

62. Современные методы подавления спекл-шума в лазерных проекционных системах (обзор)

Н. В. Заляпин, Т. Б. Андреева, И. Н. Компанец

Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

Рассмотрены современные методы и устройства эффективного уменьшения спекл-контраста (до $\leq 5\%$) в лазерном изображении, обеспечивающие подавление спекл-шума и хорошее качество формируемого изображения. Показано, что электрооптические — жидкокристаллические деспеклеры обладают рядом преимуществ по отношению к другим типам деспеклеров, так как не имеют механически деформируемых или перемещающихся элементов, снижающих надёжность и долговечность функционирования, и являются более компактными и простыми по конструкции. Деспеклеры с декорреляцией фазового фронта на основе деформации зеркала и оптического волокна обладают меньшими потерями света.

Ключевые слова: Проекционная система, Лазерный пучок, Спекл-шум, Деспеклер, Подавление спеклов.

Цитирование: Заляпин, Н. В. Современные методы подавления спекл-шума в лазерных проекционных системах (обзор) / Н. В. Заляпин, Т. Б. Андреева, И. Н. Компанец // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 340–351.

Введение

Несмотря на очевидные преимущества лазерных источников света (по сравнению с традиционными лампами и светодиодами), широкому их применению в проекционных системах препятствует наличие спеклов в изображении, формируемом лазерным пучком. Спеклы являются интерференционным шумом и возникают вследствие когерентной природы лазерного излучения [1].

Спекл-шум снижает способность наблюдателя различать мелкие детали в изображении. Степень зашумленности спекл-картины (спекл-структуры), можно охарактеризовать через спекл-контраст, который определяется как отношение среднеквадратического отклонения флуктуации интенсивности к среднему значению интенсивности $C = \sigma / \langle I \rangle$ [1]. Значения спекл-контраста варьируются от 0 до 1. Максимально возможное значение ($C = 1$) спекл-контраста достигается только в спекл-полях, наблюдаемых при дифракции широких лазерных пучков на сильно шероховатой поверхности или сильно рассеивающем транспаранте [2].

Видимая спекл-картина зависит от пространственного расположения глаз наблюдателя, а также от разрешения зрительной системы [3]. 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 ($\approx 1/25$ с).

Таблица 1. Методы формирования некоррелированных спекл-структур [1]

Объект декорреляции	Мгновенное усреднение	Последовательное усреднение
Временная когерентность	Широкополосный источник света; Множество источников света различной длины волны	Динамическое изменение длины волны (например, перестраиваемый лазер)
Пространственная когерентность	Использование пространственно расширенного источника света; Разделение источника света на пространственно некогерентные подисточники путем разрушения временной когерентности; Одновременное освещение разных областей объекта несколькими некогерентными источниками света	Движение когерентного светового пятна
Направление волнового поля	Одновременное освещение множеством источников света переменного направления	Динамическое изменение углового спектра
Поляризация	Расщепление источника света на две временные некогерентные дорожки с линейными изменениями поляризации	Динамическое изменение состояния поляризации
Фазовый фронт		Динамический диффузор; Вибрирующее многомодовое волокно

Вследствие пространственного и временного интегрирования, которыми обладают человеческий глаз — мозг или ПЗС-камера, проблема устранения (подавления) спекл-шума с помощью специализированного устройства — деспеклера сводится к усреднению им спеклов. Физическим результатом его действия является «расфазировка», или декорреляция излучения. Эксперименты показали, что эффективным можно признать деспеклер, который способен обеспечить контраст спекл-картины менее 5 %. Только в этом случае наблюдатель не заметит шума, и качество формируемого изображения будет считаться приемлемым [4, 5].

Учитывая давность проблемы и не снижающуюся актуальность её решения, ниже дан обзор современных практических методов и устройств эффективного уменьшения спекл-контраста в лазерном изображении и тем самым эффективного подавления спекл-шума.

1. Общий подход к подавлению спекл-шума

В [6] было показано, что распределение интенсивности в виде спекл-структуры в формируемом изображении зависит от свойств шероховатой поверхности, направления падения и наблюдения, свойств временной и пространственной когерентности излучения, а также от поляризации и фазового распределения поля световой волны, рассеянной на объекте.

