

Запись брэгговских дифракционных решеток в фоточувствительных материалах методом оптического копирования

С.Б.Одинокоев, А.Ю.Жердев, М.В.Шишова, А.Б.Соломашенко, Д.С.Лушников, В.В.Маркин

Рассмотрена возможность получения мультиплексных брэгговских дифракционных решеток, используемых в качестве дифракционных оптических элементов (ДОЭ), методом когерентного оптического копирования рельефно-фазовой дифракционной решетки в толстослойные фоточувствительные материалы. Применение таких ДОЭ в составе световодных пластин (СП) для оптических систем формирования изображений позволяет энергетически эффективно осуществлять ввод и вывод оптического излучения в СП, а также минимизировать их массогабаритные параметры. Приведены результаты моделирования процесса формирования интерференционной структуры и записи серии мультиплексных дифракционных решеток внутри фоточувствительных материалов.

Ключевые слова: оптическое копирование, интерференционное копирование, голограммные и дифракционные оптические элементы, брэгговские дифракционные решетки.

1. Введение

В настоящее время с целью минимизации массогабаритных параметров в оптических системах устройств дополненной реальности, приборов визуального наблюдения (телескопах, прицелах), в 3D экранах активно используются световодные пластины (СП) с дифракционными оптическими элементами (ДОЭ) [1, 2]. В большинстве случаев в таких пластинах с ДОЭ на поверхности формируется система из нескольких «тонких» рельефно-фазовых дифракционных решеток, выполняющих функции ввода и вывода оптического излучения (моно- или полихроматического) в стеклянную пластину определенной толщины, внутри которой свет распространяется в условиях полного внутреннего отражения (ПВО) [3]. ДОЭ, в свою очередь, выполняются в виде структуры из дифракционных решеток, которые согласовывают падающие и выходящие коллимированные пучки света с их распространением внутри стеклянной СП, что и позволяет создавать «плоские» оптические компоненты с минимальными массогабаритными параметрами [4]. Однако «тонкие» рельефно-фазовые дифракционные решетки имеют низкую дифракционную эффективность (на практике не более 15%–20% [5]) и не обеспечивают требуемый диапазон углов (более 25°) ввода/вывода коллимированных пучков оптического излучения (света) в СП. Кроме того, при формировании цветного изображения в устройствах ввода и вывода оптического излучения на различных длинах волн используют три слоя «тонких»

рельефно-фазовых дифракционных решеток с тем, чтобы перенаправлять излучение на различных длинах волн (спектральные составляющие) под требуемыми углами. При этом параметры каждого слоя таких «тонких» рельефно-фазовых дифракционных решеток необходимо дополнительно оптимизировать под соответствующую длину волны, что значительно усложняет схему их записи.

Повысить дифракционную эффективность оптических систем в 2–3 раза можно за счет использования брэгговских дифракционных решеток (БДР) [6], записываемых в толстослойных фоточувствительных материалах, а увеличить углы поля ввода/вывода оптического излучения – путем повышения пространственных частот дифракционных решеток до 2500–3000 мм^{–1} и выбором для них соответствующей угловой селективности. При этом мультиплексную запись БДР (до 20–30 мультиплексов) требуется осуществлять в толстослойных фоточувствительных материалах.

Таким образом, применение БДР является закономерным этапом в создании нового поколения ДОЭ для световодных пластин, например, в оптических системах устройств дополненной реальности. В случае применения БДР угловая и спектральная селективности мультиплексированной решетки должны быть оптимизированы под свою часть углового поля при вводе и выводе коллимированных пучков излучения [7]. Такое представление является как бы аналогом каскада из «голографических брэгговских зеркал». Традиционно БДР используются для формирования пучков оптического излучения с высокой угловой селективностью (эталон угла) или спектральной селективностью (спектральный фильтр для полупроводниковых и волоконных лазеров). При использовании БДР в качестве ДОЭ для световодов в оптических схемах устройств, например, дополненной реальности, требования обратные – угловая или спектральная селективности должны быть как можно слабее, чтобы создавать меньше мультиплексов. Функция БДР в данном случае заключается в том, чтобы перенаправлять коллимированные пуч-

С.Б.Одинокоев, А.Ю.Жердев, М.В.Шишова, А.Б.Соломашенко, Д.С.Лушников, В.В.Маркин. Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет), Россия, 105005 Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1; e-mail: mshishova@bmstu.ru

Поступила в редакцию 18 февраля 2020 г., после доработки – 19 марта 2020 г.

