследование возможности применения в датчике волнового фронта напечатанных решеток для анализа оптических неоднородностей среды, а также оценки границы применимости как самого полимерного материала, так и краски лазерного принтера, используемых для создания периодической решетки.

### 1. Экспериментальная установка и методика исследований

В эффекте Тальбота плоские когерентные волны источников лазерного излучения разлагаются на двумерной решетке произвольных по форме, но периодически расположенных отверстий на распространяющиеся под кратными углами пространственные гармоники, которые в результате интерференции в ближней зоне Френеля воспроизводят распределение интенсивности на решетке на расстояниях, определяемых выражением [17]:

$$r_n = \frac{2p^2n}{\lambda}. \tag{1}$$

Здесь  $p \gg \lambda$ ;  $r_n$  — расстояние от решетки до  $n$ -й плоскости воспроизведения,  $p$  — период решетки,  $\lambda$  — длина волны излучения,  $n = 1, 2, 3 \dots$ . Распределение интенсивности в плоскостях воспроизведения имеет подобную решетке периодическую структуру, когда ВФ плоский или сферический. При выпуклом ВФ периоды в плоскости воспроизведения увеличиваются, а при вогнутом — уменьшаются относительно периода решетки. Таким образом, увеличение периода в некоторой области апертуры плоского пучка, прошедшего участок среды, свидетельствует о появлении в этой области оптической неоднородности типа рассеивающей линзы, уменьшение — фокусирующей линзы. Измерение смещения координат контрастных пятен в распределении интенсивности тальбограмм, искаженных ВФ в плоскостях воспроизведения, является основой датчика ВФ. Локальные наклоны ВФ  $\Delta\gamma$  измеряются в плоскостях воспроизведения. В приближении оптического клина [9]:

$$\Delta\gamma = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{r_1}, \tag{2}$$

где  $\Delta x, \Delta y$  — смещения координат пятен в прямоугольной системе координат. Нормальное уклонение ВФ  $\Delta z = p\Delta\gamma$ . Радиус кривизны ВФ  $R$  определяется в параболическом приближении по изменению периодов  $\Delta p$  в плоскости воспроизведения [5]:

$$R = \frac{pr_1}{\Delta p}, \tag{3}$$

где  $\Delta p$  — изменение периода в плоскости воспроизведения.

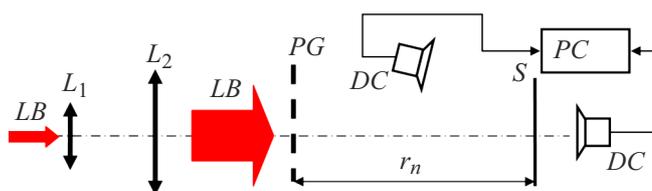
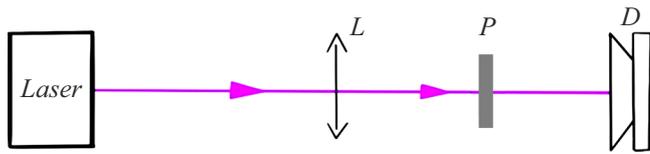


Рис. 1. Экспериментальная установка. LB — лазерный пучок;  $L_1, L_2$  — линзы, формирующие телескоп; PG — периодическая решетка; S — экран для регистрации тальбограмм; DC — цифровая камера; PC — персональный компьютер для обработки тальбограмм.

Особенность тальбот-интерферометрии заключается в том, что для получения информации о форме ВФ не требуется детального измерения пространственного распределения интенсивности излучения. Достаточно измерить только координаты центров контрастных пятен излучения на тальбограммах, причем размер пятен может быть выбран малым по сравнению с периодом. Это снижает требование к динамическому диапазону чувствительности экранов и упрощает автоматическое считывание координат.

