

Подавление спекл-шума с помощью жидкокристаллической ячейки

А.Л.Андреев, И.Н.Компанец, М.В.Минченко, Е.П.Пожидаев, Т.Б.Андреева

Предлагаются новый принцип и простая методика подавления спекл-шума в изображениях, формируемых в лазерных проекционных системах. Сфазированность волн в лазерном пучке и, соответственно, спеклы могут быть разрушены при прохождении пучка через электрооптическую ячейку, где в качестве модулирующей среды используется сегнетоэлектрический жидкий кристалл с особыми свойствами. Результат достигается вследствие пространственно неоднородной фазовой модуляции света в ячейке при подаче на нее последовательности биполярных электрических импульсов специальной формы.

Ключевые слова: спеклы, жидкокристаллическая ячейка, фазовая модуляция света, рассеяние света, подавление спекл-шума.

1. Введение

Светодиоды и лазеры – многообещающие источники света для компактных и ярких проекционных дисплеев. Однако наблюдению качественных изображений в таких системах мешает спекл-шум, обусловленный, как это ни парадоксально, высоким качеством излучения, в данном случае – его высокой сфазированностью (когерентностью) и монохроматичностью [1–3]. Спекл-структура в изображениях является результатом интерференции многих световых волн, рассеянных различными точками экрана как диффузора. Чем больше расстояние от наблюдателя до экрана и чем меньше его размер, тем мельче выглядят спеклы. На практике размер наблюдаемых спеклов определяется разрешающей способностью глаза, которая обычно не превышает одной угловой минуты и составляет 20–30 лин./мм. Кроме того, при наблюдении следует учитывать инерцию зрительного восприятия ($\sim 1/25$ с).

Устранить спекл-шум в наблюдаемых изображениях можно путем его усреднения непосредственно на экране или путем разрушения фазовых соотношений в лазерном пучке, т. е. до проецирования изображений на экран.

Усреднение спекл-структуры на экране достигается с помощью быстропереключаемого (например, быстровращающегося) светорассеивающего диффузора [4]. В известной разработке голографического запоминающего устройства [5] более однородные голографические изображения наблюдались при перемещении двух диффузоров относительно друг друга. Понятно, что механическое перемещение – это не лучшее решение проблемы.

Устройство подавления спеклов (деспеклер), основанное на разрушении фазовых соотношений в лазер-

ном пучке, представляется более компактным и эффективным, но оно должно иметь гораздо большую разрешающую способность (порядка сотен и даже тысячи лин./мм) вследствие необходимости последующего расширения пучка до размеров экрана, а также не должно уменьшать интенсивность лазерного пучка и ухудшать его направленность. Таким деспеклером [1, 2] может быть прозрачная фазовая маска со случайным пространственным распределением фазы глубиной порядка и более λ , реализуемая с помощью быстровращающейся отбеленной фотопластинки, ранее экспонированной через диффузор (обычно – матовое стекло). Механического движения можно избежать, если такую маску реализовать с помощью пространственного фазового модулятора света, например жидкокристаллического, формирующего функции Уолша или другие ортогональные функции [6–8]. Однако использование фазового модулятора, разделенного на каналы модуляции света (пиксели), по сути дополнительного микродисплея, резко усложняет и удорожает оптическую систему.

В данной работе для подавления спеклов предлагается использовать в качестве пространственного модулятора света простую электрооптическую ячейку (без разделения на каналы модуляции света), заполненную жидким кристаллом смектического типа с сегнетоэлектрическими свойствами – сегнетоэлектрическим жидким кристаллом (СЖК). Фазовые соотношения в лазерном пучке и, соответственно, спеклы разрушаются при прохождении пучка через электрооптическую ячейку, когда в слое СЖК под действием электрического поля создаются пространственно неоднородные и случайно распределенные по всей апертуре ячейки вариации показателя преломления, приводящие к фазовой модуляции света глубиной порядка и более λ .

2. Экспериментальные условия

Задача состояла в разработке и исследовании СЖК-композиций и СЖК-ячеек, которые можно было бы использовать для подавления спеклов. Кроме того, нужно

А.Л.Андреев, И.Н.Компанец, М.В.Минченко, Е.П.Пожидаев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: ALA-2012@yandex.ru, kompan@sci.lebedev.ru, mminchenko@mail.ru, epozhidaev@mail.ru
Т.Б.Андреева. ООО «Бизнес Инвест Групп», Россия, 117447 Москва, ул. Большая Черемушкинская, 13/7; e-mail: rybusenok@yandex.ru

было найти условия формирования электрическим полем в СЖК-слое наиболее подходящих для подавления спеклов фазовых неоднородностей, в том числе режим электрического управления СЖК-ячейкой, при котором происходило бы образование быстроменяющихся мелкомасштабных пространственных структур со случайным распределением показателя преломления.