ки излучения согласованно с волноводным распространением внутри стеклянной СП и требуемыми углами вывода пучков.

В настоящей работе предложен метод оптического копирования в когерентном свете «тонкой» рельефно-фазовой дифракционной решетки (далее фотошаблона) для записи мультиплексных БДР (до 50 мультиплексов) в толстослойных фоточувствительных материалах. Этот метод копирования позволяет значительно упростить оптическую схему записи мультиплексных БДР, используемых далее в качестве ДОЭ для световодных пластин, за счет исключения громоздкой стандартной схемы с интерференцией двух когерентных пучков света, требующей серьезной виброзащиты при длительных экспозициях и формировании высокочастотных (в пределах 3000 мм^{-1}) БДР. Кроме того, при когерентном оптическом копировании вместо трех дорогостоящих «цветных» лазеров (при формировании «цветных» ДОЭ в RGB-представлении) используется один лазер с длиной волны, определяемой спектральной чувствительностью фотоматериалов. Данный метод позволяет заменить эти сложные оптические схемы значительно более простой с использованием серии соответствующих фотошаблонов в виде одной или набора из нескольких «тонких» рельефно-фазовых дифракционных решеток, получение которых на слоях фоторезистов давно отработано методами лазерной и электронно-лучевой литографии [8]. Этот метод позволяет также заменить структуру из трех «тонких» рельефно-фазовых дифракционных решеток (при формировании цветных RGB-изображений) одной мультиплексной структурой из БДР, сформированной в одном фоточувствительном материале. В результате может быть получен единый оптический компонент с повышенной энергетической эффективностью и увеличенным углом поля формирования коллимированных пучков света при их выводе из СП, что обеспечивает значительно более стабильные параметры работы световодной пластины с ДОЭ в оптических системах устройств и приборов. При использовании таких толстослойных фоточувствительных материалов, как фототерморефрактивные стекла (с толщиной слоя до нескольких миллиметров [9]), в которых полностью отсутствуют эффекты усадки, максимально обеспечивается стабильность всех параметров и характеристик БДР.

2. Моделирование процесса получения интерференционных структур

Моделирование процесса получения мультиплексных БДР при их записи в качестве вводных и выводных дифракционных решеток методом оптического копирования [10], используемых далее при формировании единой световодной пластины с ДОЭ, включало применение серии фотошаблонов в виде рельефно-фазовых дифракционных решеток с требуемыми пространственными частотами. Как показано на рис. 1, при таком методе оптического копирования в толстослойный фоточувствительный материал (объемную среду) «тонкой» рельефно-фазовой дифракционной решетки имеют место следующие физические процессы. В ближней зоне области дифракции Френеля происходит интерференция дифрагированного оптического излучения между пучками 0-го, +1-го и –1-го дифракционных порядков. Аналогичный процесс в англоязычной литературе называют интерференционной, или голографической литографией с шаблоном (или фазо-

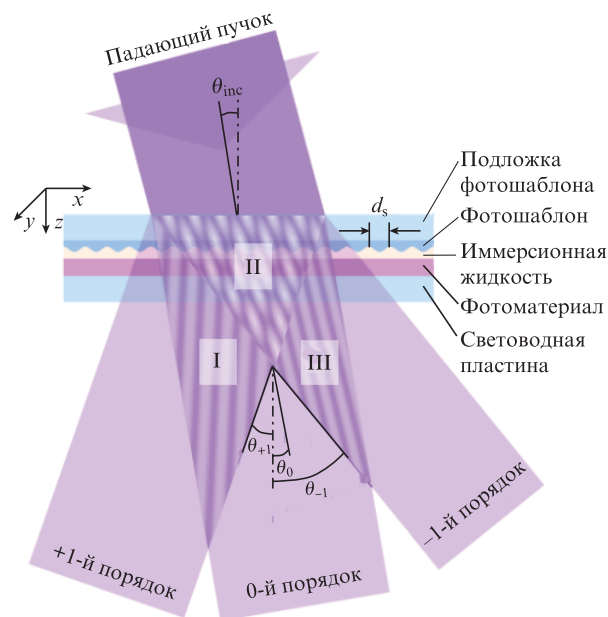


Рис. 1. Схема формирования интерферирующих пучков когерентного света в областях I, II, III при записи БДР в фоточувствительном материале по данному методу копирования; θ_{inc} и θ_m ($m = 0, +1$ и -1) — углы падения пучка и дифракции m -го порядка в среде, d_s — период решетки.

