

ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ И ДРУГИЕ ВОПРОСЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**Электрооптический деспеклер на основе негеликоидального сегнетоэлектрического жидкого кристалла****А.Л.Андреев, Н.В.Заляпин, Т.Б.Андреева, И.Н.Компанец**

В экспериментальном образце деспеклера, представляющем собой электрооптическую ячейку с негеликоидальным жидким сегнетоэлектриком толщиной 20 мкм, при приложении электрического поля с напряженностью ~ 3 В/мкм и частотой 2 кГц реализована пространственно неоднородная фазовая модуляция лазерного пучка глубиной более π , позволяющая осуществить подавление спекл-шума с эффективностью 10.7 дБ.

Ключевые слова: голография, спекл-шум, деспеклер, жидкий кристалл, рассеяние света, фазовая модуляция света, разрушение когерентности пучка, подавление спеклов.

1. Введение

В работах [1,2] был предложен метод подавления спекл-шума в лазерных изображениях с помощью простого оптического модулятора – электрооптической ячейки, в которой использовался сегнетоэлектрический жидкий кристалл (СЖК) со спиральной (геликоидальной) структурой. Сфазированность волн в лазерном пучке и, следовательно, их способность интерферировать с образованием спекл-шума разрушались в реальном времени при прохождении лазерного пучка через СЖК-ячейку при подаче на неё последовательности биполярных двухчастотных электрических импульсов специальной формы. Их воздействие приводило к формированию в объёме СЖК быстро изменяемых во времени мелкомасштабных структур со случайным распределением градиентов показателя преломления, к хаотичной модуляции положения индикатрисы рассеяния СЖК и, как следствие, к пространственно неоднородной по апертуре ячейки фазовой модуляции света глубиной порядка и более π .

Преимущества использования СЖК-ячейки в качестве деспеклера очевидны [2, 3]:

- по сравнению с механическими устройствами – вибрирующей мембраной или вращающейся фазовой маской – деспеклер на основе СЖК-ячейки обеспечивает простоту, стабильность и долговременную надежную работу;

- по сравнению с фазовым пространственным модулятором, формирующим ортогональные функции (фактически с микродисплеем), при использовании деспеклера существенно упрощаются конструкция, технология и электроника управления;

- по сравнению с фотополимерной средой, в которой в виде наложенных голограмм записаны многочислен-

ные спекл-картины, в СЖК-деспеклере отсутствуют критичность к изменению длины волны, шумы и «усталость»;

- по сравнению со светорассеивающим диффузором, с рельефографическим модулятором света, представляющим собой отражательную дифракционную решетку, с устройствами сканирования лучей и перемещения их в волоконных световодах и трубках, а также с устройствами, использующими лазеры с удвоением частоты и параметрическую генерацию, СЖК-деспеклер является существенно более компактным и имеет меньшие потери света.

Важно также, что хорошо отработанная технология позволяет варьировать размер апертуры СЖК-деспеклера от долей квадратного сантиметра до нескольких квадратных сантиметров при его толщине 1–2 мм, включая чип управления.

Следует отметить, что частота модуляции светового излучения в режиме пространственно неоднородной модуляции фазы в электрооптической ячейке с геликоидальным СЖК не превышала 400 Гц и не зависела от напряженности электрического поля при $E \geq 2$ В/мкм [3], что, безусловно, сужало круг возможных применений деспеклера. В дальнейшем использование электрооптической ячейки с негеликоидальным СЖК позволило увеличить частоту модуляции фазовой задержки до 1 кГц [4, 5]. Геликоидальная закрутка директора (направления главной оптической оси СЖК) была подавлена за счёт взаимодействия хиральных добавок с противоположными знаками оптической активности. Пространственно неоднородная фазовая модуляция света в объёме негеликоидального СЖК и подавление спекл-шума в формируемых лазером изображениях достигались при одновременном воздействии высокочастотного (до 10 кГц) и низкочастотного (до 1000 Гц) импульсного напряжения. Главными достоинствами модулятора, наряду с увеличением частоты модуляции фазовой задержки, явились отсутствие искажений в спектральном составе модулируемого светового излучения и отсутствие светорассеяния при выключении электрического поля, обусловленные подавлением геликоида. Кроме того, одинаковая форма импульсов низкочастотного и высокочастотного напряжения позволила упростить электронную схему управления модулятора.

А.Л.Андреев, Н.В.Заляпин, Т.Б.Андреева. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53
И.Н.Компанец. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: kompan@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 16 августа 2017 г.