Чтобы сформировать структуры с пространственной неоднородностью оптической анизотропии использовались геликоидальные СЖК-материалы с управляемыми электрическим полем двулучепреломлением и светорассеянием [9-11], разработанные в Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН. Эти материалы имеют широкий температурный интервал существования сегнетоэлектрической фазы и обладают высоким быстродействием: времена включения-выключения электрооптического отклика лежат в субмиллисекундном диапазоне, что намного меньше времени инерции зрительного восприятия.

Характерной особенностью всех смектических жидких кристаллов является периодическая упорядоченность центров масс молекул вдоль направления ориентации их длинных осей (директоров) с периодом порядка длины молекул – так называемые смектические слои [12]. Если молекулы не зеркально-симметричны и их директора отклонены на некоторый угол θ_0 от нормали к смектическим слоям, то в каждом слое существует единственный элемент симметрии – полярная ось второго порядка. Вдоль этой оси возможно существование спонтанной поляризации слоя P_s (если молекулы обладают дипольным моментом, перпендикулярным их длинным осям).

В отсутствие внешних воздействий полярные оси различных смектических слоев повернуты относительно друг друга, т. е. существует геликоидальная закрутка директора. В каждом слое положение директора определяется полярным углом θ_0 и азимутальным углом φ , который изменяется от 0 до 2π на расстоянии, равном шагу геликоида p_0 (рис.1).

Под действием электрического поля, приложенного параллельно смектическим слоям (вдоль координаты x), вектор P_s во всех слоях ориентируется вдоль направления поля, вследствие чего геликоид раскручивается. При смене знака поля происходит переориентация вектора P_s на 180° . При этом длинные оси молекул разворачивают-

ся по конусу с раствором $2\theta_0$, т.е. азимутальный угол ориентации директора φ изменяется на 180° .

Переориентация директора, направление которого однозначно определяет направление главной оптической оси эллипсоида показателей преломления СЖК, приводит к изменению угла между плоскостью поляризации падающего света (свет распространяется вдоль координаты x) и главной оптической осью эллипсоида, что означает модуляцию фазовой задержки между обычным и необычным лучами, или модуляцию интенсивности света, если электрооптическая ячейка находится между скрещенными поляризаторами.

Если толщина электрооптической ячейки d и шаг геликоида СЖК p_0 связаны соотношением $d \gg p_0$ (в нашем случае $d \approx 13 - 16$ мкм, $p_0 \approx 0.5$ мкм), то в отсутствие электрического поля геликоидальная структура не искажена – шаг геликоида в электрооптической ячейке равен равновесному шагу p_0 . Если приложить электрическое поле E перпендикулярно к оси геликоида, то дипольные моменты у части молекул СЖК окажутся расположенными вдоль направления поля E (энергетически выгодная ориентация). Домен, в котором дипольные моменты расположены не по направлению поля, неустойчив. В силу этого в нем появляются области [10], в которых дипольные моменты расположены энергетически выгодно – в тех смектических слоях, где отклонение азимутального угла φ от 0 или π изначально было максимальным.

Развитие этого процесса приводит к образованию переходных доменов [10, 13], т.е. участков, на которых некоторое количество дипольных моментов молекул расположено в направлении, противоположном направлению поля. Эти участки разделяют области с ориентацией диполей по направлению поля. Переходные домены представляют собой связанное состояние двух 180° -ных доменных стенок разных знаков. При достижении полем некоторого критического значения стенки начинают двигаться, причем стенки разного знака движутся в противоположных направлениях таким образом, чтобы объем энергетически выгодного домена увеличивался за счет объема домена энергетически невыгодного. В результате во всех смектических слоях азимутальный угол φ становится одинаковым и равным 0 или π (в зависимости от направления поля), а вектор P_s – ориентированным 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 управляющего напряжения) вновь индуцирует образование переходных доменов, движение доменных границ в которых в итоге приводит к восстановлению невозмущенной геликоидальной структуры. В этом случае образование переходных доменов вызывает появление градиентов показателя преломления вдоль оси геликоида и сопровождается интенсивным рассеянием света [10].