вой маской) при разовом воздействии света [11, 12]. Его часто используют для записи решеток в фотонных кристаллах — как в фоторезисте [13], так и в объемных средах [14].

Данный метод оптического копирования позволяет обеспечить высокие пространственные частоты БДР, которые после фиксации в фотоматериале также называют стратами [9, 10, 12]. Дополнительное преимущество метода заключается в том, что при проведении мультиплексирования БДР при каждой последующей экспозиции необходимо только поворачивать образец с шаблоном в записывающем пучке, что существенно упрощает схему их получения. Запись проводится в когерентном монохроматическом излучении, активном для конкретного толстослойного фоточувствительного материала (бихромованная желатина (БХЖ), фотополимеры). Этот метод позволяет также записывать БДР (как объемные структуры), у которых период страт значительно меньше периода рельефа. При копировании фоточувствительный материал и шаблон («тонкая» рельефно-фазовая дифракционная решетка) должны стыковаться эмульсионными сторонами через иммерсионную жидкость во избежание появления паразитных интерференционных полос.

Из рис. 1 видно, что если в качестве шаблона используется «тонкая» рельефно-фазовая дифракционная решетка с периодом d_s , то внутри фоточувствительного материала формируются три порядка дифракции в соответствии с уравнением решетки. Диаметр освещающего пучка должен соответствовать размеру области записи. Таким образом, при использовании оптического излучения с длиной волны λ , лежащей в области спектральной чувствительности фотоматериала, формируются три области записи: область II, в которой происходит интерференция пучков всех трех порядков дифракции (0-й, +1-й, –1-й порядки), и области I и III, в которых попарно интерферируют только 0-й и +1-й, а также 0-й и –1-й порядки соответственно. Интерференцию 0-го и –1-го порядков вну-

три области III, а также 0-го и +1-го порядков внутри области I можно интерпретировать как формирование рабочих направлений плоскостей одинаковой фазы в итоговой структуре БДР, которые после фиксации в фотоматериале становятся стратами (голографическими зеркалами).

Для анализа записываемой структуры проведем моделирование процесса интерференции. Пусть комплексные амплитуды интерферирующих волн имеют вид $E_1 \times \exp(-jk_1r)$, $E_2 \exp(-jk_2r)$ и $E_3 \exp(-jk_3r)$, что соответствует трем порядкам дифракции, представленным выше. Тогда в результате интерференции этих волн в областях I, II, III получим распределение интенсивности света

$$I(r) = |E_{\Sigma}(r)|^2 = \left| \sum_{n=1}^3 E_n \exp(-jk_n r) \right|^2 = I_0 \left[\sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 V_{ij} \cos(K_{ij}r + \varphi_{ij}) \right], \quad (1)$$

где $I_0 = \sum_{n=1}^N |E_n|^2$ – полная интенсивности света; $V_{ij} = |E_i E_j| / I_0$ – контраст интерференционной полосы между i -м и j -м пучками; $K_{ij} = k_i - k_j$ – вектор решетки при интерференции i -го и j -го пучков; волновые векторы волн k_N определяются углами дифракции; φ_{ij} – разность фаз между i -м и j -м пучками. Каждая пара интерферирующих пучков формирует одну синусоидальную решетку, которая характеризуется вектором K_{ij} . Результаты моделирования процесса единичной экспозиции (т. е. без последовательного мультиплексирования) показаны на рис.2.

В результате формируются четыре направления страт, определяемые углом падения оптического излучения (освещения) на фотошаблон, причем «рабочее» направление, обеспечивающее корректную работу с оптическим

излучением конкретной длины волны, перпендикулярно вектору K_2 (рис.2). Именно для БДР с вектором K_2 первоначально рассчитываются параметры шаблона и угол записи, чтобы отделить другие решетки с векторами K_1 , K_3 , K_4 , являющимися фактически «шумовыми» («паразитными») направлениями, которые формируют так называемые паразитные решетки, не участвующие в решении данной задачи по оптическому копированию. Для них условие Брэгга преобразуется к виду

$$\lambda = 2dn_{\text{sub}} \sin(\theta_{\text{sub}} - \gamma), \quad (2)$$

где γ – угол наклона интерференционных плоскостей БДР относительно нормали к поверхности подложки фотоматериала; θ_{sub} – угол падения оптического излучения относительно нормали к поверхности подложки в среде; d – период объемной интерференционной структуры (будущей БДР). Дифракционная эффективность шаблона («тонкой» рельефно-фазовой дифракционной решетки) определяет контраст при записи всей структуры в фоточувствительном материале. Результаты моделирования показали, что даже при очень низкой дифракционной эффективности (в пределах 3%) контраст интерференционных полос остается выше 0.6 в области II для трехлучевой интерференции и выше 0.34 в областях I, III для двухлучевой интерференции. Следует отметить, что при снижении контраста необходимо увеличивать минимальное значение интенсивности света в интерференционном поле. Это важно при выборе экспозиции, чтобы полностью использовать динамический диапазон фоточувствительного материала.