Согласно [1] для M некоррелированных спекл-структур контраст результирующей спекл-картины может быть уменьшен в соответствии с законом $C = \sigma / \langle I \rangle = 1 / \sqrt{M}$. причём некор-

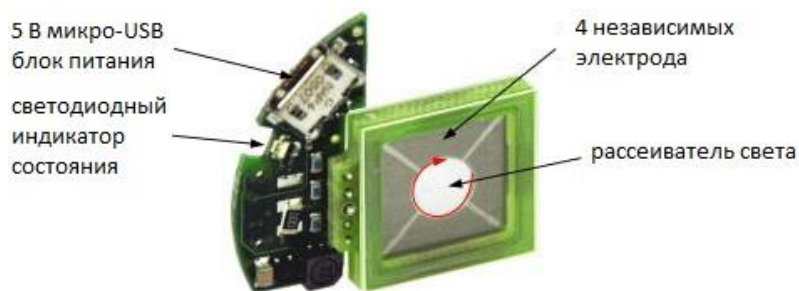


Рис. 1. Деспеклер LSR-5-17 компании Optotune [7]

релированные спекл-структуры могут быть получены от данного объекта посредством разнесения по времени, пространству, частоте или поляризации. В таблице 1 указаны различные методы уменьшения (подавления) спеклов посредством мгновенного и последовательного формирования некоррелированных спекл-структур.

Рассмотрим далее примеры реализации приведенных методов подавления спекл-шума.

2. Уменьшение спекл-контраста с помощью электроактивных полимеров

Последовательные некоррелированные спекл-структуры могут быть созданы движущимся (например, вращающимся) диффузором-рассеивателем, через который проходит лазерный луч. Обычно подавление спеклов в подобных системах сопровождается ухудшением качества луча и увеличением его расходимости. Кроме того, подобное устройство трудно сделать компактным, причём движущиеся или вращающиеся элементы обычно являются нежелательными.

Однако компанией Optotune (Швейцария) данный метод доведен до коммерческого использования в деспеклере LSR (The Laser Speckle Reducer — рисунок 1) с диффузором, установленным на эластичной мембране из электроактивного полимера, которая сжимается и расширяется, в зависимости от наличия напряжения на прикрепленных к ней электропроводящих покрытиях, и тем самым перемещает диффузор вперед и назад. Для каждого отдельного положения диффузора генерируется разная структура спеклов. В течение времени интеграции детектора (порядка 60 мс для человеческого глаза) суперпозиция рисунков приводит к гомогенизации наблюдаемой световой картины [7].

Максимальное снижение спекл-контраста, достигаемое с использованием устройства LSR, определяется его оптической системой. Наибольшее снижение происходит при высоких частотах и больших амплитудах колебаний, в шаблонах диффузоров высокого разрешения и при длительных временах интеграции. Как во всех методах с использованием рассеивателей, увеличение расходимости лазерного луча должно быть допустимым, причем это увеличение более значительно при очень тонких структурах рассеивателя. Эффективность применения LSR увеличивается с уменьшением размера шероховатости поверхности диффузора, поскольку чем меньше размер зерна, тем больше количество полностью некоррелированных

Таблица 2. Основные характеристики LSR

Характеристики	LSR-5-17	LSR-10-22
Механические характеристики		
Чистая апертура, мм	5	10
Внешние размеры, W×H×D, мм	17 × 17 × 3,8	22 × 22 × 3,8
Вес (Только LSR / включая электронику), г	1,44 / 2,55	2,18 / 3,24
Электрические характеристики		
Блок питания (интерфейс micro-USB), V _{пост.} , В	5	5
Потребляемая мощность (со стандартной электроникой), мВт	310	310
Емкость электрода, пФ	75	120
Оптические характеристики		
Угол диффузии FWHM,	6°/12°/17°/24°	6°/12°/17°/24°
Порог повреждения, Вт / см ²	> 300	> 300
Частота колебаний, Гц	≈ 300	≈ 180
Амплитуда колебаний (от пика к пику), мкм	≈ 300	≈ 400
Тепловые характеристики		
Температура хранения, °С	-40, +85	-40, +85
Рабочая температура, °С	-30, +85	-30, +85

изображений в пределах размаха движения диффузора. К сожалению, с уменьшением размера шероховатости увеличивается расходимость лазерного излучения.