Эффективность светорассеяния обычно характеризуют контрастным отношением S – отношением интенсивности излучения, распространяющегося прямолинейно, без рассеяния, к интенсивности излучения, рассеянного в некотором (достаточно малом) телесном угле. В нашем случае этот угол задавался диафрагмой диаметром 1.5 мм, расположенной за электрооптической ячейкой на расстоянии 150 мм. Контрастное отношение измерялось с помощью полупроводникового лазера (длина волны $\lambda =$

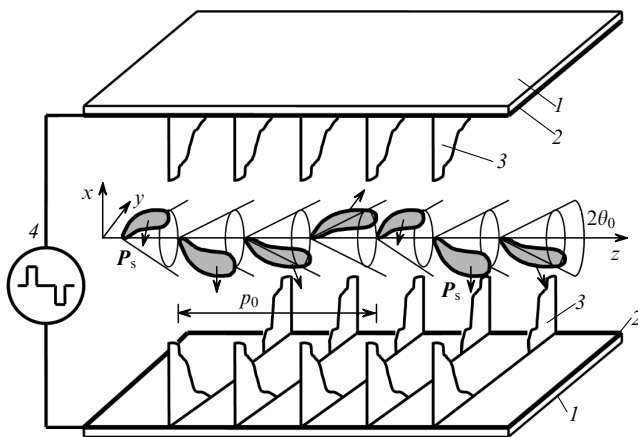


Рис.1. Геликоидальный СЖК в электрооптической ячейке: 1 – стеклянные подложки; 2 – прозрачные проводящие покрытия; 3 – смектические слои; 4 – генератор управляющего напряжения.

0.65 мкм), пучок которого падал нормально к поверхности ячейки. Направление плоскости поляризации лазерного излучения задавалось с помощью поляризатора.

Экспериментальная установка включала в себя источник света – лазерный диод ($\lambda = 0.65$ мкм), СЖК-ячейку с апертурой 2×2 см, программируемый генератор электрических импульсов, линзы и фотокамеру для регистрации распределений интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного пучка, прошедшего через ячейку.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Необходимым условием подавления спеклов является пространственно неоднородная по сечению пучка фазовая модуляция света в электрооптической ячейке. Пространственно неоднородные структуры с почти случайным по сечению пучка распределением показателя преломления были сформированы путем «включения» знакопеременным электрическим полем кратковременной (~ 100 мкс) деформации слоя СЖК, вызывающей появление мелкомасштабных (порядка долей-единиц микрометра) неоднородностей в распределении показателя преломления в объеме слоя СЖК. Градиенты показателя преломления, в свою очередь, приводят к рассеянию света, которое происходит на границах спонтанно упорядоченных областей, образующих переходные домены в геликоидальных СЖК. Эффективность светорассеяния (понимаемая как контрастное отношение) и светопропускание электрооптической ячейки зависят от частоты или амплитуды управляющего напряжения.

Возможна хаотичная модуляция положения индикатрисы рассеяния вследствие образования градиентов показателя преломления, если в зависимости электрооптического отклика от частоты изменения электрического поля или его напряженности существуют, по крайней мере, две рассеивающие моды, различающиеся механизмом рассеяния. Экспериментальные измерения показали, что для электрооптической ячейки толщиной 13 мкм, где в качестве модулирующей среды использовался СЖК с шагом геликоида $p_0 \approx 0.5$ мкм, в зависимости от частоты управляющего напряжения действительно существуют две рассеивающие моды – низкочастотная и высокочастотная, причем при переходе к высокочастотной моде эффективность светорассеяния возрастает (рис.2).

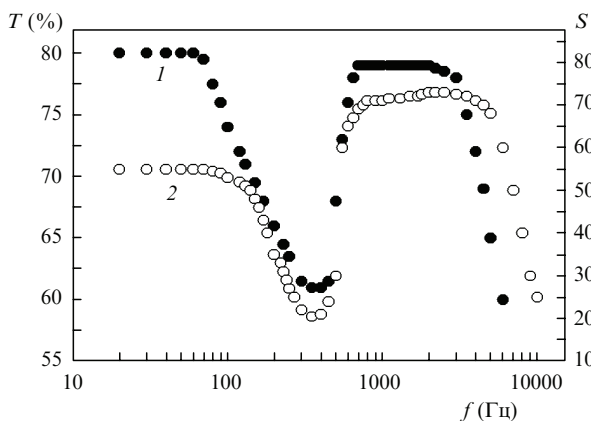


Рис.2. Частотные зависимости светопропускания T (1) и эффективности светорассеяния – контрастного отношения S (2). Управляющее напряжение – меандр с амплитудой ± 36 В, толщина электрооптической ячейки 13 мкм.