В табл.1 в качестве примера приведены параметры дифракции на конкретных интерференционных структурах, рассчитанных для зеленого участка спектра. При записи использовался УФ лазер с длиной волны $\lambda = 343$ нм

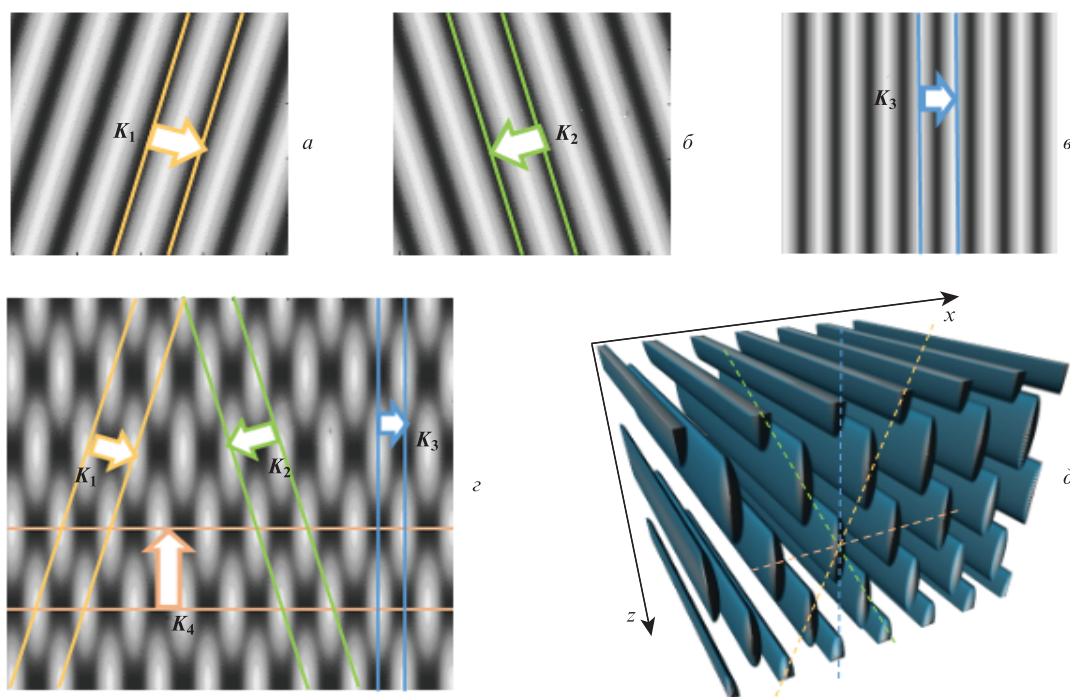
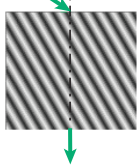
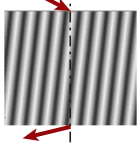
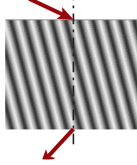


Рис.2. Схема, поясняющая формирование страт внутри фоточувствительного материала в случае падения оптического излучения на шаблон по нормали: распределение интенсивности света при попарной интерференции пучков в 0-м и +1-м порядках (а), в +1-м и –1-м порядках (б), в 0-м и –1-м порядках (в), при трехлучевой интерференции пучков света (г), а также изображение объемной структуры (д). Цветной вариант рис.2 помещен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

Табл.1. Параметры дифракции Брэгга на записанных структурах.

