

32. Электрооптический деспеклер на основе сегнетоэлектрического ЖК

Н. В. Заляпин¹, А. Л. Андреев¹, Т. Б. Андреева¹, И. Н. Компанец^{1,2}

¹ Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В современных дисплеях лазеры используются в качестве внешних источников света для повышения насыщенности цвета и яркости изображений. Однако для их эффективного использования требуется дополнительное устройство — деспеклер, который подавляет способность лазерного излучения к интерференции, которая является причиной спекл-шума в лазерных изображениях. Пространственно-неоднородная модуляция фазовой задержки, глубина которой порядка и больше π , позволяет разрушить фазовые соотношения в лазерном пучке, проходящем через электрооптическую ячейку с сегнетоэлектрическим жидким кристаллом и, следовательно, эффективно подавить спеклы. Такой деспеклер можно использовать с успехом в голографии и в проекционных дисплеях

Ключевые слова: Лазерный пучок, Интерференция, Жидкий кристалл, Рассеяние света, Подавление спеклов.

Цитирование: Заляпин, Н. В. Электрооптический деспеклер на основе сегнетоэлектрического ЖК / Н. В. Заляпин, А. Л. Андреев, Т. Б. Андреева, И. Н. Компанец // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 141–145.

Введение

Спекл-шум в изображениях, формируемых лазерным пучком, появляется из-за интерференции рассеянных световых волн и устраняется (подавляется) путем разрушения фазовых соотношений в лазерном пучке с помощью деспеклера [1]. На практике в настоящее время в этом устройстве часто используется тонкая движущаяся пленка (диффузор), которая вибрирует на частоте около 100 Гц в квази-синусоидальном режиме с амплитудой до 60 мкм. Этот метод характеризуется нестабильной работой и «усталостью» пленки.

Было много других способов создания деспеклера, но все они имеют серьезные ограничения (например, большие размеры, малый срок службы, нестабильность работы или нетехнологичность изготовления и использования). Поэтому в Физическом институте им. П. Н. Лебедева в Москве был впервые предложен электрооптический метод [2, 3], для чего была использована простая одно-пиксельная ячейка с геликоидальным (спиральным) сегнетоэлектрическим жидким кристаллом (СЖК). Переменное электрическое поле вызывало пространственные деформации спирали, которые приводили к образованию в ЖК-слое мелкомасштабных пространственно-неоднородных структур и к случайному распределению градиентов показателя преломления. В связи с этим фазовые соотношения в лазерном пучке разрушались, и спекл-шум подавлялся (или его оптический контраст резко уменьшался).

Как было обнаружено позднее [4], наличие спирали в СЖК имеет такие недостатки, как изменение спектра излучения и остаточное рассеяние света после выключения электрического поля. Чтобы устранить эти недостатки, был использован другой тип СЖК, а именно негеликоидальный (бесспиральный), в котором спиральная закрутка молекул полностью компенсируется взаимодействием добавок с противоположными знаками оптической активности [5].

Наконец, были разработаны новые бесспиральные FLC, обладающие сравнительно небольшим значением спонтанной поляризации (менее 50 нК/см²), высокой вращательной вязкостью (от 0,3 до 1,0 Пуаза) и пространственной периодической деформацией смектических слоев в отсутствие внешнего электрического поля [6, 7]. Было показано, что в таком СЖК при приложении переменного электрического поля:

1) при переходе к максвелловскому механизму диссипации энергии (т. е. при переходе от вращательной вязкости к сдвиговой) в СЖК возникают динамические солитонные волны, и директор, определяющий главную оптическую ось кристалла, переориентируется вследствие движения солитонных волн;

2) в определенных композициях СЖК в прозрачной солитонной моде наблюдаются быстрый (с временем менее 50 мкс) электрооптический отклик и безгистерезисная модуляционная характеристика с непрерывной серой шкалой в интервале частот до 6 кГц;

3) в определенных композициях СЖК наблюдается интенсивное рассеяние света с малым временем переключения оптического состояния, в том числе би-стабильное рассеяние с запоминанием одного из состояний;

4) возможна быстрая и пространственно-неоднородная модуляция фазовой задержки, инициированная включением рассеяния света.

Последние две позиции являются основой для достижения новых результатов в уменьшении контраста спекл-картин, и мы рассмотрим их более подробно. Отметим также, что упомянутые выше особенности зависят от периода деформации смектических слоев в той или иной СЖК-композиции.