Учитывая прогресс, достигнутый при использовании негеликоидального СЖК в электрооптическом деспеклере, мы провели работу по оптимизации СЖК и режима электрического управления. При этом была отработана методика регистрации изображений спекл-картин и их обработки с помощью специального программно-математического обеспечения.

2. Методика регистрации и обработки спекл-картин

Как и в большинстве работ, связанных с регистрацией и подавлением спеклов, применялась следующая методика: лазерный пучок, прошедший через устройство подавления спеклов (деспеклер), направляется на ПЗС-камеру, которая регистрирует распределение интенсивности излучения в поперечном сечении пучка в отсутствие управляющего напряжения на электродах СЖК-ячейки (до подавления спеклов) и при его наличии (когда спеклы в той или иной степени подавлены).

Полученные изображения спекл-картин обрабатывались с помощью специально разработанной программы для расчета параметров спекл-структур (интенсивности, контрастного отношения, коэффициента ослабления), по которым строились профили распределения интенсивности в изображении лазерного пятна. Программа включала библиотеку Python Image Library (PIL) для работы с растровой графикой и изображениями [6], содержащую базовые функции обработки изображений, в том числе возможность получения числового значения цветов (R , G , B) пикселя с использованием метода `getpixel(i, j)`, где i , j – координаты пикселя в изображении. По значениям R , G , B вычислялось значение интенсивности. Полученные данные (координаты пикселей и соответствующие им значения интенсивности) выгружались в создаваемый программой файл MS Excel. Для решения этой задачи использовалась библиотека `xlwt`, позволяющая создавать и заполнять файлы Excel.

Для вычисления контраста спекл-структур использовалось следующее соотношение [7]:

$$C = \sigma / \langle I \rangle, \quad (1)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение флуктуации интенсивности, а $\langle I \rangle$ – среднее значение интенсивности. Значения контрастного отношения C спекл-картин варьируются от 0 до 1. Максимально возможное значение $C = 1$ достигается только в спекл-полях, наблюдаемых при дифракции широких лазерных пучков на сильно шероховатой поверхности или сильно рассеивающем транспаранте.

Нижний предел интенсивности (0) определяет уровень черного в изображении спекл-структуры, а верхний предел (255) – уровень белого. Промежуточные значения интенсивности заполняют динамический диапазон, образуя полутона в изображении – шкалу градаций серого, которая характеризует интенсивность света в каждом пикселе регистрирующей ПЗС-матрицы.

Эффективность уменьшения контраста спекл-структур рассчитывалась как отношение (в децибелах) контрастного отношения при выключенном деспеклере (C_1) к таковому при включенном деспеклере (C_n) [8]:

$$R = 10 \lg(C_1 / C_n). \quad (2)$$

3. Экспериментальные результаты

В работе использовался негеликоидальный СЖК со следующими параметрами: спонтанная поляризация $P_s = 40$ нКл/см², коэффициент вращательной вязкости $\gamma_\varphi = 0.7$ пуаз, угол наклона молекул в смектических слоях $\Theta_0 = 23^\circ$ (при температуре 20 °С), температурный интервал существования сегнетоэлектрической фазы от 2 °С до 75 °С.

В электрооптической ячейке с негеликоидальным СЖК светорассеяние происходит на границах спонтанно упорядоченных областей, которые образуются благодаря появлению волн стационарного профиля – динамических солитонов [9]. Динамические солитоны возникают в структурах с периодическими деформациями смектических слоев, приводящими к периодическим изменениям положения директора вдоль каждого слоя при переходе к максвелловскому механизму диссипации энергии при нелинейном процессе переориентации директора СЖК в переменном электрическом поле. Смектические слои трактуются как периодическая упорядоченность центров масс молекул в направлении директора с периодом порядка длины молекулы СЖК. Для используемого СЖК период деформации слоев лежит в пределах 1.5–2 мкм.

Переменное электрическое поле, приложенное вдоль смектических слоев, взаимодействуя со спонтанной поляризацией, изменяет распределение директора в каждом слое. Развитие этого процесса приводит к появлению солитонов, которые представляют собой волновые пакеты с локализованной в них периодической волной [9]. В свою очередь, они вызывают появление градиентов показателя преломления – центров рассеяния света (иначе переходных доменов), причем светопропускание и эффективность светорассеяния (контрастное отношение) зависят от частоты изменения электрического поля.