Экспериментальная установка для исследования характеристик датчика ВФ на основе эффекта Тальбота, а также его применений для анализа оптических неоднородностей в прозрачных средах показаны на рис. 1. Следует обратить внимание на ключевой элемент всей установки — периодическую решетку (PG), свойства которой подробно изучались в нашей работе. Решетка распечатывалась на полимерной пленке с помощью лазерного принтера марки HP LaserJet Pro MFP M132mw, после чего устанавливалась в специальную кассету, которая в большинстве экспериментов представляла собой плоские стеклянные пластины, между которыми зажималась эта полимерная пленка, либо крепилась на рамке [18]. В дальнейшем исследовались спектральные свойства пленок ПЭТФ, которые использовались для изготовления решеток. Спектры поглощения пленок снимались после воздействия различных доз непрерывного лазерного излучения с длинами волн  $\lambda = 405, 530$  и  $633$  nm. Кроме того, в специальных экспериментах вместо лазерного облучения пленки подвергались термообработке. В качестве образцов полимеров были взяты коммерческие пленки Майлар (толщина  $30 \mu\text{m}$ ), а также пленки фирм folex IMAGING и LOMOND, толщиной  $60 \mu\text{m}$ . Плотность мощности излучения лазера на пленке изменялась в пределах  $0.02\text{--}0.9 \text{ W/cm}^2$ , неоднородность плотности лазерного излучения в пятне облучения на пленке не превышала 10% относительно своей средней величины. Время облучения варьировалось от 1 до 60 min. Спектры поглощения образцов записывались на спектрофотометре „SHIMADZU“ UV-1280, а в спектральном диапазоне  $2\text{--}25 \mu\text{m}$  снимались зависимости пропускания этих пленок с использованием ИК фурье-



**Рис. 2.** Экспериментальная установка для исследования влияния лазерного излучения на свойства напечатанных периодических решеток:  $L$  — линза;  $P$  — полимерный образец;  $D$  — термоматчик.

спектрометра АФ-3 [19]. Изучение структуры лазерной краски производилось с помощью микроскопа.

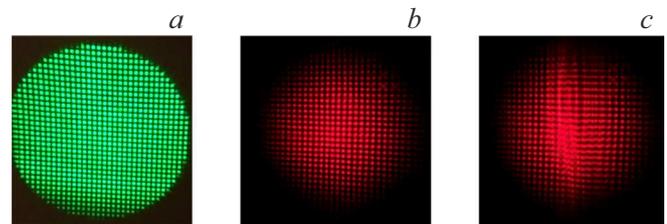
На рис. 2 показана схема экспериментальной установки, на которой исследовались изменения оптических характеристик пленок после воздействия лазерного облучения повышенной мощности. Луч от лазерной установки через линзу ( $L$ ) попадал на полимерный образец ( $P$ ). Регистрация температуры облучаемой поверхности производилась с помощью термоматчика ( $D$ ).