Основой новых СЖК являются те же производные терфенил-дикарбоновой кислоты, которые используются в качестве оптически активных легирующих примесей в известных СЖК. Различия заключаются в конкретных составах СЖК, проявляющих разные уникальные свойства. Тем не менее, хотя значения

вращательной вязкости в разных составах различаются значительно, другие параметры — спонтанная поляризация P_s , угол наклона молекул в смектических слоях θ_0 и последовательность фазовых переходов, для всех СЖК довольно близки [7].

Периодическая деформация смектических слоёв

В случае гомеотропной ориентации молекул периодическая деформация смектических слоев в новых бесспиральных СЖК отчетливо наблюдается в виде чередующихся полос с периодом от 1,5 до 5 мкм, который зависит от молекулярной структуры материала [6, 7].

Деформация происходит при следующем соотношении между значениями материальных параметров СЖК.

1. Вращательная вязкость находится в диапазоне $0,3 < \gamma_\varphi < 1,0$ Пуаз; если она меньше, переход к сдвиговой вязкости γ_ψ не достигается, и солитонный механизм переориентации директора СЖК не реализуется; если она больше 1,0 Пуаз, то время оптического отклика также возрастает и на более высоких частотах, и переход в солитонный режим не наблюдается.

2. Величина спонтанной поляризации P_s меньше 50 нК/см^2 ; если она больше, напряжение насыщения увеличивается, начинают формироваться сегнетоэлектрические домены, и тогда имеет место остаточное рассеяние света после выключения электрического поля.

Периодическая деформация смектических слоев отвечает за свойства новых СЖК, указанные выше. Действительно, быстрый электрооптический отклик с непрерывной серой шкалой в прозрачном режиме, который может использоваться в устройствах отображения, наблюдается в композициях СЖК с довольно большим периодом деформации, более 2 мкм. Например, для состава HF32F период составляет 4 мкм.

Интенсивное электрически управляемое рассеяние света в СЖК, которое может быть использовано в бесполяроидных устройствах модуляции света, проявляется в композициях с относительно малым периодом деформации, порядка 1,5–2,0 мкм (это значение для HF32 составляет около 1,5 мкм).

Иницированное включением светорассеяния быстрое изменение фазовой задержки света, которое может быть использовано для подавления спеклов в лазерных изображениях, более предпочтительно реализуется в композициях СЖК с периодом деформации около 3 мкм. Хотя периоды пространственной деформации композиций HF32F и HF32B различны, другие материальные параметры этих составов практически одинаковы.

Рассеяние света в негеликоидальных СЖК

Рассеяние света в СЖК происходит на границах спонтанно упорядоченных областей, которые образуются в бесспиральном СЖК в процессе возникновения волн стационарного профиля — солитонов. Рассеяние происходит после изменения знака электрического поля и исчезает, когда движение солитонов одинаково переориентирует директор во всех смектических слоях.

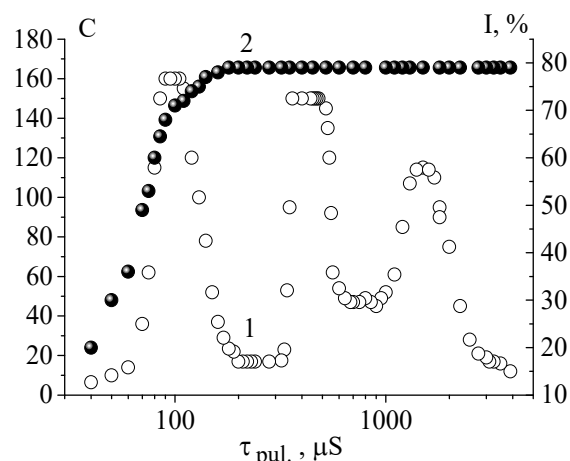


Рис. 1. Зависимость эффективности светорассеяния C (кривая 1) и пропускания света I (кривая 2) от длительности биполярных импульсов напряжения с фиксированной амплитудой $\pm 50 \text{ В}$. Толщина электрооптической ячейки с СЖК HF32 — 18 мкм.

Изменение направления электрического поля снова приводит к образованию переходного домена, и процесс повторяется [7].

При определенном соотношении между амплитудой и длительностью биполярных импульсов напряжения, энергией деформации смектических слоев и спонтанной поляризацией СЖК, процесс рассеяния света на динамической структуре, возникающей при переходе к максвелловскому механизму диссипации энергии, имеет бистабильный характер. Оптическое состояние с интенсивным рассеянием или без рассеяния можно переключить в течение нескольких десятков микросекунд и запомнить в течение нескольких десятков секунд или до прихода импульса противоположной полярности. Максимальная частота модуляции света может достигать 5 кГц, а оптический контраст — более 200:1.

