

Подавление спекл-шума с помощью ячейки негеликоидального сегнетоэлектрического жидкого кристалла

А.Л.Андреев, Т.Б.Андреева, И.Н.Компанец, Н.В.Заляпин

Исследован метод подавления спекл-шума в формируемых лазером изображениях с помощью быстродействующей электрооптической ячейки с сегнетоэлектрическим жидким кристаллом (СЖК), в котором геликоид отсутствует, т. е. компенсирован. Рассмотрены характер деформации смектических слоев в электрическом поле и механизм пространственно неоднородной фазовой модуляции проходящего через ячейку лазерного пучка с разрушением фазовых соотношений в нем. Указаны преимущества ячейки с негеликоидальным СЖК по сравнению с ранее исследованной ячейкой с геликоидальным кристаллом.

Ключевые слова: спекл-шум, деспеклер, фазовая модуляция света, сегнетоэлектрический жидкий кристалл, смектические слои, бесспиральная структура, солитон, рассеяние света.

1. Введение

Проблема спекл-шума в изображениях, формируемых лазерным пучком, обычно решается путем разрушения (усреднения) фазовых соотношений в пучке до проецирования изображений на экран при быстрой (свыше 1/50 с) пространственно неоднородной модуляции фазы глубиной порядка π и более. Устройство подавления спекл-шума – деспеклер – должно иметь большую разрешающую способность (порядка сотен и даже тысячи мм^{-1}) из-за необходимости последующего расширения пучка, а также не должно ухудшать интенсивность лазерного пучка и его направленность.

В качестве деспеклера первоначально использовалась вращающаяся прозрачная фазовая маска со случайным пространственным распределением фазы [1, 2], а в более поздней работе [3] – два диффузора, вращающиеся в противоположные стороны с разными угловыми скоростями, и пространственный фильтр, ограничивающий раствор конуса рассеяния и декорреляции спеклов. Похожая система, доведенная до прибора фирмой Power Technology Inc. [4], имеет коллиматор с тремя пространственными фильтрами (соответственно с раствором конуса в 1° , 10° и 20°) для расширения спектра применений деспеклера. Такую систему трудно сделать компактной, и, кроме того, она обладает большими световыми потерями. Использование пространственного фазового модулятора света, формирующего ортогональные функции [5–7], резко усложняет и удорожает оптическую систему. Фотополимерная среда [8], в которой последовательно в виде наложенных фазовых голограмм записывались многочисленные спекл-об-

разы, имеет хорошую эффективность подавления спеклов, но обладает шумами, критична к изменению длины волны и «устает» в процессе эксплуатации. В итоге достаточно широко применяется только деспеклер [9, 10], выполненный в виде некоторой тонкой подвижной среды, вибрирующей на частоте около 100 Гц с амплитудой до 60 мкм. Однако и для этого метода характерны нестабильность работы и «усталость» среды.

В работах [11, 12] предложен метод пространственно неоднородной модуляции фазы света в однопиксельной электрооптической ячейке при использовании электрически управляемого изменения двулучепреломления слоя сегнетоэлектрического жидкого кристалла (СЖК) со спиральной (геликоидальной) структурой. К ячейке от источника электрического напряжения одновременно на низкой и высокой частоте прилагалось знакопеременное электрическое поле, вызывающее пространственные деформации геликоида (без изменения его шага) в слое СЖК. Как следствие, хаотически изменялось положение главной оптической оси эллипсоида показателей преломления вдоль направления, ортогонального смектическим слоям, и образующиеся мелкомасштабные быстро изменяемые во времени структуры со случайным распределением градиентов показателя преломления приводили к пространственно неоднородной по апертуре ячейки фазовой модуляции проходящего света с высоким пространственным разрешением (порядка шага спирали, т. е. долей мкм).