Максимальной эффективности светорассеяния соответствует регулярная структура рассеивающих центров в виде циркулярных доменов, достаточно равномерно распределенных по объему СЖК. В зависимости от частоты изменения электрического поля или длительности импульсов управляющего напряжения и толщины электрооптической ячейки наблюдается несколько максимумов эффективности светорассеяния – светорассеивающих мод [9].

Переходы между светорассеивающими модами, которым соответствуют максимумы эффективности светорассеяния, при одновременной подаче на электрооптическую ячейку импульсов напряжения длительностью, соответствующей различным максимумам, приводят к хаотичному изменению положения индикатрисы рассеяния и к пространственно неоднородной модуляции фазовой задержки [4, 9].

В результате кратковременного (менее 30 мкс) включения светорассеяния в объеме СЖК формируются структуры со случайным распределением градиентов показателя преломления, что, в свою очередь, является причиной пространственно неоднородной по сечению пучка фазовой модуляции света в электрооптической ячейке. Заметим, что такое кратковременное светорассеяние не чувствительно для глаз, оно не искажает структуру изображений, не влияет на их восприятие, и световые потери на него незначительны (менее 5%).

При отсутствии управляющего напряжения на электрооптической ячейке контрастное отношение спекл-картин для полупроводникового лазера (длина волны излучения $\lambda = 0.65$ мкм) составляет 0.82 (рис. 1).

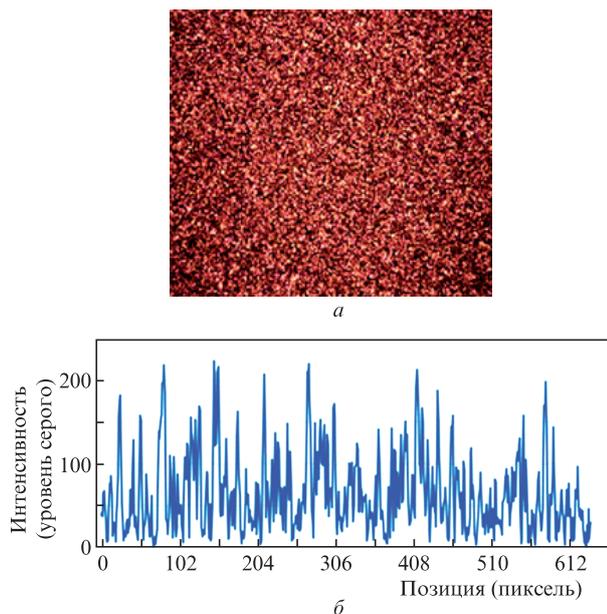


Рис.1. Фотография распределения интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного пучка, прошедшего через электрооптическую ячейку при отсутствии управляющего напряжения (а), и распределение интенсивности на анализируемых пикселях вдоль горизонтальной линии по центру фотографии (б); толщина электрооптической ячейки 13 мкм, $C_1 = 0.82$, $\lambda = 0.65$ мкм.

Амплитуда, длительность, частота следования импульсов низкочастотного и высокочастотного напряжений и глубина модуляции выбирались таким образом, чтобы получить модуляцию фазовой задержки с максимальной степенью неоднородности и достичь максимально возможной частоты пространственно неоднородной фазовой модуляции при условии, что эффективность светорассеяния изменяется за время действия каждого импульса из их последовательности, но не достигает своего максимального значения.

Для электрооптических ячеек, толщина которых находится в пределах 8–13 мкм, наблюдался один максимум эффективности светорассеяния. В этом случае светопропускание и эффективность светорассеяния зависят только от частоты изменения электрического поля. Кроме того, существуют только две светорассеивающие моды – низкочастотная и высокочастотная. В низкочастотной моде (частота меньше 200 Гц) переход в рассеивающее состояние происходит при каждом изменении знака электрического поля, и эффективность светорассеяния не зависит от полярности напряжения. В высокочастотной моде (частота выше 1 кГц) эффективность светорассеяния зависит от полярности управляющего напряжения, а длительность процесса рассеяния возрастает по мере увеличения частоты.

Модуляция фазовой задержки с высокой степенью неоднородности наблюдалась, например, при модуляции высокочастотного напряжения (меандр) сигналом с разной длительностью переднего и заднего фронтов, в частности напряжением пилообразной формы (рис.2). При подаче такого напряжения на электрооптическую ячейку контрастное отношение спекловой картины уменьшается до 0.1 (рис.3). При этом эффективность подавления спеклшума, понимаемая как уменьшение контрастного отношения спекловой картины на рис.1 (между контрастными отношениями C_1 и C_2), составила 9.1 дБ.