Вследствие отсутствия спирали в СЖК отсутствует рассеяние световых лучей после выключения электрического поля, и пропущенное через ячейку оптическое излучение не меняет свой спектральный состав. Поскольку величина спонтанной поляризации не превышает 50 нК/см^2 , сегнетоэлектрические домены не возникают, и в отсутствие электрического поля нет центров рассеяния и дифракции. Напряжение насыщения довольно низкое, и, следовательно, рабочее напряжение ячейки FLC также довольно низкое.

Существует оптимальное соотношение между периодом деформации смектических слоев FLC и толщиной электрооптической ячейки, когда при определенной напряжённости электрического поля E скорость движения солитонных волн максимальна (соответственно, время электрооптического отклика $\tau_{0,1-0,9}$ минимально), и также максимальна частота модуляции света.

Существует ограничение на минимальную длительность импульсов напряжения, которые включают

и выключают процесс рассеяния. Она не должна превышать характерное время переориентации директора, вызванное движением ориентационного перегиба [7].

$$\tau_c = \frac{2\gamma_\psi}{\Theta_0^2(P_s E \cos\phi_0 + M)}, \quad (1)$$

где ϕ_0 — начальный азимутальный угол ориентации директора. Если $\phi_0 = 30^\circ$, $P_s = 50 \text{ нК/см}^2$, $M = 4 \cdot 10^3 \text{ эрг/см}^3$, $E = 3 \text{ В/мкм}$, угол наклона молекул $\Theta_0 = 23^\circ$ и $\gamma_\psi = 0,2 \text{ Пуаз}$, тогда время переориентации директора τ_c составляет около 150 мкс.

В зависимости от времени действия электрического поля (по длительности импульсов напряжения) и толщины электрооптической ячейки могут наблюдаться несколько максимумов рассеяния света с разной эффективностью рассеяния S (или коэффициентом контраста) — рис. 1. Появление второго и третьего максимумов эффективности рассеяния света происходит с увеличением толщины электрооптической ячейки до 18 мкм.

Максимальная эффективность рассеяния света и максимальный коэффициент пропускания света достигаются при разных длинах импульсов управляющего напряжения. Увеличение длительности импульса приводит к увеличению длины доменных стенок и к нерегулярным структурам рассеяния. Как следствие, плотность центров рассеяния уменьшается, что является причиной снижения эффективности рассеяния света (рис. 1).

Основными возможными применениями светорассеивающих композиций СЖК являются: бесполароидные оптические затворы для видимой и ИК-области спектра, энергетически эффективные экраны электронных книг, 3D-визуализаторы объемных (вольюметрических) дисплеев и т. д. Важно также, что светорассеивание может инициировать в СЖК процесс формирования пространственно-неоднородных структур с разными градиентами показателя преломления, которые разрушают фазовое согласование лазерных лучей.

Быстрая модуляция фазовой задержки света

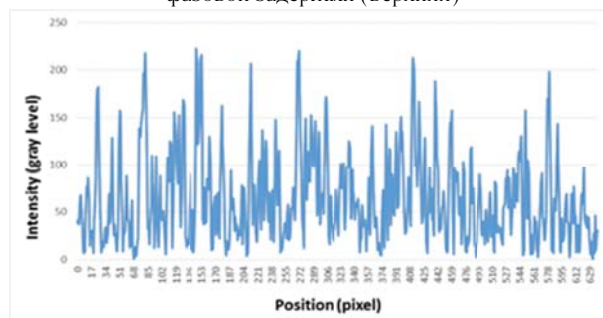
Когда длительность импульсов напряжения, подаваемых одновременно на электрооптическую ячейку, соответствует разным максимумам эффективности светорассеяния (рис. 1), переходы между светорассеивающими модами (соответствуют максимумам рассеяния света) приводят к наиболее хаотическому изменению положения индикатрисы рассеяния.