Для LSR-5-17 с частотой колебаний 280 Гц, амплитудой 600 мкм, расходимостью 20°, размером шероховатости около 9 мкм и временем интегрирования 10 мс значение спекл-контраста составило не более 2 % [7].

В таблице 2 приведены характеристики двух LSR компании Optotune [8].

3. Уменьшение спекл-контраста с помощью многомодового оптического волокна и пьезоэлектрического вибратора

Еще одним эффективным способом получения последовательных во времени некоррелированных спекл-структур является использование многомодовых оптических волокон. Суперпозиция вкладов от различных мод волокна на выходной поверхности формирует спекл-картину, которая может изменяться во времени в результате изгиба или вибрации волокна. В работе [9] описана методика уменьшения спекл-контраста в многомодовых волокнах с помощью пьезоэлектрического вибратора (рисунок 2) и исследованы факторы, влияющие на спекл-контраст: диаметр и форма сердечника волокна, радиус изгиба волокна, время регистрации спекл-картины камерой и т. п.

Значение спекл-контраста, полученное при использовании волокна круглой формы, составило 0,056, а волокна с семиугольной сердцевинкой — 0,067. Однако, по мнению авторов, волокно с некруглой формой сердечника может быть более эффективным для уменьшения спекл-контраста, поскольку не требует применения эффекта изгиба волокна и, тем самым,

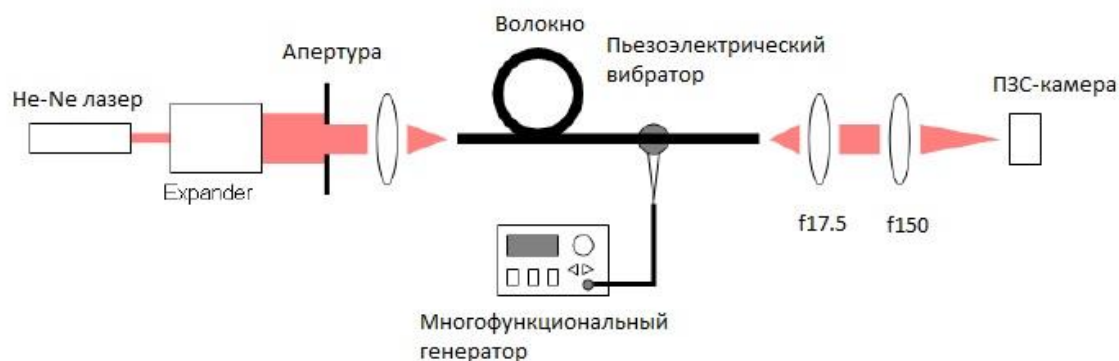


Рис. 2. Схема работы деспеклера на основе многомодового оптического волокна и пьезоэлектрического вибратора [9]

обеспечивает возможность создания более компактного деспеклера. Следует заметить, что часто уже небольших турбулентностей в воздухе, окружающем волокно, или незначительных изменений его температуры достаточно, чтобы изменить рисунок на выходной поверхности.

4. Деформируемое зеркало с фазовой рандомизацией

Компания Duortyka разработала технологию фазового рандомизированного деформируемого зеркала для улучшения однородности и уменьшения спекл-контраста и других нежелательных интерференционных эффектов, которые могут наблюдаться в дисплеях с лазерной подсветкой [10]. Внешний вид деформируемого зеркала в неактивном и активном состоянии приведен на рисунке 3.

Для создания случайно-распределенных поверхностных деформаций и обеспечения их согласованного поведения во времени используется электронная система управления на основе многослойных пьезокерамических элементов. Деформируемая зеркальная подложка может быть кремниевой или стеклянной. Зеркальное покрытие выполняется серебряным или диэлектрическим (для более высокой отражательной способности, но стоимость его возрастает). Типичные деформации поверхности зеркала составляют ≤ 1 мкм по амплитуде, ≥ 100 мкм по длине волны и ≥ 100 кГц по частоте. Спекл-контраст дополнительно уменьшается деформируемым зеркалом путём разнесения углов.