## 2. Результаты исследований и их обсуждение

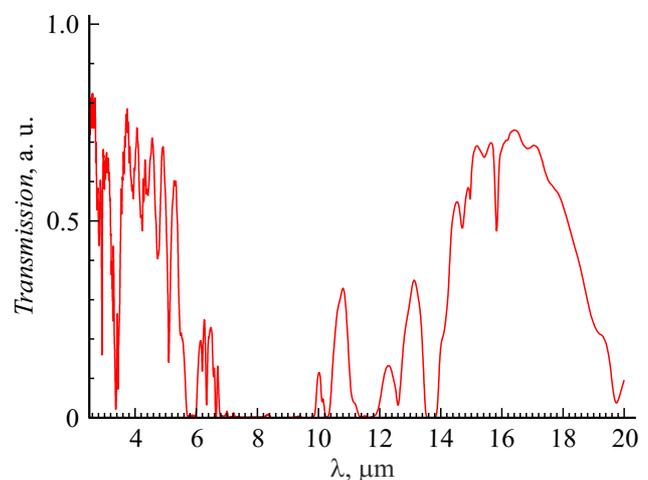
Были исследованы периодические решетки, напечатанные лазерным принтером на пленках с периодом от 0.3 до 1.5  $\mu\text{m}$  разной геометрии. Исследования выявили высокую чувствительность собранного нами датчика ВФ и возможность его применения для контроля оптической однородности трассы лазерного пучка. На рис. 3 показаны типичные тальбограммы, получаемые на экспериментальном стенде во второй плоскости воспроизведения: на рис. 3,  $a, b$  трасса пучка не возмущалась; на рис. 3,  $c$  показана тальбограмма, полученная, когда лазерный пучок проходил на расстоянии 5 см над пламенем зажигалки. Видно, что изменение показателя преломления в горячем воздухе вызвало смещение интерференционных максимумов в плоскости воспроизведения и потерю четкости картины, что также надежно регистрировалось и при скоростной видеосъемке [13]. Как видно из рис. 3,  $c$ , смещение интерференционных максимумов на тальбограмме при сильных возмущениях оптической плотности среды может превышать период решетки, в этом случае фиксируется сам факт искажений волнового фронта, а для численных оценок этих искажений необходимо использовать решетку с большим периодом. В процессе описанных выше экспериментов плотность лазерного излучения на периодической решетке не превышала  $8 \text{ mW/cm}^2$ . И при такой интенсивности облучения решетки, напечатанные на лавсановой пленке, практически не изменяли своих свойств в течение всего цикла исследований. Это более 10 месяцев при непрерывной экспозиции в течение одного дня лазерным излучением с  $\lambda = 530$  и  $633 \text{ nm}$  не больше 3 h в условиях комнатной температуры  $T = 18\text{--}28^\circ\text{C}$ . Поэтому эти решетки и материалы, на которых они были

напечатаны, подверглись более жесткому воздействию лазерного излучения. В результате было установлено, что при плотности облучения ниже  $0.5 \text{ mW/cm}^2$  как зеленого, так фиолетового лазера каких-либо существенных изменений ни в структуре полимера, ни в нанесенной на полимер лазерной краски не происходило. При этом температура на поверхности образца по данным термоматчика не превышала  $30\text{--}32^\circ\text{C}$ . На рис. 4 показан спектр пропускания ПЭТФ толщиной  $60 \mu\text{m}$  в средней ИК области спектра, из которого видны характерные области прозрачности материала, где могут работать периодические решетки, напечатанные на данном полимере. Длительное облучение (1 h) ПЭТФ при максимальных значениях мощности до  $0.5 \text{ W/cm}^2$  не привело к появлению полос поглощения полимера в видимой и ближней ИК области спектра (рис. 5), что свидетельствует об устойчивости ПЭТФ в этих спектральных диапазонах. Таким образом, полимерная матрица при данных условиях не может повлиять на рабочие качества тальбограммы.

Важной деталью тальбограммы является периодическая решетка, нанесенная на полимер с помощью лазерного принтера [18], в котором для создания изображения используется красящий порошок (тонер), имеющий

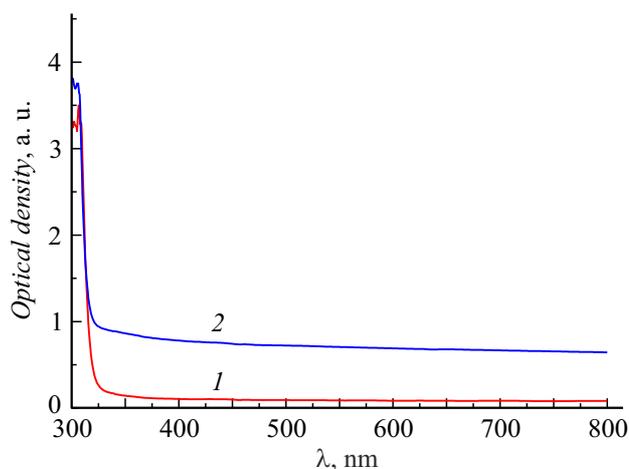


**Рис. 3.** Фотографии тальбограмм в плоскости воспроизведения:  $a$  — использовался пучок зеленого лазера диаметром 50 mm;  $b$  — красный лазер;  $c$  — красный лазер, трасса лазерного пучка возмущена тепловым потоком (пламя зажигалки).