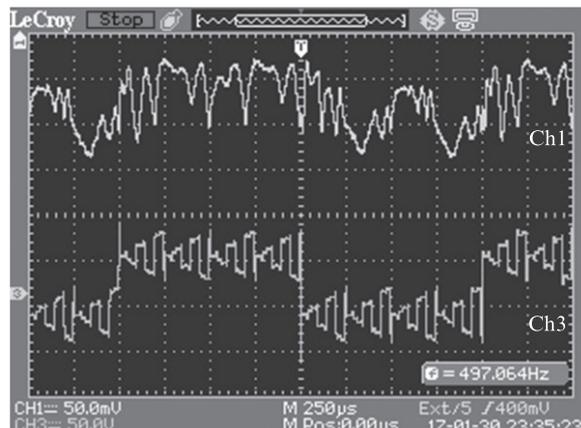


Рис.2. Осциллограммы управляющего напряжения (канал Ch3) и модуляции фазовой задержки (канал Ch1); частота следования низкочастотного сигнала (меандр) 500 Гц, амплитуда ± 32 В, частота модулирующего сигнала 10 кГц (меандр, модулированный сигналом треугольной формы с частотой 4 кГц), амплитуда модулирующего сигнала от 0 до ± 13 В, толщина электрооптической ячейки 13 мкм, напряженность электрического поля $E = 3.46$ В/мкм.

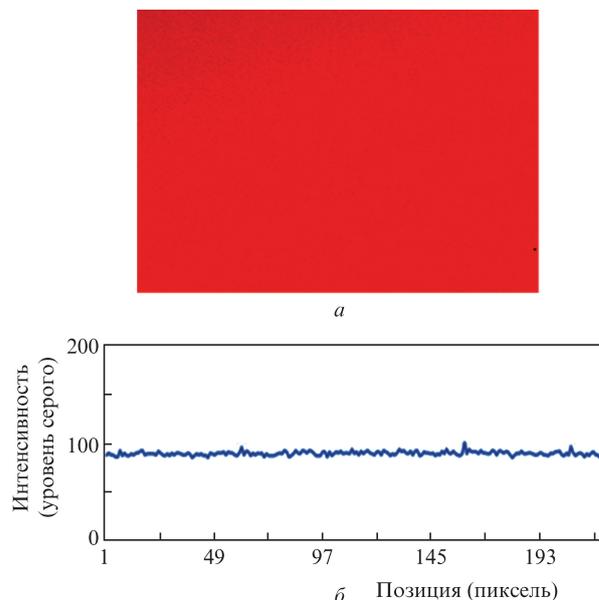


Рис.3. Фотография распределения интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного пучка, прошедшего через электрооптическую ячейку при подаче управляющего напряжения (а), и распределение интенсивности на анализируемых пикселях вдоль горизонтальной линии по центру фотографии (б); толщина электрооптической ячейки 13 мкм, $C_2 = 0.1$, $\lambda = 0.65$ мкм.

Отметим, что частота пространственно неоднородной модуляции фазы в электрооптической ячейке толщиной 13 мкм не превышает 500 Гц, поскольку интервал, в котором существует низкочастотная мода, ограничен частотой управляющего напряжения (~ 200 Гц), а переход в высокочастотную моду начинается при частоте ~ 700 Гц. Частота перехода снижается при уменьшении напряженности электрического поля и перестает зависеть от напряженности при $E \geq 3$ В/мкм.

Как было отмечено выше, для электрооптических ячеек, толщина которых находится в пределах 8–13 мкм, наблюдался один максимум эффективности светорассеяния. Второй максимум появляется при увеличении толщины ячейки до 15–17 мкм. В этом случае переходы меж-

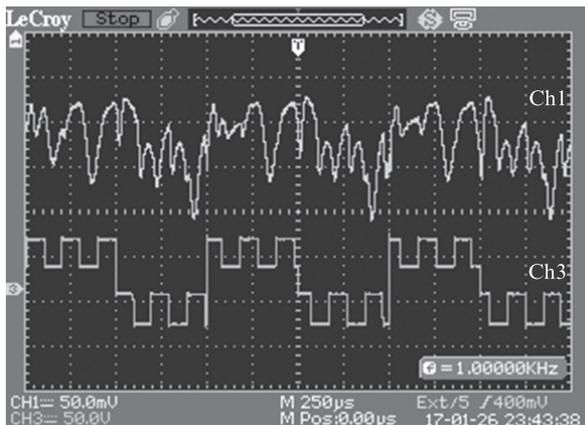


Рис.4. Осциллограммы управляющего напряжения (канал Ch3) и модуляции фазовой задержки (канал Ch1); частота следования низкочастотного сигнала (меандр) 1 кГц, амплитуда ± 40 В, частота модулирующего сигнала (меандр) 5 кГц, амплитуда ± 15 В, толщина электрооптической ячейки 16 мкм, $E = 3.44$ В/мкм.