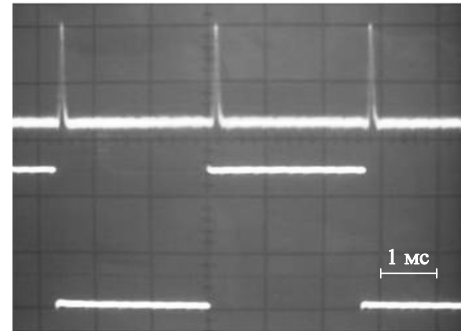


Рис.3. Осциллограммы управляющего напряжения (внизу) и электрооптического отклика (вверху) в низкочастотной рассеивающей моде. Нижний уровень электрооптического отклика соответствует максимальному светопропусканию. Управляющее напряжение – меандр с частотой 150 Гц и амплитудой ± 36 В, толщина ячейки 13 мкм.

В низкочастотной моде (частота управляющего напряжения меньше 200 Гц) переход в рассеивающее состояние происходит при каждом изменении знака поля, и эффективность светорассеяния не зависит от полярности электрического поля (рис.3). В высокочастотной моде (частота свыше 500 Гц) длительность процесса рассеяния равна половине времени воздействия электрического поля на структуру, и эффективность светорассеяния изменяется при смене полярности поля (рис.4).

Переход от низкочастотной к высокочастотной рассеивающей моде приводит к значительному (до 90°) увеличению угла между плоскостью поляризации падающего света и направлением главной оптической оси СЖК, которому соответствуют максимальные значения эффективности рассеяния и светопропускания (рис.5). Это означает, что при переходе между светорассеивающими модами индикатриса рассеяния поворачивается на угол $\sim 90^\circ$. Следовательно, при переходе к высокочастотной моде изменяется характер движения директора СЖК в процессе его переориентации электрическим полем. Поскольку в рассматриваемом случае переориентация директора происходит вследствие движения доменных границ, то скорость движения доменных границ также должна зависеть от частоты изменения электрического поля.

Если при движении 180° -ной доменной стенки ее форма не отличается от первоначальной статической и движение происходит с постоянной скоростью (стационарное движение), то в уравнении движения можно не учитывать эффективную массу стенки. В этом случае урав-

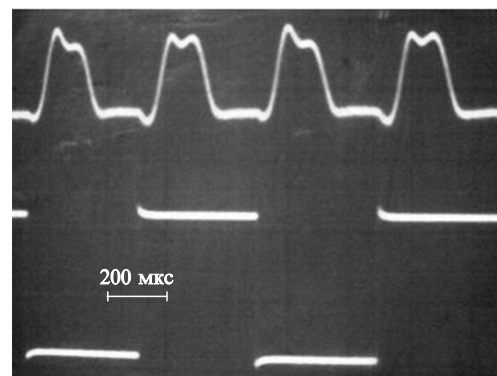


Рис.4. Осциллограммы управляющего напряжения (внизу) и электрооптического отклика (вверху) в высокочастотной рассеивающей моде. Управляющее напряжение – меандр с частотой 2 кГц и амплитудой ± 36 В, толщина ячейки 13 мкм.

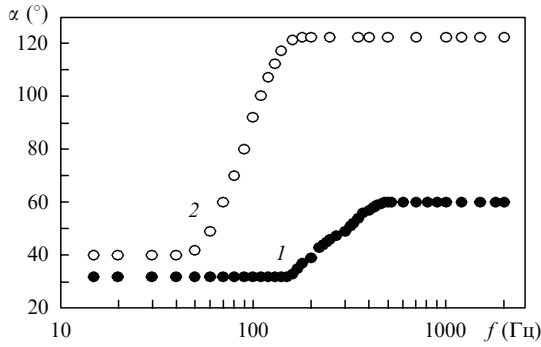


Рис.5. Частотные зависимости угла между плоскостью поляризации света и направлением главной оптической оси СЖК при максимальной эффективности рассеяния для электрооптических ячеек с диэлектрическим покрытием на одной подложке (1) и без диэлектрических покрытий (2). Амплитуда управляющего напряжения (меандр) ± 36 В, толщина ячейки 13 мкм.