Для цифровых кинопроекторов компанией разработаны деформируемые зеркала с активной площадью около 40×60 мм², которые могут выдерживать до 100 Вт непрерывной оптической мощности. Для сопутствующих и встроенных пико-проекторов разработано деформируемое зеркало с активной площадью около $3 \times 4,5$ мм² и потребляемой мощностью до 30 мВт. Используются пьезоэлектрические приводы с номинальным сроком службы 100 тысяч часов. С диэлектрическим зеркальным покрытием удалось достичь 98 % эффективности отражения в видимом диапазоне длин волн. Поверхностные деформации находятся в пределах упругой деформации зеркальной подложки и покрытий и не вызывают разрушения. Сохраняется также поляризация излучения.

С помощью такого устройства обеспечивается значение спекл-контраста на уровне 3 %.

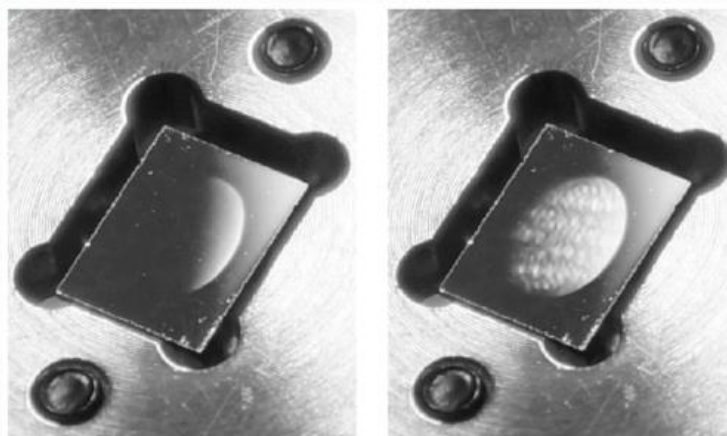


Рис. 3. Внешний вид деформируемого зеркала в неактивном (слева) и активном состоянии [10]

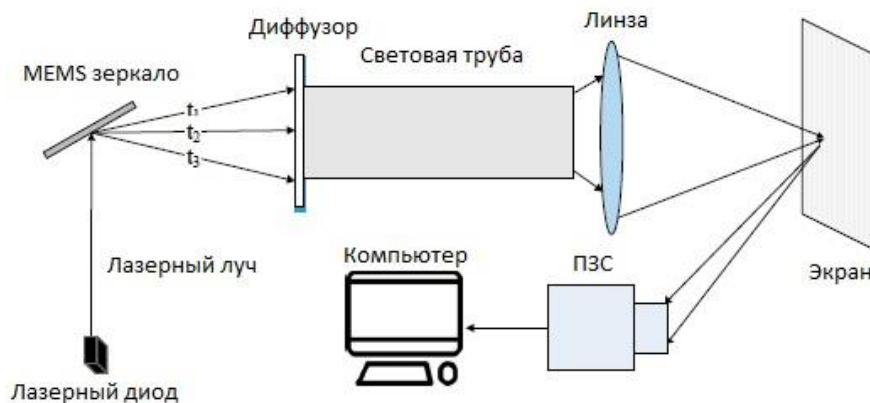


Рис. 4. Схема работы деспеклера на основе MEMS-зеркала [11]

5. MEMC-зеркало

Еще одним способом создания некоррелированных спекл-структур за счет угловой декорреляции является использование MEMC-зеркала, отражающего световые пучки под разными углами. По сути, это микроэлектромеханическая система типа гальванометра с компактным и лёгким выходным зеркалом. Отраженный от него лазерный луч попадает на случайный диффузор и дополнительно перемешивается в «световой трубе» (рисунок 4), что приводит к появлению независимых спекл-картин, и как следствие этого, к подавлению спеклов при их усреднении ПЗС-камерой. В работе [11] использование данной технологии позволило обеспечить спекл-контраст на уровне 3,3 %.

В работе [12] для подавления спеклов использовалось MEMC-зеркало с двумерным отклонением отражённого лазерного луча. Фото прототипа и его составные части показаны на рисунке 5. Размер устройства составляет $16 \times 16 \times 12$ мм. Достигнутое с его помощью значение спекл-контраста составило 4,58 %.