Однако и такой деспеклер не лишен недостатков. Как оказалось, деформированная геликоидальная структура молекул при фазовой модуляции светового излучения изменяет спектральный состав излучения. Кроме того, после выключения электрического поля имеет место остаточное светорассеяние, обусловленное также наличием геликоида. Частота модуляции светового излучения в СЖК-ячейке при напряженности электрического поля ~ 2 В/мкм ограничена значением 500 Гц, сужающим возможные применения модулятора. Наконец, используемая электронная схема управления вырабатывала управляющие напряжения разной формы, что неоптимально.

А.Л.Андреев, Т.Б.Андреева, И.Н.Компанец. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: kompan@sci.lebedev.ru

Н.В.Заляпин. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

Поступила в редакцию 18 июня 2014 г., после доработки – 19 августа 2014 г.

Задачей настоящей работы было устранение вышеуказанных недостатков, и она была решена с помощью другого типа СЖК, а именно негеликоидального (бесспирального) СЖК, в котором геликоидальная закрутка молекул полностью компенсировалась за счет взаимодействия хиральных добавок с противоположными знаками оптической активности [13].

2. Деформации смектических слоев в ячейке с негеликоидальным СЖК

Принципиально конструкция электрооптических ячеек с СЖК, использованных в новых экспериментах по пространственно неоднородной фазовой модуляции света, не отличалась от ячеек, применяемых ранее [11, 12]. Ячейки заполнялись негеликоидальным СЖК со следующими материальными параметрами: спонтанная поляризация $P_s = 40$ нКл/см², коэффициент вращательной вязкости $\gamma_\varphi = 0.4$ П, угол наклона молекул в смектических слоях $\Theta_0 = 23^\circ$ (при температуре 20°C), температурный интервал существования сегнетоэлектрической фазы от +2 до 70°C. Этот материал обладает высоким быстродействием: времена включения/выключения электрооптического отклика лежат в субмиллисекундном диапазоне [14]. Толщина жидкокристаллических ячеек составляла от 10 до 35 мкм, апертура ячеек – 2×2 см.

В ячейке с негеликоидальным СЖК в отсутствие электрического поля при определенном соотношении между величинами спонтанной поляризации, вращательной вязкости и модуля упругости СЖК, определяющего деформацию вдоль смектических слоев, возникают периодические деформации смектических слоев СЖК, приводящие к периодическим изменениям положения директора (главной оси эллипсоида показателей преломления) вдоль каждого смектического слоя [14]. Когда директор СЖК сориентирован гомеотропно, то есть смектические слои параллельны подложкам электрооптической ячейки, периодические деформации смектических слоев наблюдаются в виде чередования светлых и темных полос

(рис.1,а) с периодом от 1.5 до 5 мкм, который зависит от молекулярного строения СЖК. Рис.1,б показывает состояние СЖК в малом электрическом поле, при котором полосы начинают исчезать.

На рис.2 изображены схема, поясняющая деформацию смектических слоев в негеликоидальном СЖК, и ее фрагмент (справа), поясняющий взаимное расположение вектора спонтанной поляризации смектического слоя и директора СЖК. В электрооптической ячейке толщиной d смектические слои 1 толщиной l находятся между стеклянными подложками 2 (остальные слои ячейки не показаны).

Наличие деформаций указанного типа означает, что в смектических слоях молекулы СЖК, исходно наклоненные на угол Θ_0 относительно нормали к слою в данной точке, в отсутствие электрического поля дополнительно отклоняются на некоторый угол Ψ относительно оси z . В результате изменяется проекция директора на плоскость xu . В этом случае переориентация директора СЖК за счет взаимодействия переменного электрического поля E со спонтанной поляризацией P_s (поле прикладывается вдоль координаты x) может происходить посредством: 1) изменения на 180° азимутального угла φ ориентации директора с переориентацией его по образующим конуса с углом

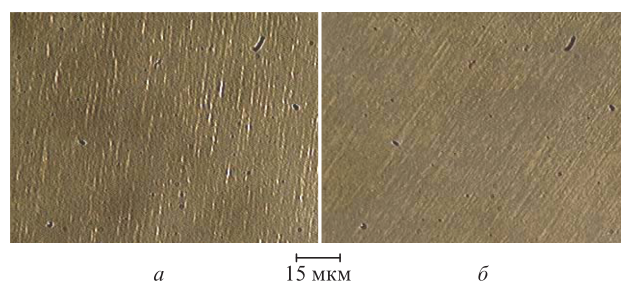


Рис.1. Периодические деформации смектических слоев в негеликоидальном СЖК в отсутствие электрического поля (а) и в электрическом поле 0.05 В/мкм (б). Ориентация директора – гомеотропная (смектические слои параллельны подложкам электрооптической ячейки); поляриды скрещены.

