НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА

НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408

электронный научно-технический журнал

Реализация гибридного метода модуляции в жидкокристаллическом модуляторе света для оптико-голографической памяти

09, сентябрь 2012

DOI: 10.7463/0912.0455904

Одиноков С. Б., Вереникина Н. М., Лушников Д. С., Маркин В. В., Бетин А. Ю.

УДК 004.085+ 004.33+535.015+535.512+535.568+681.7.06

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

odinokov@bmstu.ru

1.verenikina@bmstu.ru

dmlu41@yandex.ru

hololab@rl2.bmstu.ru

Введение

В системах архивной памяти ввод цифровой информации осуществляется в виде набора двоичных данных с помощью освещенного транспаранта – жидкокристаллического (ЖК) модулятора, прозрачные окна – ячейки которого соответствуют единицам, непрозрачные ячейки – нулям (рис. 1).

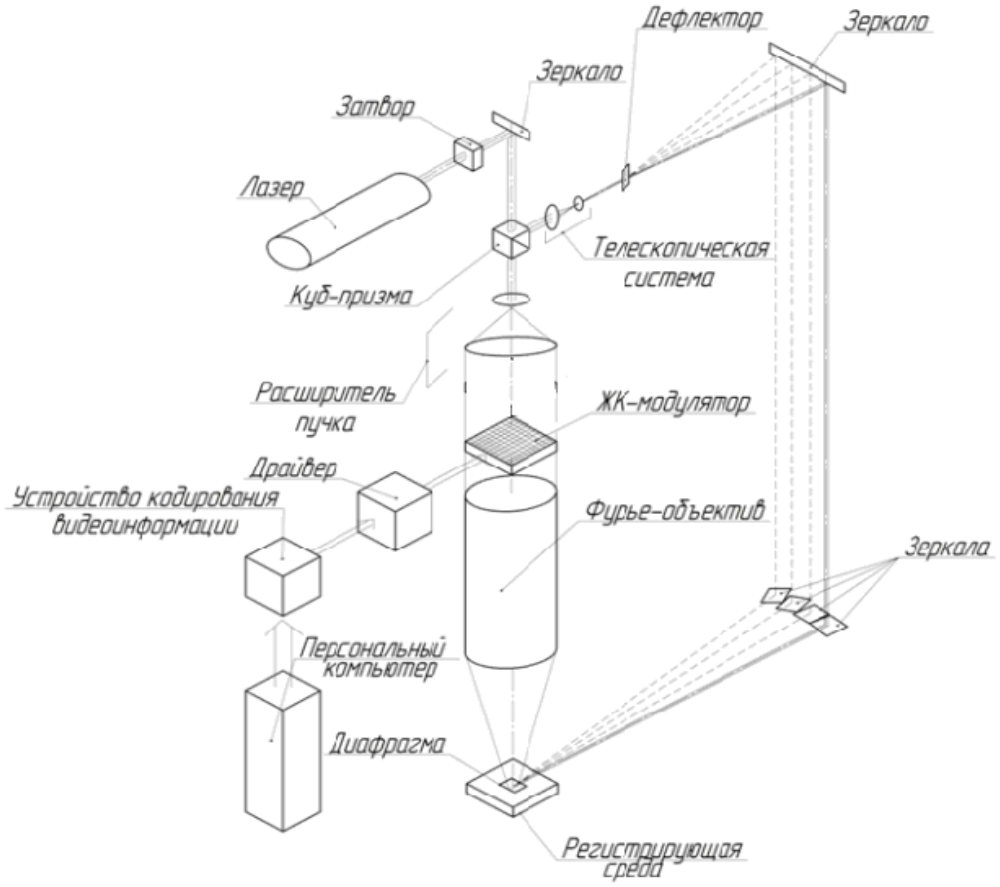

Рис. 1. Функциональная схема оптической головки записи микроголограмм

При получении фурье-голограмм (ФГ) с использованием объектива фурье-образ транспаранта будет складываться из фурье-образов идентичных источников, которые попадут на один и тот же ограниченный участок частотной плоскости – микроголограмму. Получение следующей микроголограммы можно осуществить путём перемещения носителя (регистрирующей среды), что имеет преимущество по сравнению с другими схемами записи, поскольку оптическая система работает вблизи оптической оси и имеет минимальные искажения. При освещении микроголограммы с использованием объектива восстанавливается яркое световое пятно, которое преобразуется элементом матричного приемника излучения в электрический сигнал. Таким образом, восстанавливается информация без непосредственного контакта детектора с регистрирующей средой.