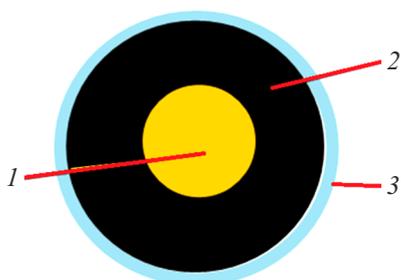


**Рис. 4.** Спектры пропускания образца ПЭТФ без краски от принтера.

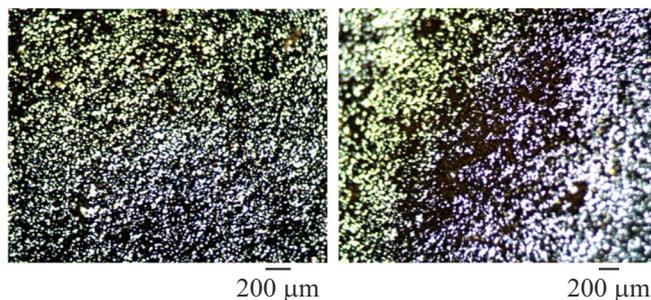
гранулированную структуру. Гранула тонера (рис. 6) состоит из парафинового ядра 1, окруженного полимерной оболочкой 2, в которой содержится пигмент и различные добавки (магнитные, полиэтилен или полипропилен в качестве модификатора и др.), а также поверхностных добавок для предотвращения слипания гранул 3. В настоящее время при производстве тонеров полимерную оболочку изготавливают из полиэфиров или стиренакриловых полимеров. На рис. 7 представлены изображения фрагмента образца ПЭТФ, на котором напечатана решетка. Снимки получены при увеличении с помощью микроскопа. Рис. 7, *a* показывает, что даже после прохождения термовалов не все гранулы тонера расплавились, на что указывают белые области, имеющие размер от 5 до 30  $\mu\text{m}$ . При длительном облучении образца зеленым лазером ( $P = 0.4 \text{ W/cm}^2$ ), а также фиолетовым лазером при малой и средней мощности ( $P < 0.5 \text{ W/cm}^2$ ) изменений в структуре краски не наблюдалось. Однако облучение образца мощными потоками фиолетового лазера ( $P = 0.9 \text{ W/cm}^2$ ) в течение 2–3 min приводило к уменьшению величины просветов и увеличению областей, заполненных пигментом (сажей), образовавшихся в результате термического действия лазера на оставши-



**Рис. 5.** Спектры поглощения образцов ПЭТФ до (1) и после (2) облучения фиолетовым лазером с  $P = 0.9 \text{ W/cm}^2$  в течение 60 min при комнатной температуре.



**Рис. 6.** Схематическое изображение гранулы лазерной краски (тонера): 1 — ядро; 2 — полимерная оболочка; 3 — специальный слой для предотвращения слипания гранул.



**Рис. 7.** Изображение фрагмента (ПЭТФ + краска) под микроскопом до (a) и после (b) облучения фиолетовым лазером ( $P = 0.9 \text{ W/cm}^2$ ).

ся нерасплавленные гранулы краски. По данным термодатчика температура на поверхности образца при таком воздействии повышалась до  $T = 70\text{--}80^\circ\text{C}$ . На рис. 7, *b* показано место воздействия лазерного луча на образец (темная область). Для тальбограмм, имеющих период решетки порядка 400  $\mu\text{m}$ , такой эффект может приводить к существенному ухудшению прозрачности. При увеличении времени облучения до 10–15 min наблюдалось как изменение цвета краски (появление темно-желтого пятна), так и уменьшение эластичности полимерной пленки. Эти факты являются прямым свидетельством возникновения термоокислительных процессов, приводящих к деструкции полимерной матрицы и лазерной краски.