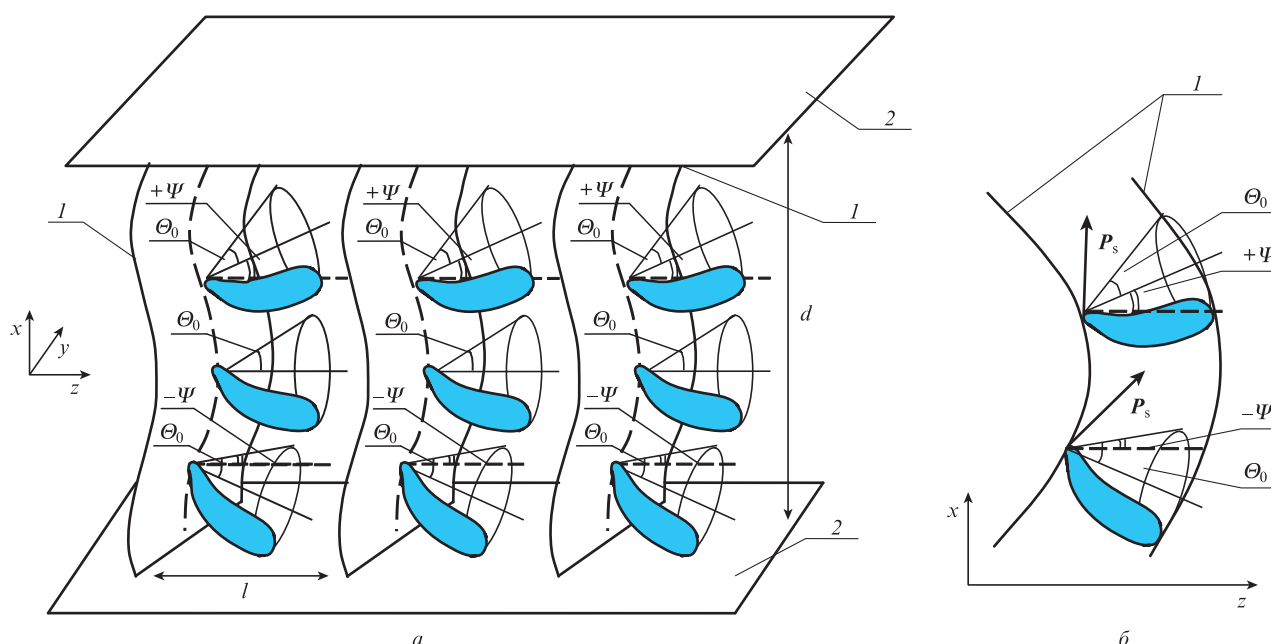


Рис.2. Схема, поясняющая деформацию смектических слоев в негеликоидальном СЖК (а), и фрагмент схемы (б), показывающий взаимное расположение вектора спонтанной поляризации смектического слоя и директора СЖК.

раствора $2\Theta_0$ (с характерным временем $\tau_r \sim \gamma_\varphi/P_s E$ [15], не зависящим от частоты изменения электрического поля); 2) изменения распределения угла Ψ , отражающего деформацию смектических слоев.

В первом случае диссипативным коэффициентом является вращательная вязкость γ_φ , а во втором, когда частота изменения электрического поля $f \sim 1/\tau_M$ (здесь τ_M – максвелловское время релаксации), диссипативный коэффициент – это вязкость при деформации сдвига γ_ψ [16]. Таким образом, переменное электрическое поле E , приложенное вдоль смектических слоев (координата x), взаимодействуя со спонтанной поляризацией, изменяет распределение угла Ψ . Физически это означает изменение типа диссипации энергии и переход характеризующего ее коэффициента от γ_φ к γ_ψ .