Если устройства получения ФГ и восстановления разделить, то можно существенно снизить стоимость системы в целом. Учитывая то, что при получении

голограммы необходимо обеспечить условия интерферометрической стабильности, а при восстановлении этого не требуется, получение голограмм можно осуществлять в едином центре, а восстановление информации – в достаточно дешевых устройствах для потребителей.

Для реализации устройства голографической памяти была разработана схема получения ФГ с перпендикулярным падением опорного пучка (рис.2), что позволяет применить оригинальный метод мультиплексирования голограмм, основанный на пространственном разделении изображений, одновременно восстанавливаемых с наложенных голограмм [1, 2].

Информация выводится на пространственно-временной модулятор света (ПВМС) 11 и фурье-объективом 10 преобразуется в пространственно-частотный спектр в плоскости голографического диска 13. В этой же плоскости происходит интерференция между предметным и опорным пучками и записывается микроголограмма. Излучение красного лазера 16 используется для записи синхродорожек в виде побитовой информации.

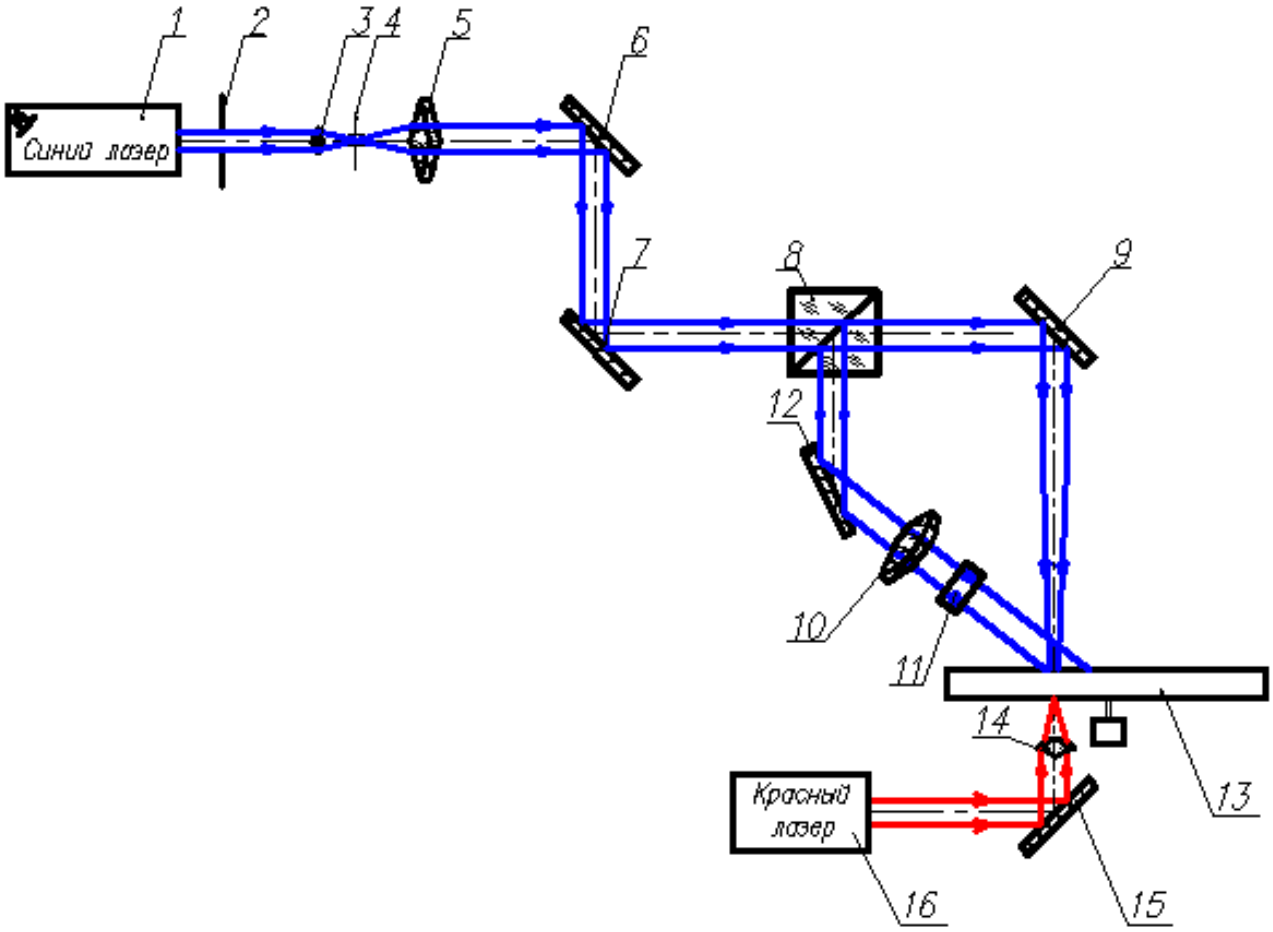

Рис. 2. Оптическая схема одного канала оптико-электронного устройства для записи информации на голографический диск [3]:

1 – синий лазер, 2 – затвор, 3, 14 – линзы, 4 – точечная диафрагма, 5 – коллимирующий объектив, 6, 7, 9, 12, 15 – зеркала, 8 – куб-призма, 10 – фурье-объектив, 11 – ПВМС, 13 – голографический диск, 16 – красный лазер

Запись информации не в точке регистрирующей среды, а на площади микрограммы обеспечивает помехозащищенность записи. Для этой же цели служит кодирование цифровой информации с использованием амплитудно-фазовой пространственной модуляции излучения. При использовании метода гибридного кодирования информации [4] битам информации «1» и «0» ставятся в соответствие дискретные значения и амплитуды и фазы предметного пучка:

- “0” биты информации кодируются через состояние ячейки с низким пропусканием и нулевой фазовой задержкой;

- “1” биты информации кодируются через два состояния ячеек с высоким пропусканием (одинаковым для обеих ячеек), но с различными фазовыми задержками 0 и π.
- для полного подавления нулевой составляющей в пространственном спектре страницы данных, соотношение ячеек пространственного модулятора, кодирующих “1” биты в обоих состояниях, должно быть близко к 1, а их взаимное расположение максимально хаотично.

Таким образом, ПВМС, необходимый для формирования страничной информации, ввода ее в оптический канал и обеспечения требуемой модуляции лазерного пучка в соответствии с заданной схемой, следует признать одним из наиболее важных компонентов в системах страничной оптико-голографической памяти.

В качестве ПВМС в системах оптико-голографической памяти, как правило, используются ЖК-панели, которые могут осуществлять пространственную модуляцию излучения по амплитуде и фазе. Несмотря на значительные преимущества ЖК-ПВМС в пространственной модуляции (по амплитуде и фазе), они в то же время ограничены в разрешении и глубине битового цвета, отвечающего за доступный диапазон уровней серого. Кроме того, кривая пропускания (интенсивность пропускаемого света относительно напряжения на электродах) такого модулятора является нелинейной и сильно изменяется при различных настройках параметров. Следовательно, изначально неизвестно, какова зависимость амплитудного пропускания и фазовой модуляционной характеристики от различных настроек яркости, контраста, напряжения на ячейке, направления поляризации падающего пучка и пр.

Проводимое исследование направлено на то, чтобы найти наиболее оптимальный набор параметров ЖК-панели для реализации одновременно амплитудного и фазового кодирования информации, необходимого в системах голографической памяти.

1 Теоретические и экспериментальные исследования пространственно-временного модулятора света на основе матрицы ячеек жидких кристаллов

Жидкие кристаллы - вещества, обладающие одновременно свойствами как жидкостей (текучесть), так и кристаллов (анизотропия). По структуре ЖК представляют собой жидкости, состоящие из молекул вытянутой формы, определённым образом упорядоченных во всем объёме этой жидкости. Наиболее характерным свойством ЖК является их способность изменять ориентацию молекул под воздействием электрических полей, что открывает широкие возможности для применения их в промышленности.

Все ячейки ЖК-панели (рис. 3) состоят из слоя молекул жидких кристаллов, заключённых между двумя прозрачными электродами, и двух поляризационных фильтров (поляризаторов), плоскости поляризации которых, как правило, перпендикулярны друг относительно друга. В отсутствие жидких кристаллов свет, пропускаемый первым фильтром, практически полностью блокируется вторым. Поверхность электродов, контактирующая с ЖК, специально обработана для изначальной ориентации молекул в нужном направлении [5]. Эти направления взаимно перпендикулярны, поэтому молекулы в отсутствие напряжения выстраиваются в винтообразную структуру. В результате, плоскость поляризации поворачивается при прохождении от входного фильтра до выходного. В отсутствии напряжения ячейку можно считать прозрачной. Если же к электродам приложено напряжение, то молекулы стремятся выстроиться в направлении электрического поля, что искажает винтовую структуру. Молекулы ЖК «раскручиваются» тем сильнее, чем выше приложенный потенциал. Чувствительность к электрическому полю – одна из основных особенностей ЖК. При достаточной величине поля практически все молекулы становятся параллельны между собой, что приводит к непрозрачности структуры. Варьируя напряжение, можно управлять степенью прозрачности ЖК ячейки [6]. Поэтому ЖК-панели, как управляемые оптические транспаранты, могут быть использованы не только как элементы проекционного устройства, но и выполнять значительное число функций, связанных с преобразованием, хранением и обработкой оптических сигналов. Это позволяет их идентифицировать как пространственно-временные модуляторы света.