Из-за кратковременного включения светорассеяния (менее чем на 50 мкс) образуются структуры с почти случайным распределением градиентов показателя преломления по всему объему СЖК, являющиеся причиной пространственно-неравномерной фазовой модуляции (в сечении пучка) излучения в электрооптической ячейке. Глубина модуляции порядка и больше π ,

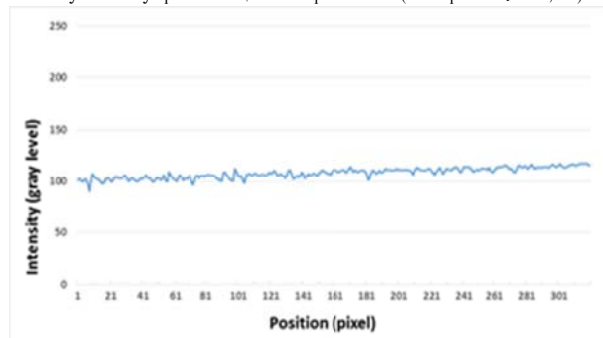
что позволяет разрушать фазовые соотношения в лазерном пучке, проходящем через электрооптическую ячейку, и, следовательно, подавлять speckle-шум в изображениях, формируемых лазерным лучом [8, 9].



а) оциллограммы управляющего напряжения (нижняя) и фазовой задержки (верхняя)



б) распределение интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного луча, прошедшего через электрооптическую ячейку в отсутствие управляющего напряжения (контраст $C_1 = 0,82$)



в) распределение интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного луча при подаче управляющего напряжения (контраст $C_2 = 0,07$)

Рис. 2. Иллюстрация работы экспериментального образца деспеклера с использованием нового бесспирального СЖК (состав HF35). Толщина электрооптической ячейки 20 мкм; длина волны лазерного излучения 0,65 мкм; частота низкочастотного сигнала 2 кГц и амплитуда $\pm 50 \text{ В}$; частота модулирующего сигнала 7 кГц и амплитуда $\pm 15 \text{ В}$ (напряженность электрического поля 3,25 В/мкм)

Именно такой подход был использован для разработки эффективного электрооптического деспеклера — устройства, которое позволяет уменьшить (подавить) спеклы в лазерных изображениях, поскольку СЖК-ячейка разрушает фазовые соотношения в про-

ходящем лазерном пучке, и лазерные лучи теряют способность создавать случайные интерференционные картины — спекл-шум.

Для создания разных не повторяющихся распределений градиентов показателя преломления в объеме слоя СЖК на ячейку подавались импульсы двухчастотного напряжения различной формы (обычно меандра), причём импульсы низкой частоты (до 2 кГц) модулировались импульсами высокой частоты (до 10 кГц). Рис. 2 иллюстрирует работу экспериментального образца деспеклера с использованием нового бесспирального СЖК. Режим импульсного напряжения показан на рис. 2а. Соответственно показано распределение интенсивности спеклов в поперечном сечении лазерного луча за ячейкой СЖК, когда управляющее напряжение на электродах отсутствует (рис. 2б) и приложено (рис. 2в).

Спекл-картины записывались с помощью ПЗС-камеры и обрабатывались с помощью специального программного продукта. Сравнение с деспеклером на основе спирального СЖК показывает, что деспеклер на основе бесспирального СЖК имеет важные преимущества: как минимум, в четыре раза большую частоту модуляции, неизменный спектральный состав проходящего оптического излучения и отсутствие остаточного рассеяния света в отсутствие электрического поля (из-за отсутствия спиральной структуры).

Эффективность уменьшения контраста спеклов, рассчитанная по данным на рис. 2, как отношение R между контрастом C_1 , измеренным без деспеклера, и контрастом C_2 , измеренным с включённым деспеклером: $R = 10 \log_{10}(C_1/C_2) = 10,2$ дБ. Возможно, этот результат для ячейки СЖК толщиной 20 мкм с составом HF35 является оптимальным. В образцах с ячейками толщиной 8–13 мкм контраст спекл-структур составлял всего 9 дБ при напряжении ≤ 35 В.

Эксперименты показали простоту и очень высокую эффективность деспеклера на основе на электро-

оптической ячейки с бесспиральным СЖК. Такое устройство может широко использоваться в голографических и проекционных дисплеях с лазерными источниками. Для записи голограмм его применение, однако, проблематично вследствие деполяризации рассеянного в устройстве света.

Заключение

Изучен экспериментальный образец электрооптического модулятора с функцией деспеклера на основе ячейки с негеликоидальным СЖК.