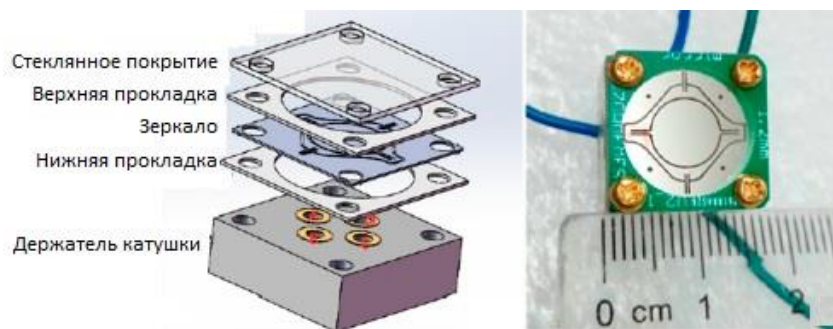


Рис. 5. Фото прототипа «двумерного» MEMS-зеркала (справа) и его составные части [12]



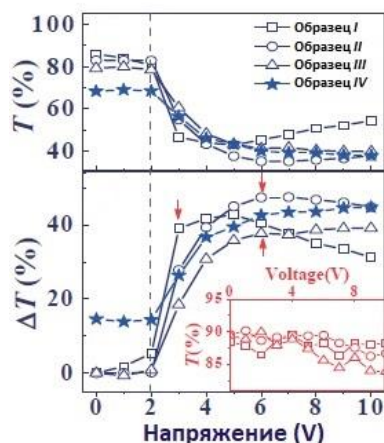
Рис. 6. Экспериментальная установка для получения модуляции света с помощью PSLC-ячейки при различном приложенном напряжении [13]

6. Твист-ячейка с нематическим жидким кристаллом, стабилизированным полимером (PCLS- ячейка)

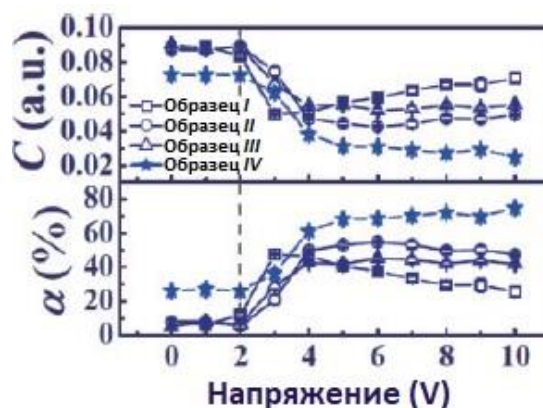
В работе [13] предложен метод подавления спекл-шума на основе использования нематического жидкого кристалла, стабилизированного полимерной сеткой, с высоким начальным коэффициентом оптического пропускания. Для этого использовались четыре образца твист-ячеек, полученные смешиванием нематического ЖК с фотоотверждаемыми бифенилметакрилат-мономерами (ОС) различной концентрации. Образцы I (с концентрацией 3 мас. % ОС), II (с 5 мас. % ОС) и III (с 7 мас. % ОС) представляли собой стандартные ЖК- ячейки толщиной 7,5 мкм с прозрачными ИТО- электродами и натертым слоем полимеризованного полиимида (ориентанта) на стеклянных пластинах. Кроме них был ещё образец IV твист-ячейки (с концентрацией 5 мас. % ОС) с ЖК в клиновидном зазоре размером 4,5 мкм и 8 мкм на разных сторонах ячейки.

Полимерная сетка требуется для стабилизации и/или блокировки ориентированных молекул ЖК при разной ориентации (в различных оптических состояниях), а также для уменьшения времени переключения и рабочего напряжения. При приложении напряжения большая глубина модуляции была получена за счет рассеяния света из-за несоответствия показателей преломления переориентированного слоя нематического ЖК и полимерной сетки. По сути это включаемый и выключаемый диффузор.

На рисунке 6 показаны зависимости коэффициента пропускания и глубины модуляции (а), а также зависимости контраста спекл-структур и скорости снижения спекл-шума (б) от приложенного напряжения для PSLC- ячеек.



а) Зависимости светопропускания (T) и глубины модуляции (ΔT) от приложенного напряжения для PSLC- ячейек



б) Зависимости контраста спекл-структур (C) и скорости снижения спекл-шума (α) от приложенного напряжения для PSLC- ячейек.