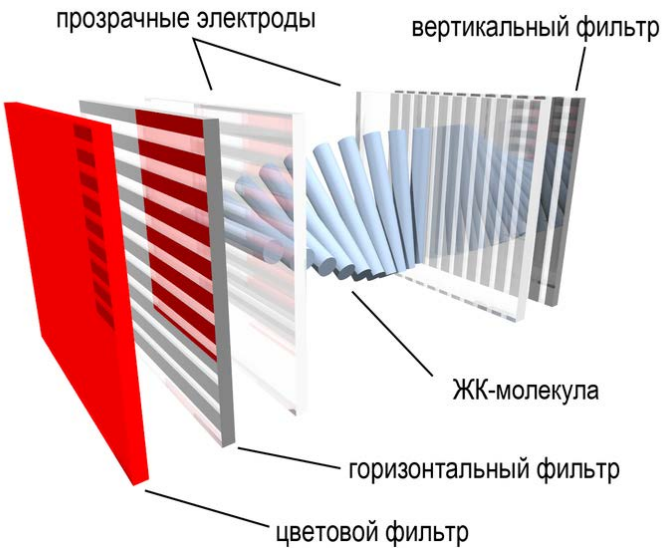

Рис. 3. Жидкокристаллический пространственно-временной модулятор света (ЖК-ПВМС)

1.1 Математическое моделирование ЖК-ПВМС

Прохождение света через ЖК ячейку описывается матрицей Джонса. Пусть толщина ячейки равняется *d* и разделена на множество тонких волновых пластинок с единичной длиной *dz*, в которых оптические оси последовательно поворачиваются вдоль всей длины ячейки. Итоговая матрица Джонса линейной спиральной анизотропной ЖК-ячейки задается уравнением.

$$\mathbf{M}_{\mathrm{LC}} = \mathbf{R}(-\alpha)\begin{pmatrix} \cos X - i\frac{\beta}{2}\frac{\sin X}{X} & \alpha\frac{\sin X}{X} \\ -\alpha\frac{\sin X}{X} & \cos X + i\frac{\beta}{2}\frac{\sin X}{X} \end{pmatrix}, \qquad (1)$$

где $X = \sqrt{\alpha^2 + \left(\frac{\beta}{2}\right)^2}$, β – фазовая задержка, $\mathbf{R}(\cdot) = \begin{bmatrix} \cos(\cdot) & \sin(\cdot) \\ -\sin(\cdot) & \cos(\cdot) \end{bmatrix}$ - матрица поворота**.**

При приложении электрического поля между двумя обкладками, все молекулы выравниваются вдоль направления поля, так что плоскость молекулярной ориентации больше не совпадает с плоскость *x-y*, а угол поворота падающего света уменьшается. Причем зависимость угла разворота молекул Θ в (1) от приложенного напряжения имеет вид:

$$\theta = \begin{cases} 0, & V \le V_{th} \\ \frac{\pi}{2} - 2\tan^{-1}\left[\exp\left(-\frac{V-V_{th}}{V_o}\right)\right], & V > V_{th}, \end{cases} \tag{2}$$

где V_{th} обозначает пороговый контраст, ниже которого никакого поворота не произойдет, а V_o – допустимое напряжение, при котором угол поворота равен 49,6 °. Для угла поворота Θ (2) коэффициент преломления необыкновенной волны становится равным

$$\frac{1}{n^2(\theta)} = \frac{\cos^2\theta}{n_e^2} + \frac{\sin^2\theta}{n_o^2}, \tag{3}$$

а фазовая задержка между двумя распространяющимися модами с учетом коэффициента преломления (3) равной

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}\left[n(\theta) - n_o\right] d. \tag{4}$$

Зависимость фазовой задержки (4) от приложенного напряжения представлена на рисунке 4.