Вектор решетки	K_2	K_1	K_3	K_4
Угол наклона страт γ	$\gamma_2 = 0.5(\theta_{-1} + \theta_0)$, 26.7°	$\gamma_1 = 0.5(\theta_0 + \theta_{+1})$, -5.3°	$\gamma_3 = 0.5(\theta_{-1} + \theta_{+1})$, 11.6°	$\gamma_4 = 90^\circ$
Период БДР d	$d_2 = d_s \cos \gamma_2$, 388 нм	$d_1 = d_s \cos \gamma_1$, 433 нм	$d_3 = d_s \cos \gamma_3$, 426 нм	$d_4 = 2d_s \sin(\gamma_4 - \gamma_2) \cos \gamma_1 / \sin(\gamma_2 - \gamma_1)$, 1463 нм
Длина волны Брэгга (2)	$\lambda_2 = 523.5$ нм	$\lambda_1 = 1109.7$ нм	$\lambda_3 = 851.7$ нм	$\lambda_4 = 2125.0$ нм
Иллюстрация				

(попадает в область чувствительности БХЖ); период дифракционной решетки фотошаблона d_s составил 435 нм (см. рис.1). Структура рассчитана для преобразования входного изображения в выходное при использовании излучения с длиной волны $\lambda_G = 520$ нм, показатель преломления материала $n = 1.5$. Угол падения излучения в процессе записи ($\theta_{inc} = -15^\circ$) однозначно определяет все четыре направления страт: «рабочее» K_2 и «паразитные» K_1, K_3, K_4 , (см. рис.2).

Отметим, что в приведенном примере дифракция Брэгга на паразитных решетках (структурах) происходит в ИК диапазоне и не будет влиять на передаваемое СП-изображение. Тем не менее следует ожидать снижения дифракционной эффективности в «рабочем» направлении дифракции и, как следствие, повышения «шумовой» составляющей при выводе изображения.

Результаты моделирования процесса получения мультиплексных БДР показаны на рис.3, где представлена сложная интерференционная структура, полученная при мультиплексировании БДР из двух, пяти и десяти последовательных экспозиций. Математически данный процесс представляет собой аддитивное сложение результатов нескольких экспозиций и наложения нескольких интерференционных структур друг на друга. На практике количество мультиплексов определяется угловой селективностью дифракционной решетки, сформированной при определенной единичной экспозиции. При светодиодном освещении готового мультиплексного ДОЭ волна, падающая под конкретным углом на его входной элемент, выполняет функцию опорной волны, участвующей в формировании одной структуры. Аналогичный принцип спра-

ведлив и для выводного ДОЭ. В силу свойств дифракции Брэгга при освещении входной мультиплексной БДР дифракция возникает только от той решетки, в образовании которой она участвовала, и восстанавливает только связанную с ней предметную волну, удовлетворяющую условию Брэгга.

Динамический диапазон модуляции показателя преломления накладывает определенные ограничения на эффективное использование регистрирующей среды при мультиплексировании. Кроме того, мультиплексная запись через единый фотошаблон связана с допустимыми углами падающего пучка, поскольку в области подложки должны существовать пучки всех трех порядков дифракции (0, +1, -1) в соответствии с уравнением дифракционной решетки. В случае, показанном на рис.3, фотошаблон с периодом $d_s = 396$ нм взаимодействовал с УФ излучением ($\lambda = 325$ нм), что ограничило угол записи θ_{inc} на уровне примерно 40° .

3. Результаты экспериментов

Согласно описанному выше методу оптического копирования был проведен ряд экспериментов по записи мультиплексных БДР в слоях БХЖ толщиной 15 мкм излучением лазера с длиной волны $\lambda = 405$ нм. Диаметр записывающего пучка составлял 40 мм. Для наблюдения изображения, передаваемого световодной пластиной с ДОЭ, использовался светодиод с широкой полосой спектра ($\lambda = 520 \pm 15$ нм). Предварительно на основе данных об угловой селективности БДР, рассчитанных по теории связанных волн [9], проводился расчет периода фотошаблона и требуемых углов падения излучения при мультиплексной записи. В табл.2 приведены значения пространственной частоты БДР, полученные при мультиплексировании для семи последовательных экспозиций фотошаблона с пространственной частотой $v_s = 2530$ мм⁻¹.

Экспериментальный образец с мультиплексными БДР, изготовленный в соответствии со спектрально-угловыми характеристиками осветителя, устанавливался в оптиче-

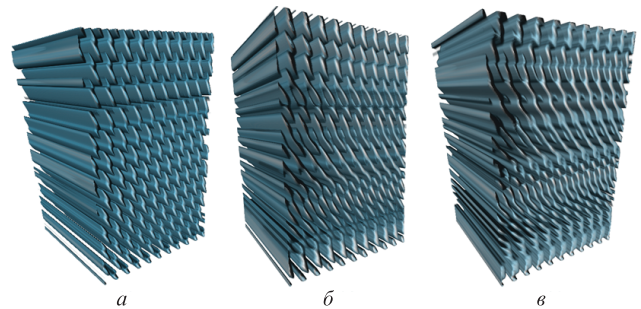


Рис.3. 3D иллюстрация формирования объемной интерференционной структуры внутри фоточувствительного материала: при мультиплексе из двух последовательных экспозиций (углы записи 15 и 35°) (а), из пяти последовательных экспозиций (углы записи от 15 до 35° с шагом 5°) (б) и десяти последовательных экспозиций (от 4 до 40° с шагом 4°) (в).