Нелинейное изменение распределения угла Ψ в переменном электрическом поле приводит к появлению солитона, который представляет собой волновой пакет с локализованной в нем периодической волной. Скорость движения центра солитона определяется [17] как

$$V = \frac{\Theta_0}{\gamma_\psi} \left(2K(P_s E \cos \varphi_0 + M) - \left[\frac{2K}{d\Theta_0} \right]^2 \right)^{1/2},$$

где K – коэффициент упругости, описывающий деформацию директора по углу Ψ ; γ_ψ – сдвиговая вязкость СЖК; M – энергия изгиба смектических слоев; φ_0 – начальный азимутальный угол ориентации директора.

Движение солитонов приводит к переориентации директора во всем объеме СЖК. В результате во всех смектических слоях азимутальный угол φ становится одинаковым и равным 0 или π в зависимости от направления электрического поля, а вектор P_s устанавливается по направлению поля. В этом случае, если плоскость поляризации падающего света лежит вдоль направления директора СЖК (вдоль главной оптической оси), светопропускание электрооптической ячейки максимально. Инверсия знака электрического поля (полярности импульсов управляющего напряжения) вновь индуцирует образование солитонных волн, что сопровождается рассеянием света.

Как было отмечено выше, периодические деформации смектических слоев негеликоидальных СЖК возникают при определенном соотношении между значениями спонтанной поляризации, вращательной вязкости и соответствующего модуля упругости, а именно: P_s не превышает 50 нКл/см^2 , $0.3 < \gamma_\varphi < 1.0 \text{ П}$ и модуль упругости K , определяющий деформацию вдоль смектических слоев, находится в интервале $(1-3) \times 10^{-12} \text{ Н}$.

Если $\gamma_\varphi < 0.3 \text{ П}$, то переход к сдвиговой вязкости γ_ψ не достигается, и солитонный механизм переориентации директора СЖК не реализуется, а при $\gamma_\varphi > 1 \text{ П}$ значительно увеличивается время оптического отклика не только на малых, но и на больших частотах, когда ответственной за диссипацию энергии становится сдвиговая вязкость γ_ψ . При увеличении P_s выше 50 нКл/см^2 повышается напряжение насыщения и начинают образовываться сегнетоэлектрические домены [18] (вдоль координаты y на рис.2), что приводит к появлению светорассеяния при выключении электрического поля. Наконец, диапазон $(1-3) \times 10^{-12} \text{ Н}$ для модуля упругости K характеризует интервал, в котором смектические слои устойчивы и в то же время податливы к образованию периодических пространственных деформаций в отсутствие электрического поля.

Таким образом, в электрооптической ячейке с негеликоидальным СЖК при указанных выше условиях возникают периодические деформации смектических слоев и, как следствие, периодические изменения положения директора (главной оптической оси) вдоль каждого смектического слоя.

3. Механизм пространственно неоднородной фазовой модуляции света

При определенном соотношении между периодом деформации смектических слоев и толщиной электрооптической ячейки, а также амплитудой и длительностью импульсов управляющего напряжения возникновения солитонной волны вызывает появление градиентов показателя преломления вдоль смектических слоев и сопровождается интенсивным рассеянием света.

Рис.3 иллюстрирует зависимость эффективности светорассеяния C (контрастное отношение) на солитонных волнах, возникающих при нелинейном изменении распределения угла Ψ в переменном электрическом поле, от длительности знакопеременных импульсов управляющего напряжения с амплитудой $\pm 50 \text{ В}$, приложенного к ячейке с негеликоидальным СЖК толщиной 18 мкм .

В рассматриваемом случае (при определенном соотношении между амплитудой и длительностью знакопеременных импульсов управляющего напряжения, толщиной электрооптической ячейки, периодом деформации смектических слоев и спонтанной поляризацией СЖК) процесс рассеяния имеет бистабильный характер, и оба оптических состояния ячейки (как с максимальным светопропусканием, так и с максимальной эффективностью светорассеяния) сохраняются в течение нескольких секунд после выключения электрического поля или до прихода импульса обратной полярности.