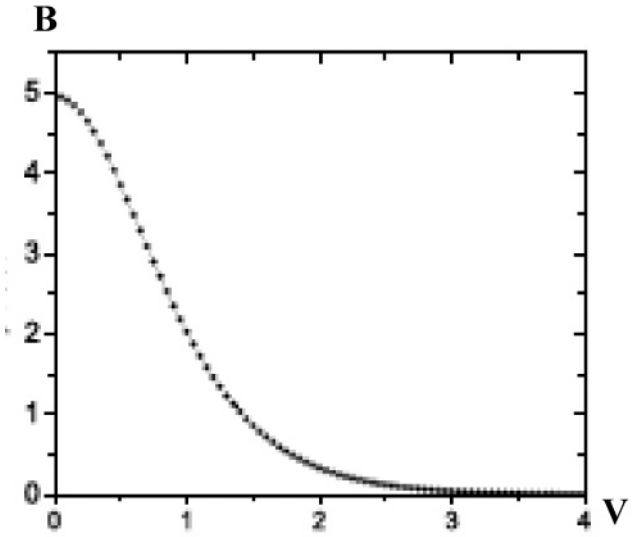

Рис. 4. Вид зависимость фазовой задержки относительно приложенного напряжения

Задержка максимальна в выключенном состоянии (OFF), для которого Θ=0, $n(\Theta)=n_e$, и уменьшается равномерно до нуля при увеличении угла поворота до 90°.

Если поле достаточно широкое, то все молекулы будут повернуты на 90° вдоль направления поля. В таком случае поляризация падающего света не изменится, так как ЖК-молекулы будут вести себя как изотропный материал.

В стандартной схеме изучения модуляционной характеристики ЖК-ПВМС располагают между поляризатором и анализатором (рис.5).

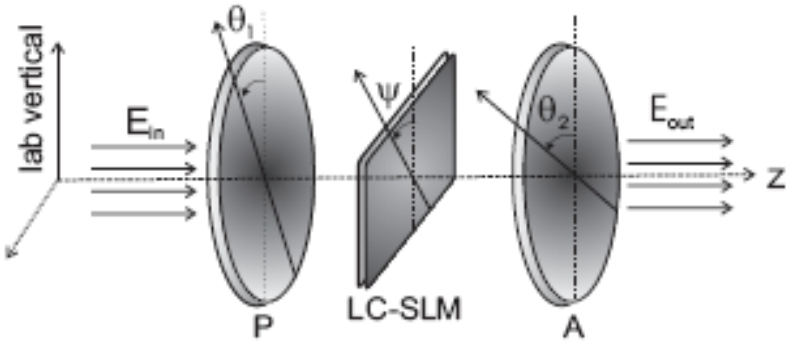

Рис. 5. Базовая конфигурация схемы, показывающая ориентацию поляризатора P, спирального нематического ЖК-ПВМС и анализатора A

На рис. 5 θ_1 и θ_2 – углы отклонения плоскостей поляризации поляризатора *P* и анализатора *A* от лабораторной вертикали (lab vertical), ψ – угол между лабораторной вертикалью и входным директором (направлением ориентации молекул ЖК на первой подложке) [7].

С использованием матрицы Джонса получаем

$$\mathbf{E}_{\mathbf{out}} = \mathbf{M}_{\mathbf{eff}}\mathbf{E}_{\mathbf{in}},$$

где $\mathbf{E}_{\mathbf{out}} = [E_x \quad E_y]^T$; $\mathbf{E}_{\mathbf{in}} = [\cos\theta_1 \quad \sin\theta_1]^T$ - векторы Джонса для входного и выходного излучения, а M_{eff} – матрица Джонса для всей системы:

$$\mathbf{M}_{\mathbf{eff}} = \mathbf{R}(-\theta_2)\cdot\mathbf{A}\cdot\mathbf{R}(\theta_2)\cdot\mathbf{R}(-\psi)\cdot\mathbf{M}_{\mathbf{LC}}\cdot\mathbf{R}(\psi)\cdot\mathbf{R}(-\theta_1)\cdot\mathbf{P}\cdot\mathbf{R}(\theta_1) \qquad (5)$$

В выражении (5) поляризатор и анализатор задаются матрицей:

$$\mathbf{P} = \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Интенсивность на выходе определяет выражение

$$T = |\mathbf{E}_{\mathbf{out}}|^2 = |E_x|^2 + |E_y|^2$$

В результате можно выделить два принципиальных случая пропускания по интенсивности:

1) $T_{\parallel}$ для параллельной ориентации $\theta_2 = \theta_1$.

2) $T_{\perp}$ для скрещенной ориентации $\theta_2 = \theta_1 + 90°$.