Рис. 7. Зависимости светопропускания, глубины модуляции, контраста спекл-структур и скорости снижения спекл-шума от приложенного напряжения для PSLC- ячейек [13]

Таблица 3 [13]. Минимальное пропускание (T_{\min}), максимальная глубина модуляции (ΔT_{\max}), минимальный спекл-контраст (C_{\min}), максимальная скорость снижения спекл-шума (α_{\max}), напряжение, обеспечивающее минимальное пропускание (V_a, T_{\min}), напряжение, обеспечивающее спекл-контраст (V_a, C_{\min})

Образец	$T_{\min}, \%$	$\Delta T_{\max}, \%$	$V_a, T_{\min}, \text{В}$	C_{\min}	$\alpha_{\max}, \%$	$V_a, C_{\min}, \text{В}$
I	43,0	42,8	5	0,050	47,6	3
II	35,3	47,6	7	0,043	54,7	6
III	40,0	39,2	10	0,052	54,7	6
IV	38,1	44,8	10	0,025	74,7	10

В таблице 3 для всех образцов PSLC ячейек приведены минимальные значения пропускания и контраста спекл-картин, максимальные значения глубины модуляции и скорости снижения спекл-шума, а также соответствующие этим величинам значения приложенного напряжения.

В работе [13] не представлена информация о масса-габаритных параметрах устройства. Однако, принимая во внимание современный уровень развития устройств на основе ЖК, можно сделать предположение, что устройство может быть достаточно компактным.

Результаты показали (см. рисунок 7, а и таблицу 3), что наибольшая эффективность подавления спекл-шума (со значением спекл-контраста около 0,025) при низком приложенном напряжении была достигнута в клиновидной ЖК- ячейке.

7. Электрооптическая ячейка с негеликоидальным сегнетоэлектрическим ЖК

В Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН был предложен метод подавления спекл-шума в лазерных изображениях с помощью простой электрооптической ячейки, в которой

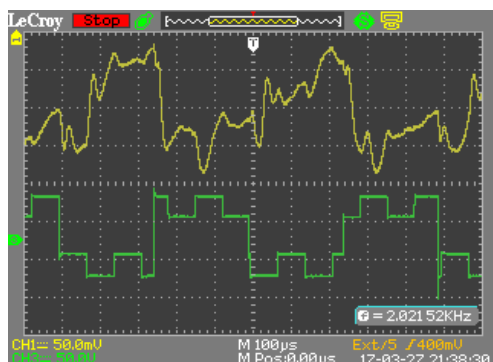
использовался сегнетоэлектрический жидкий кристалл (СЖК), вначале с геликоидальной (спиральной) структурой [14, 15], а затем с негеликоидальной [16–19]. Эффективное подавление спекл-шума в СЖК возможно вследствие разрушения сфазированности лазерного пучка, проходящего через СЖК-ячейку, когда на нее подавались специально сформированные биполярные двухчастотные электрические импульсы.

В обоих случаях кратковременное приложение электрического поля к СЖК приводило к образованию структуры переходных доменов — спонтанно упорядоченных областей, — на границах которых происходит рассеяние света. В результате светорассеяния в объеме слоя СЖК формируются структуры со случайным распределением градиентов показателя преломления, которые являются причиной пространственно-неоднородной (по сечению пучка) фазовой модуляции света, разрушающей фазовые соотношения в лазерном пучке [14]. Заметим, что кратковременное светорассеяние продолжительностью менее 50 мкс не чувствительно для глаз, не искажает структуру изображений, не влияет на их восприятие, и световые потери на него незначительны (менее 5 %).

По отношению к геликоидальным негеликоидальные (бесспиральные) СЖК обеспечили такие преимущества [17], как отсутствие искажений в спектральном составе модулируемого светового излучения и отсутствие светорассеяния при выключении электрического поля. Кроме того, в них эффект пространственно-неоднородной фазовой модуляции света в слое СЖК был менее инерционным и достигался при вдвое большей частоте (1000 Гц) низкочастотного импульсного напряжения.