В зависимости от времени воздействия электрического поля на структуру СЖК (от длительности импульсов управляющего напряжения τ_p) наблюдаются несколько максимумов эффективности светорассеяния (см. рис.3). Угол между плоскостью поляризации падающего света и направлением главной оптической оси СЖК, которому соответствуют максимальные эффективность рассеяния и светопропускание, достигает максимума (90°) при длительности импульсов $\sim 100 \text{ мкс}$ и уменьшается для второ-

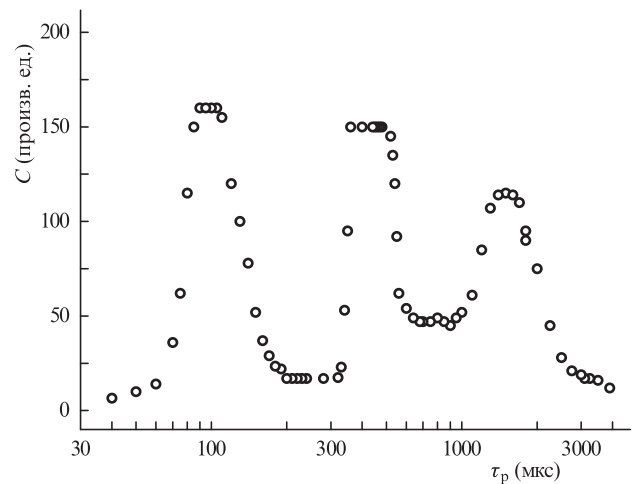


Рис.3. Зависимость эффективности светорассеяния электрооптической ячейки с негеликоидальным СЖК от длительности импульсов управляющего напряжения при фиксированной их амплитуде.

го и третьего максимумов (80° и 60° соответственно). Максимальной эффективности светорассеяния (первый максимум зависимости $C(\tau_p)$) отвечает регулярная структура рассеивающих центров в виде циркулярных доменов [19].

Переходы между светорассеивающими модами при воздействии на электрооптическую ячейку импульсов управляющего напряжения, длительность которых соответствует различным максимумам эффективности светорассеяния, приводят к хаотичному изменению положения индикатрисы рассеяния. В результате кратковременного (~ 50 мкс) включения светорассеяния в слое СЖК формируются пространственно неоднородные структуры с практически случайным распределением градиентов показателя преломления по объему, что, в свою очередь, является причиной пространственно неоднородной по сечению пучка фазовой модуляции света в электрооптической ячейке. Заметим, что такое кратковременное светорассеяние нечувствительно для глаз, не искажает структуру изображений, не влияет на их восприятие, и световые потери на него незначительны (менее 5%).

Анализ прошедшего через ячейку светового излучения показывает, что искажения в спектральном составе излучения и светорассеяние после выключения электрического поля, связанные ранее с наличием геликоида в СЖК, в ячейке с негеликоидальным СЖК отсутствуют, что выгодно отличает новый материал и способствует его использованию.

4. Разрушение фазовых соотношений в лазерном пучке

Пространственно неоднородная модуляция фазовой задержки, глубина которой порядка π и более, позволяет разрушить фазовые соотношения в лазерном пучке, проходящем через электрооптическую ячейку, и, как следствие этого, подавить спекл-шум в изображении. При заданной длине волны светового излучения глубина фазовой модуляции определяется показателем двулучепреломления СЖК (Δn) и толщиной электрооптической ячейки и зависит от амплитуды управляющего напряжения. Для ячейки толщиной 18 мкм максимальная глубина модуляции (4π) достигается при амплитуде напряжения ± 20 В.

Оптимальное для подавления спеклов соотношение между частотой и глубиной модуляции света и способностью к образованию в слое СЖК пространственно неоднородных структур со случайным распределением градиентов показателя преломления достигалось при определенном соотношении толщины слоя СЖК и периода деформации смектических слоев. Так, для периода деформации 1.5–5 мкм оптимальная толщина составила 10–35 мкм.