Упрощая выражение (5) для M_{eff}, получим:

$$T_{\parallel} = \left[\cos X \cos\alpha + \frac{\alpha}{X}\sin\alpha \sin X\right]^2 + \left(\frac{\beta}{2X}\right)^2 \sin^2 X \cos^2(\alpha - 2\theta_1 + 2\psi)$$

$$T_{\perp} = \left[\cos X \sin\alpha - \frac{\alpha}{X}\cos\alpha \sin X\right]^2 + \left(\frac{\beta}{2X}\right)^2 \sin^2 X \sin^2(\alpha - 2\theta_1 + 2\psi) \quad (6)$$

С помощью выражений (6) можно найти угол поворота α, направление молекулярного директора ψ на входной грани и максимальную задержку (рис. 6).

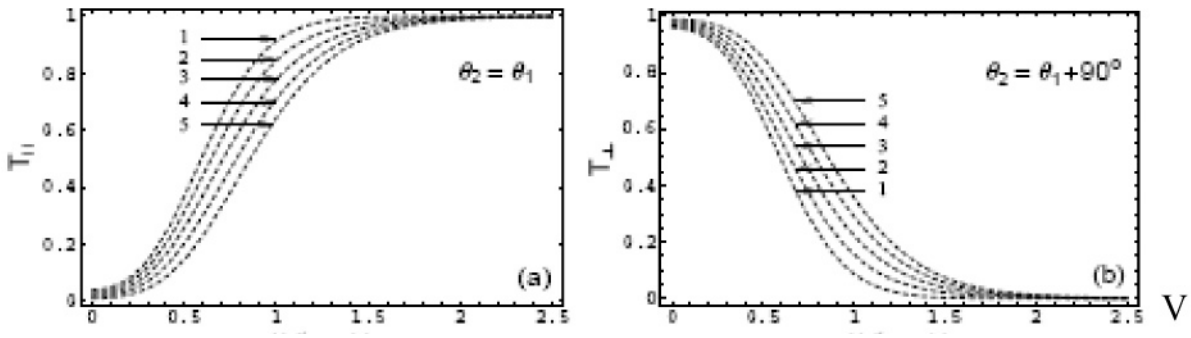

Рис. 6. Рассчитанное пропускание (6) для параллельной и скрещенной конфигурации: линии 1-5 соответствуют углам $\theta_1 = 0, \frac{\pi}{12}, \frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{4}$

То есть, при приложении поля меняются не только поляризационные свойства ЖК-ячейки (что видно по пропусканию), но также и угол поворота молекул в кристалле (от 0 ° до 90 °). Таким образом, в спиральном нематическом ЖК всегда присутствует некая «перекрестная связь» между эффектами пропускания и фазовой модуляции. При этом чисто фазовая модуляция возможна лишь на участке, на котором интенсивность значительно не меняется.

Ввиду небольшого значения двулучепреломления $\Delta n \approx 0.1$ и малой толщины ячейки d в большинстве случаев для ЖК-ПВМС это условие трудно достижимо (ведь для его выполнения требуется слишком большая фазовая задержка). Гораздо

проще реализовать чисто фазовый модулятор, используя пару параллельных нематических ЖК-ПВМС.

1.2 Выбор и обоснование оптимального варианта исследований

Для начала необходимо определить угол поворота α и направление молекулярного директора ψ при максимальной фазовой задержке $\beta_{max.}$ По предложенной схеме (рис. 5) ЖК-ПВМС должен располагаться между анализатором и поляризатором, установленными на вращающихся от 0 ° до 360 ° платформах. В эксперименте опустим поляризатор, так как излучение используемого гелий-кадмиевого лазера можно на выходе считать плоско-поляризованным с изветсным направлением вектора поляризации (в эксперименте вектор колебания электрической составляющей располагался вертикально). Пучок лазера освещает ЖК-ПВМС в выключенном OFF-состоянии. Сам ПВМС установлен на вращающейся платформе, чтобы имитировать изменяющийся угол поворота входной поляризации, а после него, как обычно, помещается анализатор, также на вращающейся платформе.

При фиксированном направлении входной поляризации Θ_1 анализатор вращается на углы от 0 ° до 360 °, при этом снимаются показания пропускания света. Такая процедура была выполнена для каждого значения направления входной поляризации с шагом в 10 °.

Таким образом, минимальное пропускание будет наблюдаться в случае, если поляризатор ориентирован вдоль входного директора ЖК-ячейки, то есть если $\theta_1 = \psi$ и $\theta_2 = \theta_1 + \alpha$.

Обычно угол поворота $\alpha = 90°$, а направление директора $\psi = 45°$.

Для нахождения β_{max} (см. уравнения выше) надо вращать одновременно поляризатор и анализатор в параллельном или скрещенном состоянии, тогда можно построить график зависимости пропускания от угла вращения, как, например, на рисунке 7.