В прототипе деспеклера использовались негеликоидальные СЖК со следующими материальными параметрами: спонтанная поляризация $P_s = 40$ нКл/см², вращательная вязкость $\gamma_\phi = 0,7$ Пуаз, угол наклона молекул в смектических слоях $\theta_0 = 23^\circ$ (при температуре 20°C), температурный интервал существования сегнетоэлектрической (хиральной смектической C^*) фазы от 2 до 75°C [18]. Толщина электрооптических ячеек варьировалась от 10 до 20 мкм. Увеличение толщины слоя до 18–20 мкм и выбор режима управления с длительностью биполярного импульса, соответствующей разным максимумам рассеяния света [19], позволили не только уменьшить контраст спекл-структур до 0,07 (рисунок 8), но и увеличить частоту модуляции фазовой задержки до 2 кГц (но при повышении управляющего напряжения до 60–65 В).

Важно, что хорошо отработанная технология позволяет варьировать размер апертуры СЖК-деспеклера от долей до нескольких квадратных сантиметров при толщине его 1–2 мм, включая чип управления [20, 21]. К сожалению, этот перспективный прибор до сих пор не доведён до производства.



а) Осциллограммы управляющего напряжения (нижняя) и модуляции фазовой задержки



б) Распределение интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного пучка за СЖК- ячейкой

Рис. 8. Управляющее напряжение, модуляция фазовой задержки и распределение интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного пучка за СЖК- ячейкой при наличии (деспеклер выключен) и отсутствии (деспеклер включен) управляющего напряжения на электродах ячейки [19]

Заключение

Рассмотрены методы и устройства эффективного уменьшения спекл-контраста (до $\leq 5\%$) в лазерном изображении, обеспечивающие подавление спекл-шума и приемлемое для наблюдателя качество формируемого изображения. При этом рассмотрено использование перемещающего диффузора электроактивного полимера (эластичной мембраны), оптического волокна с деформирующим его пьезоэлектрическим вибратором, деформируемого пьезокерамическими элементами зеркала с фазовой рандомизацией, отклоняемого в электромеханической системе микрзеркала с диффузором, а также использование электрооптических жидкокристаллических деспеклеров на основе светорассеивающей твист-ячейки со стабилизированным полимерной сеткой нематическим ЖК и на основе ячейки с сегнетоэлектрическим СЖК, осуществляющим пространственно-неоднородную фазовую модуляцию света.

Отметим, что электрооптические деспеклеры обладают рядом преимуществ по отношению к другим типам деспеклеров, так как не имеют механически деформируемых или перемещаемых элементов, снижающих надёжность и долговечность функционирования, и являются более компактными и простыми по конструкции. Деспеклеры с декорреляцией фазового фронта на основе деформации зеркала и оптического волокна обладают меньшими потерями света. По этому показателю к ним приближается СЖК-ячейка с пространственно-неоднородной фазовой модуляцией света, инициируемой кратковременным включением светорассеяния.

Благодарность

Данная работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60417X0191).