ду светорассеивающими модами, которым соответствуют максимумы эффективности светорассеяния, при подаче на электрооптическую ячейку биполярных импульсов напряжения длительностью, соответствующей различным максимумам, приводят к хаотичному изменению положения индикатрисы рассеяния.

В результате фазовая модуляция с высокой степенью неоднородности достигалась при амплитудной модуляции низкочастотного управляющего напряжения (меандр с частотой 1 кГц) высокочастотным напряжением той же формы с частотой 5 кГц при напряженности электрического поля ~ 3.5 В/мкм (рис.4). При подаче управляющего напряжения на электрооптическую ячейку, как и в предыдущем случае, контрастное отношение спекловой картины уменьшилось до 0.1, но частота модуляции фазовой задержки увеличилась до 1 кГц при такой же напряженности электрического поля, как и для ячейки толщиной 13 мкм. Эффективность подавления спекл-шума составила 9.1 дБ. Отметим, что в данном случае увеличение частоты как низкочастотного, так и высокочастотного напряжения выше 1 и 5 кГц соответственно при неизменной напряженности электрического поля приводит к росту контраста спекловой картины.

Третий максимум эффективности светорассеяния появлялся при увеличении толщины электрооптической ячейки до 18 мкм [3, 9]. При толщине ячейки 20 мкм и более максимумы начинают смещаться в сторону более коротких импульсов управляющего напряжения, что позволяет увеличить частоту модуляции фазовой задержки, не увеличивая напряженность электрического поля. Так, для ячейки толщиной ~ 20 мкм при напряженности электрического поля 3.25 В/мкм фазовая модуляция с высокой степенью неоднородности достигалась при амплитудной модуляции низкочастотного биполярного напряжения (меандр) с частотой 2 кГц высокочастотным сигналом той же формы с частотой 7 кГц (рис.5).

Модуляции фазовой задержки низкочастотным и высокочастотным управляющим напряжением при одновременной подаче на электрооптическую ячейку импульсов напряжения, длительность которых соответствует первому и второму максимуму эффективности светорассеяния, позволила уменьшить контрастное отношение спекловой картины до 0.07 (рис.6). Эффективность умень-

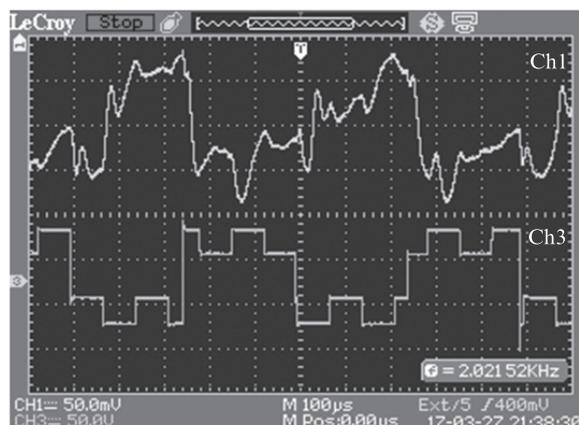


Рис.5. Осциллограммы управляющего напряжения (канал Ch3) и модуляции фазовой задержки (канал Ch1); частота следования низкочастотного сигнала (меандр) 2 кГц, амплитуда ± 50 В, частота модулирующего сигнала (меандр) 7 кГц, амплитуда ± 15 В, толщина электрооптической ячейки 20 мкм, $E = 3.25$ В/мкм.