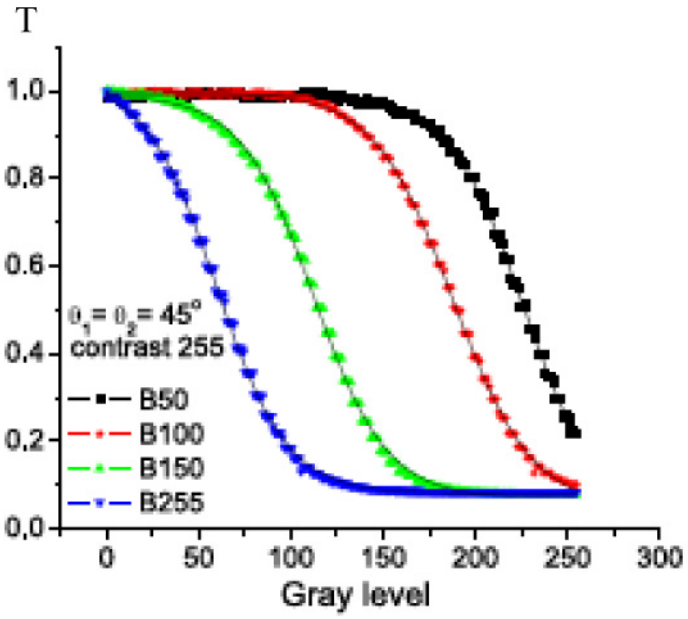

Рис. 7. График зависимости нормированной интенсивности от уровня серого в скрещенном положении поляризатора и анализатора при контрасте, равном 255, и при четырех разных уровнях яркости B

Модуляционные кривые по интенсивности

Будем теперь исследовать ПВМС во включенном состоянии (ON). Напряжение на каждой ячейке ПВМС соответствует уровню серого в изображении. При этом в изображении будем задавать однородный фон, состоящий только из одного цвета. Будем менять интенсивность от 0 до 255 с шагом, равным 5. Расширенный пучок лазерного света будет освещать ЖК-панель, а изменения в пропускании света будут регистрироваться при помощи универсального фотодетектора фирмы Ophir, настроенного на микровольтный режим. Графики зависимости пропускания от уровня серого могут быть сняты при различных заданных значениях яркости и контраста в качестве параметров. Кроме того, глубина модуляции, рассчитываемая по формуле

$$|T(\mathrm{GL}=255) - T(\mathrm{GL}=0)| \times 100\% \quad , \qquad (7)$$

может значительно меняться в зависимости от углов Θ_1 и Θ_2 .

С практической точки зрения, конфигурация, дающая максимальную глубину модуляции (7), наиболее предпочтительна. Экспериментально показано, что достичь

глубину модуляции, близкую к 100 %, возможно лишь при параллельной ориентации поляризатора и анализатора.

При режиме с яркостью, большей 50, и контрастом, равном 255, кривая модуляции по интенсивности (см. рисунок выше) напоминает HD-кривую для фотографических эмульсий и может быть описана сигмоидальной функцией вида

$$s = s_b + \frac{s_t - s_b}{1 + \exp[-(r - r_o)/w]}, \qquad (8)$$

где s_b и s_t – асимптотические значения при большом и малом r; вид кривой (8) показан на рисунке 8.

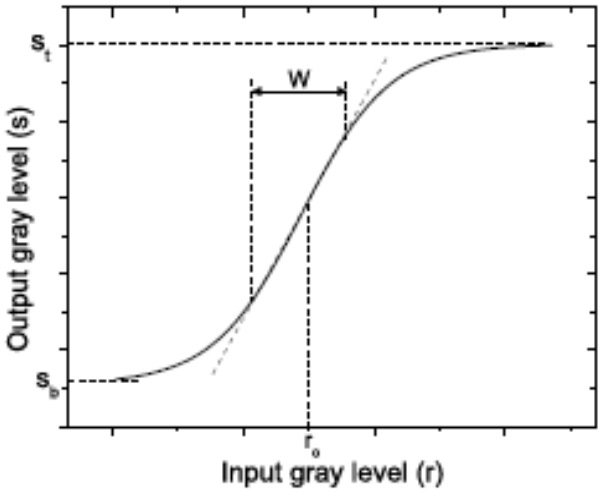

Рис. 8. Сигмоидальная функция, описывающая выходное значение уровня серого ЖК-ПВМС

Фазовая модуляция

Так как приложение напряжения меняет показатель преломления в ячейке ЖК-ПВМС со значения n_o до значения n_e, фаза необыкновенной волны, распространяющейся по ячейке, значительно изменяется с изменением угла поворота молекул от 0° до 90° (показатель преломления обыкновенной волны при этом остается неизменным вне зависимости от угла поворота).