нение движения директора вдоль координаты z (рис.1) может быть записано в следующем виде [13]:

$$\gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = K_\varphi \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \pm |\mathbf{P}_s||\mathbf{E}| \sin \varphi + \frac{2W_q}{d} \sin 2\varphi + \frac{W_p}{d} \sin \varphi, \quad (1)$$

где $K_\varphi (\partial^2 \varphi / \partial z^2)$ и $\gamma_\varphi (\partial \varphi / \partial t)$ – упругий и вязкий моменты; γ_φ – коэффициент вращательной вязкости; K_φ – модуль упругости, определяющий деформацию по азимутальному углу ориентации директора φ ; $|\mathbf{P}_s||\mathbf{E}| \sin \varphi$ – момент сил, действующих на директор в электрическом поле; W_q – квадратичный коэффициент энергии сцепления, т. е. энергия, необходимая для отклонения директора от положения равновесия, в котором его ориентация наиболее энергетически выгодна; W_p – разность полярных коэффициентов энергии сцепления на верхней и нижней подложках. Электрическое поле включается в момент времени $t = 0$.

Полярные граничные условия ($W_p \neq 0$) предполагают, что углы между вектором \mathbf{P}_s и нормалью к поверхности на верхней и нижней подложках не совпадают. Полярная часть энергии сцепления (некомпенсированный поверхностный заряд) вызывает поляризацию СЖК в отсутствие электрического поля.

Уравнение (1) имеет точное решение, если рассматривать доменную стенку как топологический солитон, предположив, что при $z = \mp \infty$ структура находится в основных, но разных состояниях: $\varphi(z = -\infty) = 0$ и $\varphi(z = +\infty) = \pi$. Решение уравнения (1) описывает движение солитона вдоль координаты z со скоростью

$$v = \left(\frac{K_\varphi d}{2W_q} \right)^{1/2} \frac{P_s E d + W_p}{\gamma_\varphi d}. \quad (2)$$

В слабых полях скорость движения стенки v , пропорциональная обратному времени электрооптического отклика $1/\tau_{0.1-0.9}$, линейно зависит от напряженности поля E (рис.6), что соответствует трансляционному смещению доменной стенки без изменения структуры (соотношение (2)). Увеличение частоты изменения электрического поля приводит к резкому возрастанию обратного времени $1/\tau_{0.1-0.9}$ (и соответственно скорости движения стенки v) с последующим выходом на насыщение (рис.6, кривая 2). Это означает, что воздействие высокочастотного поля возбуждает изгибные колебания доменной стенки. Вследствие этого возрастает электрический момент в направле-

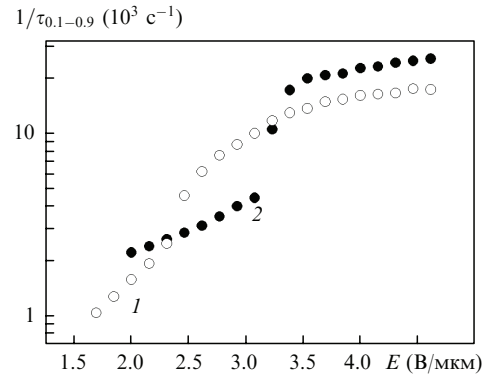


Рис.6. Зависимости обратного времени электрооптического отклика от напряженности поля E при частоте управляющего напряжения (меандр) 100 Гц (1) и 1 кГц (2) для электрооптической ячейки толщиной 13 мкм без диэлектрических покрытий.

нии движения и, соответственно, скорость движения стенки. Изменение структуры обуславливает инерционные свойства доменной стенки при нестационарном движении, т. е. ее эффективную массу.

Экранирование одной из подложек электрооптической ячейки слоем диэлектрика (полярные, т. е. асимметричные граничные условия с $W_p \neq 0$) вызывает поляризацию структуры СЖК. Следствием этого является деформация (частичная раскрутка) геликоида и возникновение переходных доменов в отсутствие электрического поля. В результате при переходе к высокочастотной светорассеивающей моде угол разворота индикатрисы рассеяния уменьшается до 30° (рис.5, кривая 1). Кроме того, при асимметричных граничных условиях время электрооптического отклика уменьшается в 1.5–2 раза вследствие увеличения скорости движения доменных границ, пропорциональной коэффициенту W_p (соотношение (2)).