Список источников

- [1] **Goodman, J.** Some fundamental properties of speckle / J. Goodman // *Journal of the Optical Society of America*. — 1976. — Vol. 66. — № 11. — P. 1145–1150.
- [2] **Рябухо, В.** Спекл-интерферометрия / В. Рябухо, // *Соросовский образовательный журнал*. — 2001. — Том 7. — № 5. — С. 102–109.
- [3] **Chellappan, K.** Laser-based displays: a review / K. Chellappan, E. Erden, H. Urey // *Applied Optics*. — 1910. — Vol. 49. — № 25. — P. F79–F98.
- [4] **Chen, H.-A.** Speckle reduction using deformable mirrors with diffusers in a laser pico-projector / H.-A. Chen, J.-W. Pan, Z.-P. Yang // *Optics Express*. — 2017. — Vol. 25. — № 15. — P. 18140–18151.
- [5] **Akram, M.** Speckle reduction methods in laser-based picture projectors / M. Akram, X. Chen // *Optical Review*. — 2016. — Vol. 23. — № 1. — P. 108–120.
- [6] **Faulhaber, A.** Dynamic holography for speckle noise reduction in hybrid measurement system / A. Faulhaber, S. Haberl, T. Haist, M. Gronle, Y. Baroud // *Laser Beam Shaping XVIII. Proc. of SPIE*. — 2018. — Vol. 10744. — P. 107440J.
- [7] **Giger, J.** Laser Speckle Reduction based on electroactive polymers / J. Giger, M. Blum, M. Aschwanden // *The 1st Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'12)*. — 2012.
- [8] **Georgiades, P.** Reducing laser speckle with electroactive polymer actuators / P. Georgiades, V. J. Allan, M. Dickinson, T. Waight // *Journal of Microscopy*. — 2016. — Vol. 264. — № 3. — P. 375–383.
- [9] **Fujimaki, Y.** Reduction of speckle contrast in multimode fibers using piezoelectric vibrator / Y. Lin, Y. Fujimaki, H. Taniguchi // *Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XVI. Proc. of SPIE*. — 2014. — Vol. 8960. — P. 89601S.
- [10] **Shevlin, F.** Phase randomization for spatio-temporal averaging of unwanted interference effects arising from coherence / F. Shevlin // *Applied Optics*. — 2018. — Vol. 57. — № 22. — P. E6–E10.
- [11] **Akram, M.** Laser speckle reduction due to spatial and angular diversity introduced by fast scanning micromirror / M. Akram, F. Shevlin // *Applied Optics*. — 2010. — Vol. 49. — № 17. — P. 3297–3304.
- [12] **Li, F.** A Large-Size MEMS Scanning Mirror for Speckle Reduction Application / F. Li, P. Zhou, T. Wang, J. He, H. Yu, W. Shen // *Micromachines*. — 2017. — Vol. 8. — № 140. — P. 1–10.
- [13] **Lin, J.-H.** Investigation of laser speckle noise suppression by using polymer-stabilized liquid crystals within twisted nematic cell / J.-H. Lin, S.-C. Chang, Y.-H. Li, C.-Y. Chien, C.-H. Chen, Y.-C. Lin, J.-J. Wu, S.-Y. Tsay and Y.-H. Chen // *Applied Physics Express*. — 2017. — Vol. 10. — № 3. — P. 031701.
- [14] **Андреев, А. Л.** Подавление спекл-шума с помощью жидкокристаллической ячейки / А. Л. Андреев, И. Н. Компанец, М. В. Минченко, Е. П. Пожидаев, Т. Б. Андреева // *Квантовая электроника*. — 2008. — Том 38. — № 12. — С. 1166–1170.
- [15] **Andreev, A.** Speckle-noise suppression due to a single ferroelectric liquid crystal cell / A. Andreev, T. Andreeva, I. Kompanets, M. Minchenko, E. Pozhidaev // *Journal of the SID*. — 2009. — Vol. 17. — № 10. — P. 801–807.
- [16] **Андреев, А.** Подавление спекл-шума с помощью ячейки негеликоидального сегнетоэлектрического жидкого кристалла / А. Андреев, Т. Андреева, И. Компанец, Н. Заляпин // *Квантовая электроника*. — 2014. — Том 44. — № 12. — С. 1136–1140.
- [17] **Andreev, A.** Speckle-noise suppression using electro-optical cell with helix-free ferroelectric LC / A. Andreev, T. Andreeva, I. Kompanets, N. Zalyapin, R. Starikov // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2016. — Vol. 737. — № 1. — P. 1–9.
- [18] **Андреев, А.** Электрооптический деспеклер на основе негеликоидального сегнетоэлектрического жидкого кристалла / А. Андреев, Н. Заляпин, Т. Андреева, И. Компанец // *Квантовая электроника*. — 2017. — Vol. 47. — № 11. — С. 1064–1068.

- [19] **Andreev, A.** Space-inhomogeneous phase modulation of laser radiation in an electro-optical ferroelectric liquid crystal cell for suppressing speckle noise // A. Andreev, T. Andreeva, I. Kompanets, N. Zalyapin // Applied Optics. — 2018. — Vol. 57. — № 6. — P. 1331–1337.
- [20] **Патент № 2 373 558 РФ.** Способ модуляции фазы света и оптический модулятор для его осуществления / И. Н. Компанец, А. Л. Андреев, — Оpubл. 20.11.2009.
- [21] **Патент № 2 561 307 РФ.** Способ пространственно-неоднородной модуляции фазы света и оптический модулятор для его осуществления // И. Н. Компанец, А. Л. Андреев, Т. Б. Андреева — Оpubл. 30.07.2015.