## Заключение

Таким образом, для лазерных источников видимого диапазона периодические решетки в датчике волнового фронта могут быть напечатаны лазерным принтером на прозрачной лавсановой пленке. Исследования продемонстрировали значительные преимущества датчика волнового фронта на основе эффекта Тальбота для анализа динамических возмущений оптической плотности в прозрачных материалах, а также воздушных трассах. Показано, что в спектральных интервалах 0.4–2  $\mu\text{m}$ , 2.6–5  $\mu\text{m}$ , 10.5–11.2  $\mu\text{m}$ , 12.6–13.4  $\mu\text{m}$  и 15–18  $\mu\text{m}$  промышленные пленки полиэтилентерефталата могут эффективно использоваться в качестве матрицы для тальбограмм. Следует заметить, что отсутствие специальной дорогой оптики, возможность увеличения поперечного размера тестируемого пучка свыше 10 см и применение для регистрации тальбограмм дешевых цифровых видеокамер делает метод, основанный на эффекте Тальбота, привлекательным для самых разных приложений, в частности, для анализа характеристик плазменных образований в объемном разряде [15,16], анализе газодинамических потоков [5,10], для контроля волнового фронта импульсных химических лазеров [9] или медицины [20]. Границы применимости полимерных тальбограмм определяются термическими эффектами,

возникающими при облучении образцов лазером, и могут быть скорректированы подбором условий воздействия и выбором специальной краски. Очевидно, что дешевая методика изготовления периодических решеток для реализации эффекта Тальбота, описанная в настоящей работе, позволяет с минимальными затратами проводить как демонстрационные эксперименты в учебных лабораториях [21], так и исследовать новые приложения этого эффекта в квантовой оптике и криптографии, которые вызывают повышенный интерес в последнее время [22–24].