Одновременное воздействие на электрооптическую ячейку низкочастотного и высокочастотного управляющих напряжений, соотношение амплитуд которых зависит от материальных параметров СЖК (шага геликоида, вращательной вязкости, спонтанной поляризации, упругой энергии геликоида), а также от граничных условий и толщины ячейки, приводит к хаотичной модуляции положения индикатрисы рассеяния вследствие случайного распределения по объему СЖК градиентов показателя преломления. Результатом является фазовая модуляция, пространственно неоднородная по объему и апертуре электрооптической ячейки (рис.7). Такую модуляцию характеризует измеренный за скрещенными поляризаторами усредненный электрооптический отклик ячейки, показанный на верхней осциллограмме рис.7. Видно, что фазовая модуляция случайна во времени и по глубине. Число глубоких минимумов в ломаной кривой электрооптического отклика, приходящихся на длительность каждого полупериода меандра, соответствует числу целых значений π в модуляции фазовой задержки во время действия этого полупериода. Например, для третьего слева полупериода меандра это число равно четырем.

На заданной длине волны светового излучения глубина фазовой модуляции M определяется показателем двулучепреломления СЖК Δn и толщиной электрооптической ячейки d и зависит от амплитуды управляющего напряжения. Из рис.8 видно, что для ячейки толщиной 16 мкм максимальная глубина модуляции (4π) достигается при амплитуде напряжения ± 20 В.

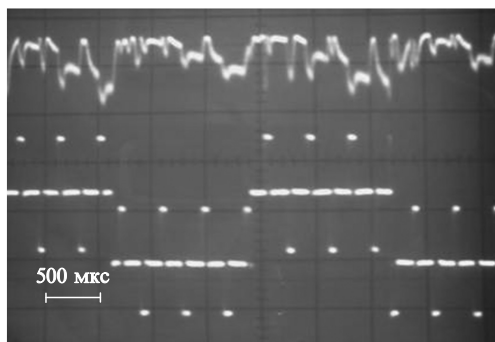


Рис.7. Оциллограммы управляющего напряжения, приложенного к электрооптической ячейке толщиной 16 мкм при частоте повторения низкочастотного сигнала (меандр) 450 Гц, амплитуде ± 30 В и частоте модулирующего сигнала (знакопеременные импульсы) 3.5 кГц, амплитуде ± 20 В. В верхней части — электрооптический отклик (модуляция фазовой задержки).

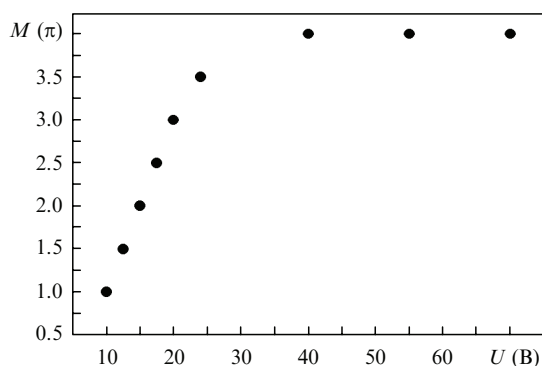


Рис.8. Зависимость глубины модуляции M фазовой задержки от амплитуды U управляющего напряжения (меандр) для электрооптической ячейки толщиной 16 мкм при длине волны лазерного излучения 0.65 мкм.

Таким образом, при выбранных параметрах управляющего напряжения происходит как модуляция положения главной оптической оси СЖК (индикатрисы рассеяния), так и фазовая модуляция света глубиной до 4π. Следствием такого режима управления является неоднородная по апертуре ячейки пространственно-временная фазовая модуляция света, приводящая к подавлению спекловой картины. Результат подавления показан на рис.9,б. Здесь эффективность подавления спекл-шума в поперечном сечении лазерного пучка, понимаемая как уменьшение контрастного отношения спекловой картины, составляет 50 %.

4. Заключение

В работе впервые экспериментально показано, что сфазированность волн в лазерном пучке и спекл-шум в изображениях могут быть разрушены в реальном времени, если лазерный пучок проходит через единственную жидкокристаллическую ячейку, в которой при воздействии электрического поля формируются мелкомасштабные пространственно неоднородные структуры со случайным распределением градиентов показателя преломления по объему слоя жидкого кристалла.