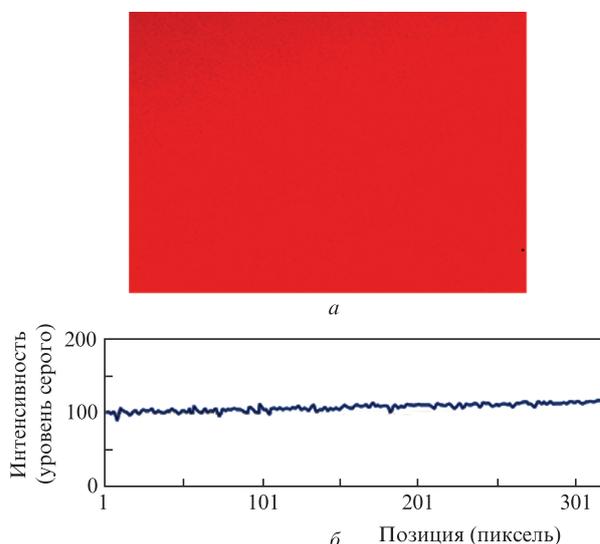


Рис.6. Фотография распределения интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного пучка, прошедшего через электрооптическую ячейку при подаче управляющего напряжения (а), и распределение интенсивности на анализируемых пикселях (вдоль горизонтальной линии по центру фотографии) (б); $C_3 = 0.07$, толщина электрооптической ячейки 20 мкм, $\lambda = 0.65$ мкм.

шения контрастного отношения спекловой картины составила 10.7 дБ, а частота модуляции фазовой задержки увеличилась до 2 кГц при меньшей напряженности электрического поля, нежели для ячеек толщиной 13 и 16 мкм.

4. Заключение

В результате кратковременного (менее 30 мкс) включения светорассеяния в объёме негеликоидального СЖК формируются структуры со случайным распределением градиентов показателя преломления, что, в свою очередь, является причиной пространственно неоднородной по сечению пучка фазовой модуляции света в электрооптической ячейке. Такая модуляция глубиной порядка π и более позволила осуществить в электрическом поле напряженностью около 3 В/мкм эффективное подавление спекл-шума в поперечном сечении лазерного пучка – эффективность уменьшения контраста спекловой картины

составила 10.7 дБ на частоте модуляции фазовой задержки 2 кГц при отсутствии искажений в спектральном составе модулируемого излучения.

В зависимости от технических требований электрооптический деспеклер на основе негеликоидального СЖК может работать при достаточно малых (до 35 В) управляющих напряжениях, если толщина электрооптической ячейки находится в пределах 10–13 мкм. В этом случае уменьшение контраста спекловой картины составляет около 9 дБ, но частота модуляции фазовой задержки не превышает 500 Гц. С другой стороны, увеличение толщины ячейки до 18–20 мкм позволяет уменьшить контраст спекловой картины на 10.7 дБ и увеличить частоту модуляции фазовой задержки до 2 кГц, однако амплитуда управляющего напряжения в этом случае возрастает до 60–65 В.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН № 25 «Фундаментальные и прикладные проблемы фотоники и физики новых оптических матери-

алов» и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

1. Андреев А.Л., Компанец И.Н., Минченко М.В., Пожидаев Е.П., Андреева Т.Б. *Квантовая электроника*, **38** (12), 1166 (2008) [*Quantum Electron.*, **38** (12), 1166 (2008)].
2. Компанец И.Н., Андреев А.Л. Патент РФ № 2373558 (2009).
3. Andreev A.L., Andreeva T.B., Kompanets I.N., Minchenko M.V., Pozhidaev E.P. *J. of SID*, **17**, 801 (2009).
4. Андреев А.Л., Андреева Т.Б., Компанец И.Н., Заляпин Н.В. *Квантовая электроника*, **44** (12), 1136 (2014) [*Quantum Electron.*, **44** (12), 1136 (2014)].
5. Компанец И.Н., Андреев А.Л., Андреева Т.Б. Патент РФ № 561307 (2015).
6. Python Image Library. URL: <http://www.pythonware.com/products/pil/>, <http://effbot.org/imagingbook/>, <http://www.python-excel.org/>.
7. Goodman J.W. *J. Opt. Soc. Am.*, **66**, 1145 (1976).
8. *LSR-3000 & LSR-OEM Series. Laser Speckle Reducer (Application Note)*. Update: 07.07.2011.
9. Andreev A., Andreeva T., Kompanets I., Zalyapin N., Xu H., Pivnenko M., Chu D. *Appl. Opt.*, **55**, 3483 (2016).

ПОПРАВКА

Кочиев М.В., Кучеренко И.В., Уцына Е.В. Динамика фотолюминесценции прямых и непрямых экситонов в сверхрешетках CdTe/ZnTe со слоями квантовых точек («Квантовая электроника», 2017, т. 47, № 9, с. 867 – 870).

В статье допущены ошибки в подписях к горизонтальным осям на рис.2,б и 3,б. Вместо «Время (нс)» должно быть «Время (мкс)».