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] И.В. Галактионов, А.В. Кудряшов, Ю.В. Шелдакова, А.А. Бялко, Ж. Борсони. *Квант. электрон.*, **47** (1), 32 (2017). DOI: 10.1070/QEL16061
- [2] Л.В. Ангошкин, Н.Н. Ботыгина, Л.А. Больбасова, О.Н. Емалеев, П.А. Коняев, Е.А. Копылов, П.Г. Ковадло, Д.Ю. Колобов, А.В. Кудряшов, В.В. Лавринов, Л.Н. Лавринова, В.П. Лукин, С.А. Чупраков, А.А. Селин, А.Ю. Шиховцев. *Оптика атмосферы и океана*, **29** (11), 895 (2016). DOI: 10.15372/AOO20161101
- [3] Lejia Hu, Shuwen Hu, Wei Gong, Ke Si. *Opt. Lett.*, **45** (13), 3741 (2020). DOI: 10.1364/OL.395579
- [4] Т.С. Пискунов, Н.В. Барышников, И.В. Животовский, А.А. Сахаров, В.А. Соколовский. *Опт. и спектр.*, **127** (10), 586 (2019). DOI: 10.21883/OS.2019.10.48362.167-19 [T.S. Piskunov, N.V. Baryshnikov, I.V. Zhivotovskii, A.A. Sakharov, V.A. Sokolovskii. *Opt. Spectr.* **127** (4), 639 (2019). DOI: 10.1134/S0030400X19100217
- [5] А.С. Коряковский, В.М. Марченко, А.М. Прохоров. *Труды ИОФАН*, **7**, 33 (1987).
- [6] М.А. Глухов, А.И. Голубев, М.О. Колтыгин, Р.С. Кузин, А.Н. Маначинский, Ф.А. Стариков. *Труды РФИЦ-ВНИИЭФ*, **20**, 300 (2015).
- [7] А.В. Котов, С.Е. Перевалов, М.В. Стародубцев, Р.С. Земсков, А.Г. Александров, И.В. Галактионов, А.В. Кудряшов, В.В. Самаркин, А.А. Соловьев. *Квант. электрон.*, **51** (7), 593 (2021). DOI: 10.1070/QEL17542
- [8] D.V. Podanchuk, A.A. Goloborodko, M.M. Kotov, A.V. Kovalenko, V.N. Kurashov, V.P. Dan'ko. *Appl. Opt.*, **55** (12), B150 (2016). DOI: 10.1364/AO.55.00B150
- [9] А.В. Ignat'ev, S.Yu. Kazantsev, I.G. Kononov, V.M. Marchenko, V.A. Feofilaktov, K.N. Firsov. *Quant. Electron.*, **38** (1), 69 (2008). DOI: 10.1070/QE2008v038n01ABEH013546
- [10] А.С. Борейшо, А.С. Коряковский, В.М. Марченко, А.В. Морозов, В.Э. Соколов. *ЖТФ*, **55** (10), 1943 (1985).
- [11] J. Wen, Y. Zhang, M. Xiao. *Adv. Opt. Photon.*, **5** (1) 83 (2013). DOI: 10.1364/AOP.5.000083
- [12] A.N. Morozov, L.R. Salbieva, B.G. Skuibin, E.V. Smirnov. *JETP Lett.*, **107**, 355 (2018). DOI: 10.1134/S0021364018060085
- [13] A.S. Koryakovskii, V.M. Marchenko. *Soviet J. Quant. Electron.*, **10** (5), 598 (1980).
- [14] И.Г. Пальчикова, С.С. Попова, С.В. Смирнов. *Компьютерная оптика*, **20**, 60 (2000).
- [15] S.N. Andreev, S.Y. Kazantsev, A.Y. Muzychka. *Frontiers in Optics + Laser Science 2021* (Optica Publishing Group, 2021), JTh5A.121. DOI: 10.1364/FIO.2021.JTh5A.121
- [16] В.В. Аполлонов, С.Ю. Казанцев. *Письма в ЖТФ*, **45** (9), 23 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.09.47708.17727 [V.V. Apollonov, S.Y. Kazantsev. *Tech. Phys. Lett.*, **45**, 443 (2019). DOI: 10.1134/S106378501905002X]
- [17] V.V. Apollonov, S.Y. Kazantsev. *Bull. Lebedev Phys. Institute*, **46** (5), 161 (2019). DOI: 10.3103/S1068335619050038
- [18] И.В. Губанова, С.Ю. Казанцев, А.Ю. Музыка. *Материалы Всероссийской научно-практической конференции* (Москва, Россия, 2021), с. 351–355.
- [19] A.A. Ionin, D.V. Badikov, V.V. Badikov, I.O. Kinyaevskiy, Yu.M. Klimachev, A.A. Kotkov, A.Yu. Kozlov, A.M. Sagitova, D.V. Sinitsyn. *Opt. Lett.*, **43** (18), 4358 (2018). DOI: 10.1364/OL.43.004358
- [20] S. Agarwal, V. Kumar, C. Shakher. *Imaging and Applied Optics 2017* (Optica Publishing Group, 2017), JTu5A.27.3. DOI: 10.1364/3D.2017.JTu5A.27
- [21] В.П. Кандидов, А.М. Корольков. *Физическое образование в вузах*, **4** (3), 99 (1998).
- [22] Lin Li, Haigang Liu, Chen Xianfeng. *Opt. Lett.*, **46**, 1281 (2021). DOI: 10.1364/OL.416988
- [23] Hu Jianqi, Brés Camille-Sophie, Chen-Bin Huang. *Opt. Lett.*, **43**, 4033 (2018). DOI: 10.1364/OL.43.004033
- [24] Jingjing Wu, Jicheng Wang, Yanguang Nie, Lifa Hu. *Opt. Express*, **27**, 35096 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.035096