Распределение градиентов показателя преломления по объему СЖК, а следовательно, и характер модуляции фазовой задержки существенно зависят от соотношения длительности и амплитуды импульсов управляющего напряжения. Осциллограмма электрооптического отклика (нижняя на рис.4) иллюстрирует пространственно неоднородную фазовую модуляцию света глубиной до 4π при использовании ячейки с негеликоидальным СЖК. Видно, что при напряженности электрического поля ~ 2 В/мкм фазовая модуляция с высокой степенью неоднородности достигается при амплитудной модуляции низкочастотного напряжения (меандр) знакопеременными импульсами, длительность которых на порядок меньше периода низко-

частотного сигнала (две верхние осциллограммы). Здесь частота повторения низкочастотного сигнала (меандр) амплитудой ± 35 В составила около 1 кГц, а частота модулирующего сигнала той же амплитуды – 10 кГц. Амплитуда и длительность импульсов выбирались таким образом, чтобы эффективность светорассеяния изменялась за время действия каждого из последовательности импульсов, но не достигала своего максимального значения.

Следствием выбранного режима электрического возбуждения является разрушение фазовых соотношений в проходящем через электрооптическую ячейку лазерном пучке, что проиллюстрировано на рис.5, где приведена фотография распределения интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного пучка, прошедшего через электрооптическую ячейку толщиной 18 мкм при возбуждении СЖК импульсом управляющего напряжения (форма импульса та же, что и на рис.4). Частота повторения низкочастотного сигнала (меандр) составляет 1 кГц при амплитуде ± 18 В; частота модулирующего сигнала (знакопеременные импульсы той же формы) – 10 кГц (амплитуда ± 18 В). Эффективность подавления спекл-шума составила 50%, и она может быть повышена при дальнейшей оптимизации состава и толщины слоя СЖК, конструкции ячейки и режима ее электрического питания.

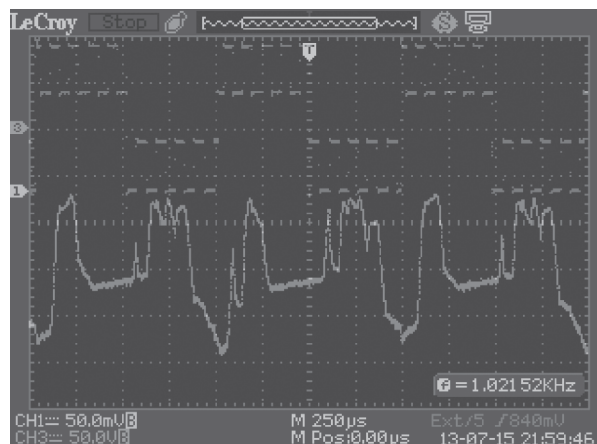


Рис.4. Осциллограммы управляющего напряжения, приложенного к ячейке с негеликоидальным СЖК (вверху), и оптического отклика – модуляции фазовой задержки (внизу).

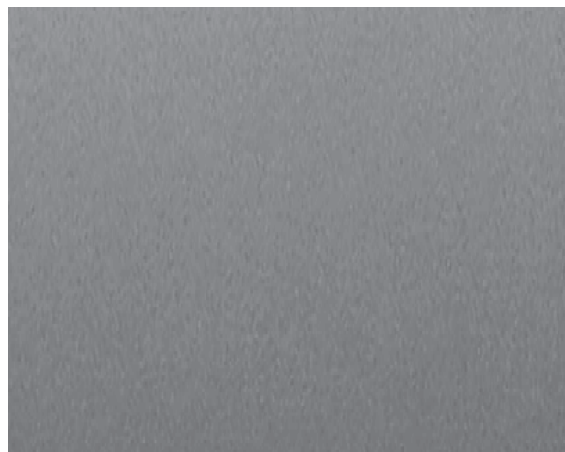


Рис.5. Фотография распределения интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного пучка, прошедшего через электрооптическую ячейку с негеликоидальным СЖК, при воздействии управляющего напряжения, форма которого показана на рис.4.