Рассмотрена пространственно-неоднородная (по поперечному сечению лазерного луча) фазовая модуляция излучения с помощью простой (однопиксельной) электрооптической СЖК-ячейки, инициированная кратковременным светорассеянием, вызванным одновременным приложением двухчастотных импульсов управляющего напряжения. Благодаря выбору параметров композиции СЖК, увеличению толщины слоя до 18–20 мкм и режиму управления с длительностью биполярного импульса, соответствующей разным максимумам рассеяния света, не только уменьшен контраст спекл-структур (до 0,07 с выигрышем в 10,2 дБ), но и увеличена частота модуляции фазовой задержки (до 2 кГц). При этом спектральный состав модулированного излучения не изменялся, и рассеяние света в отсутствие напряжения на деспеклере не наблюдалось. К тому же одинаковые формы низко- и высокочастотных импульсов напряжения (меандр) упрощали электронную схему управления устройством. Указанные свойства характеризуют главные преимущества электрооптического деспеклера на основе СЖК.

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

Авторы выражают благодарность Юрию П. Бобылеву и Вадиму М. Шошину за изготовление электрооптических СЖК-ячеек.

Список источников

- [1] Goodman, J. W. Laser Speckle and Related Phenomena / J. W. Goodman. — Berlin, Springer-Verlag, 1984. — P. 9–75.
- [2] Андреев, А. Л. Подавление спекл-шума с помощью жидкокристаллической ячейки / А. Л. Андреев, Т. Б. Андреева, И. Н. Компанец, М. В. Минченко, Е. П. Пожидаев // Квантовая электроника. — 2008. — Vol. 38. — № 12. — С. 1166–1170.
- [3] Andreev, A. L. Speckle-noise suppression due to a single ferroelectric liquid crystal cell / A. L. Andreev, T. B. Andreeva, I. N. Kompanets, M. V. Minchenko, E. P. Pozhidaev // Journal of the SID. — 2009. — Vol. 17. — № 10. — P. 801–807.
- [4] Андреев, А. Подавление спекл-шума с помощью ячейки негеликоидального сегнетоэлектрического жидкого кристалла / А. Андреев, Т. Андреева, И. Компанец, Н. Заляпин // Квантовая электроника. — 2014. — Vol. 44. — № 12. — С. 1136–1140.
- [5] Beresnev, L. A. First non-helix ferroelectric liquid crystal / L. A. Beresnev, V. A. Baykalov, L. M. Blinov, E. P. Pozhidaev, G. V. Purvanetskis // Pisma v ZhETF. — 1981. — Vol. 33. — № 10. — P. 553–557.
- [6] Andreev, A. Optical response time of helix-free FLC: continuous gray scale, fastest response, and lowest control voltage / A. L. Andreev, T. B. Andreeva, I. N. Kompanets, N. V. Zalyapin // Journal of the SID. — 2014. — Vol. 22. — № 2. — P. 115–121.
- [7] Andreev, A. Fast bistable intensive light scattering in helix-free ferroelectric liquid crystals / A. Andreev, T. Andreeva, I. Kompanets, N. Zalyapin, H. Xu, M. Pivnenko, D. Chu // Applied Optics. — 2016. — Vol. 55. — № 13. — P. 3483–3492.
- [8] Andreev, A. Novel FLC materials open new possibilities for FLCOS based microdisplays and video projectors / A. L. Andreev, T. B. Andreeva, I. N. Kompanets, N. V. Zalyapin, R. S. Starikov // Physics Procedia. — 2015. — Vol. 73. — P. 87–94.

- [9] **Андреев, А.** Электрооптический деспеклер на основе негеликоидального сегнетоэлектрического жидкого кристалла / А. Л. Андреев, Н. В. Заляпин, Т. Б. Андреева, И. Н. Компанец // Квантовая электроника. — 2017. — Vol. 47. — № 11. — С. 1064–1068.

Electrooptical despeckler based on the ferroelectric liquid crystal

N. V. Zalyapin¹, A. L. Andreev¹, T. B. Andreeva¹, I. N. Kompanets^{1,2}

¹ P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia

² National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia

In modern displays the laser diodes are used as external light sources to improve the color saturation and brightness of images. To use them effectively, however, you need an additional device — a despeckler, which suppresses the interference ability of the laser radiation that is the reason of a speckle-noise in laser images. Spatially non-uniform modulation of the phase delay, the depth of which is the order and more π , allows to destroy the phase relations in a laser beam passing through an electro-optical cell with the Ferroelectric Liquid Crystal (FLC) and, consequently, to suppress effectively the speckles.

Keywords: Laser beam, Interference, Liquid crystal, Light scattering, Speckle suppression.