Табл.2. Пространственная частота БДР.

Номер экспозиции	Частота БДР v_2 (мм ⁻¹)	Номер экспозиции	Частота БДР v_2 (мм ⁻¹)
1	2748	5	3100
2	2809	6	3282
3	2883	7	3757
4	2977		

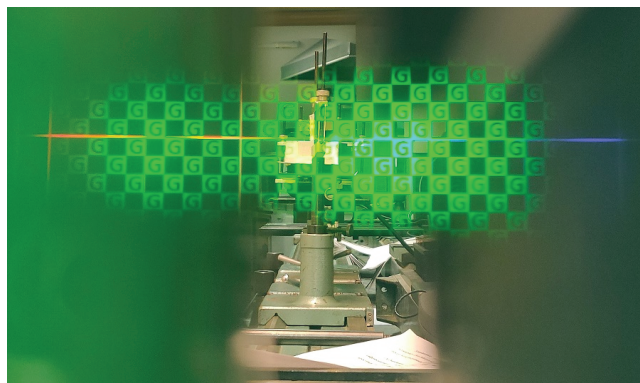


Рис.4. Монохромное тестовое изображение, передаваемого световодной пластиной с ДОЭ, состоящим из семи мультиплексных БДР.

скую систему устройства дополненной реальности [15]. На рис.4 представлена фотография тестового монохромного изображения, полученного с помощью световодной пластины с ДОЭ из семи мультиплексных БДР. На заднем плане наблюдается изображение рейтера на оптической скамье. Угол поля зрения переданного изображения 2ω составил 27° , угловая селективность каждой отдельной БДР из мультиплекса примерно равна 3.85° .

Описанный метод позволяет создавать световодные пластины с ДОЭ для оптических приборов визуального наблюдения, устройств дополненной реальности, а также может применяться для формирования наноэлектронных компонент, фотонных кристаллов, метаматериалов, субдлинноволновых структур. Особый интерес представляет применение световодных пластин с ДОЭ для ввода/

вывода многоцветных RGB-изображений, в которых символическая информация пространственно разделена внутри горизонтального поля зрения. В этом случае не требуется запись дополнительных мультиплексных БДР, отвечающих за дополнительные длины волн. При выводе изображения его участки различных цветов естественным образом распределены по полю в соответствии со спектральными свойствами мультиплексных БДР (см. рис.3). Создание цветных систем дополненной реальности, в которых применяются световоды с БДР, требует в первом приближении втрое больше мультиплексов при записи.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-00304).

1. Zhang Y., Fang F. *Precision Eng.*, **60**, 482 (2019).
2. Syberfeldt A., Danielsson O., Gustavsson P. *IEEE Access*, **5**, 9118 (2017).
3. Draper C.T. et al. *Appl. Opt.*, **58**, A251 (2019).
4. Yin K., Lee Y.H., He Z., Wu S.T. *Opt. Express*, **27**, 5814 (2019).
5. Xiao J., Liu L., Han J., Wang Y. *Opt. Commun.*, **452**, 411 (2019).
6. Waldern J.D., Grant A.J., Popovich M.M. *Proc. SPIE*, **10676**, 106760G (2018).
7. Ingersoll G.B., Leger J.R. *Appl. Opt.*, **54**, 6244 (2015).
8. Pimpin A., Srituravanich W. *Engineering J.*, **16**, 38 (2012).
9. Кузьмин Д. В. и др. *Труды IX Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике* (М.: НИЯУ МИФИ, 2020, с. 641).
10. Ванин В.А. *Квантовая электроника*, **5**, 1413 (1978) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **8**, 809 (1978)].
11. Campbell M. et al. *Nature*, **404**, 53 (2000).
12. Микляев Ю.В. и др. *Компьютерная оптика*, **32**, 357 (2008).
13. Chanda D., Aboldhasemi L., Herman P.R. *Opt. Express*, **14**, 8568 (2006).
14. Wolf A.J. et al. *Microelectron Eng.*, **98**, 293 (2012).
15. Grad Ya.A. et al. *Proc. SPIE*, **10679**, 106791W (2018).