5. Заключение

В работе предложен оптический модулятор – деспеклер – на основе электрооптической ячейки с негеликоидальным СЖК. Эффект пространственно неоднородной по апертуре фазовой модуляции света в слое СЖК достигнут одновременным воздействием высокочастотного (до 10 кГц) и низкочастотного (до 1 кГц) импульсных питающих напряжений, причем интервал частот модуляции света при напряженности электрического поля ~ 2 В/мкм по сравнению с [1] увеличился вдвое – до 1 кГц, что расширяет диапазон возможных применений модулятора (деспеклера). Главными же достоинствами пространственного модулятора явились отсутствие искажений в спектральном составе модулируемого излучения и отсутствие светорассеяния при выключении электрического поля. Кроме того, одинаковая форма импульсов низкочастотного и высокочастотного напряжений (меандр) позволила упростить электронную схему управления модулятора. Работа по исследованию и оптимизации оптических характеристик модулятора с целью его использования в качестве деспеклера продолжается.

Авторы благодарят за финансовую поддержку РФФИ (грант №14-07-00185_a) и Отделение физических наук РАН (Программа фундаментальных исследований П.5 «Физика новых материалов и структур»).

1. Кольер Р., Берхард К., Лин Л. *Оптическая голография* (М.: Мир, 1973).
2. Goodman J.W. *Laser Speckle and Related Phenomena* (Berlin: Springer-Verlag, 1984).
3. Li D., Kelly D.P., Sheridan J.T. *Appl. Opt.*, **52** (35), 8617 (2013).
4. <http://www.PowerTechnology.com>; http://www.photonics.com/Product.aspx?PRID=55140&refer=psMonthly&utm_source=psMonthly_2014_04_09&utm_medium=email&utm_campaign=psMonthly.
5. Васильев А.А., Касасент Д., Компанец И.Н., Парфенов А.В. *Пространственные модуляторы света* (М.: Радио и связь, 1987).
6. Hedayat A.S., Sloan N.J.A., Stufken J. *Orthogonal Arrays: Theory and Applications* (New York: Springer-Verlag, 1999).
7. Trisnadi J.I. *Opt. Lett.*, **29** (1), 11 (2004).
8. Kazutoshi Ishida et al. *Proc. IDW'10* (Fukuoka, 2010, p. 1471).
9. Goodman J.W. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* (Colorado: Roberts and Company Publishers, 2006).
10. Kuratomi Y., Sekiya K., Satoh H., Tomiyama T. *J. of SID*, **18** (12), 1119 (2010).
11. Андреев А.Л., Андреева Т.Б., Компанец И.Н., Минченко М.В., Пожидаев Е.П. *Квантовая электроника*, **38** (12), 1166 (2008).
12. Andreev A.L., Andreeva T.B., Kompanets I.N., Minchenko M.V., Pozhidaev E.P. *J. of SID*, **17** (10), 801 (2009).
13. Береснев Л.А., Байкалов В.А., Блинов Л.М., Пожидаев Е.П., Пурванецкас Г.В. *Письма в ЖЭТФ*, **33** (10), 553 (1981).
14. Андреев А., Компанец И. *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*, №6, 72 (2012).
15. Handschy M.A., Clark N.A., Lagerwall S.T. *Phys. Rev. Lett.*, **51**, 471 (1983).
16. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теория упругости. Т.7* (М.: Наука, 1965, с.189).
17. Федосенкова Т.Б., Андреев А.Л., Пожидаев Е.П., Компанец И.Н. *КСФ*, №3, 45 (2002).
18. Береснев Л.А., Лосева М.В., Чернова Н.И., Кононов С.Г., Адоменас П.В., Пожидаев Е.П. *Письма в ЖЭТФ*, **51** (9), 457 (1990).
19. Андреев А.Л., Андреева Т.Б., Бобылев Ю.П., Гончуков С.А., Компанец И.Н., Минченко М.В., Шошин В.М. *Оптический журн.*, **77** (12), 52 (2010).