Рассмотрены условия возникновения пространственных деформаций слоя СЖК, приводящих к формированию в нем градиентов показателя преломления и кратковременному включению рассеяния света, и определено

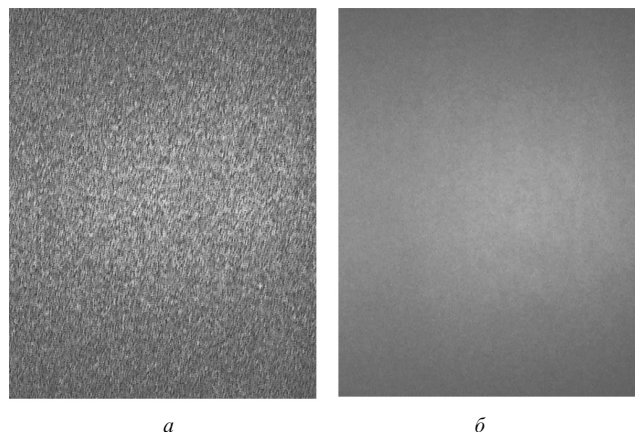


Рис.9. Фотографии распределений интенсивностей излучения в поперечном сечении лазерного пучка, прошедшего через электрооптическую ячейку, в отсутствие управляющего напряжения (а) и при его наличии (спеклы подавлены) (б). Длина волны лазерного излучения 0.65 мкм, толщина слоя СЖК 16 мкм, частота повторения низкочастотного сигнала (меандр) 450 Гц, амплитуда ± 30 В, частота модулирующего сигнала (знакопеременные импульсы) 3.5 кГц, амплитуда ± 20 В.

влияние на этот процесс параметров знакопеременного электрического поля. Одновременное воздействие низкочастотного и высокочастотного управляющих напряжений приводит к хаотичной модуляции положения индикатрисы рассеяния СЖК и, как следствие, к пространственно неоднородной фазовой модуляции света, проходящего через электрооптическую ячейку. Напомним, что кратковременное (на 100 мкс и менее) включение светорассеяния не ощущается глазом и не влияет на восприятие изображений.

Выбор подходящего состава СЖК, технологии изготовления электрооптических СЖК-ячеек и двухчастотного режима электрического управления обеспечили к настоящему времени эффективность подавления спекл-шума ~ 50 %, что уже является большим достижением.

Авторы благодарят РФФИ за поддержку работы (гранты № 06-03-08170, 07-02-00785 и 07-07-91582).

1. Кольер Р., Берхард К., Лин Л. *Оптическая голография* (М.: Мир, 1973).
2. Goodman J.W., in *Laser Speckle and Related Phenomena* (Berlin: Springer-Verlag, 1984, pp 9–75).
3. Рябухо В.П. *Соросовский образовательный журнал*, № 5, 102 (2001).
4. Lowenthal S., Joyeux D. *J. Opt. Soc. Am.*, **61**, 847 (1971).
5. Турухано Б.Г. В сб. *Оптическая голография. Практические применения* (Л.: Наука, 1985, с. 75–95).
6. Васильев А.А., Касасент Д., Компанец И.Н., Парфенов А.В. *Пространственные модуляторы света* (М.: Радио и связь, 1987).
7. Hedayat A.S., Sloan N.J.A., Stufken J. *Orthogonal Arrays: Theory and Applications* (New York: Springer-Verlag, 1999).
8. Trisnadi J.I. *Opt. Lett.*, **29** (1), 11 (2004).
9. Andreev A., Kompanets I., Pozhidaev E., Zerrouk A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4511**, 82 (2001).
10. Андреев А.Л., Бобылев Ю.П., Компанец И.Н., Пожидаев Е.П., Федосенкова Т.Б., Шошин В.М., Шумкина Ю.П. *Оптич. журн.*, **72** (9), 58 (2005).
11. Andreev A.L., Bobylev Yu.P., Fedosenkova T.B., Gubasaryan N.A., Kompanets I.N., Pozhidaev E.P., Shoshin V.M., Shumkina Yu.P. *SID'05 Symp. Dig.*, **36** (1), 161 (2005).
12. Chigrinov V.G. *Liquid Crystal Devices: Physics and Applications* (New York–Paris–Berlin: Artech House Publishers, 1999).
13. Andreev A., Pozhidaev E., Fedosenkova T., Shumkina J., Kompanets I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6637**, 74 (2007).