Для измерения фазовой модуляции может быть применен метод цифрового сдвигового интерферометра (рис.9). Оси поляризатора при этом параллельны молекулярному директору входной грани ЖК-ПВМС, чтобы обеспечить распространение только необыкновенной волны.

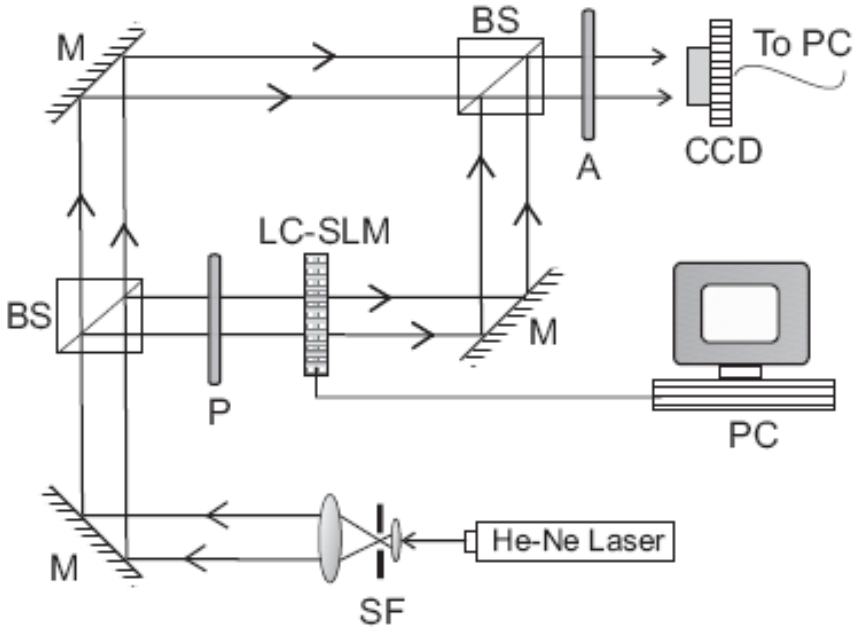

Рис. 9. Интерферометр Маха-Зендера для измерения фазовой задержки ЖК-ПВМС: SF – пространственный фильтр; M – зеркала; BS – разделители пучка; P – поляризатор; A – анализатор; CCD – ПЗС-матрица

При различных входных уровнях серого на ПЗС регистрировалась выходная интерференционная картина. Фазовая задержка между двумя ветвями интерферометра Маха-Зендера может быть посчитана по формуле

$$\delta = \frac{\Delta}{\Lambda} \ (\mathrm{rad}), \tag{9}$$

где Δ – величина сдвига интерференционной полосы, полученного при сравнении двух последовательных профилей интерферограммы, Λ – период полос, фиксируемые на выходе интерферометра (как видно на рисунке 10), после чего рассчитывается (9).

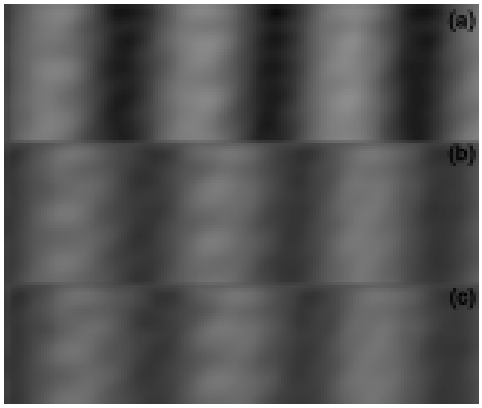

Рис.10. Интерференционная картина, зарегистрированная при уровнях серого 0 (a), 100 (b) и 250 (c)

Однако, следует отметить, что фазовая задержка при выключенном ON-состоянии оказывается гораздо меньше, чем β_{max}, полученная в выключенном OFF-состоянии. Частично это объясняется влиянием электроники, отвечающей за управление ЖК-ПВМС, а также тем фактом, что угол поворота Θ не линеен на всей глубине ячейки (ввиду граничных эффектов). Поэтому такие модуляторы лучше использовать в устройствах, требующих модуляции по интенсивности, а не по фазе. При этом не следует полностью пренебрегать сопровождающимися эффектами фазовой модуляции, даже если они не значительны.

1.3 Экспериментальные исследования амплитудных модуляционных характеристик

На рисунке 11 представлен общий вид лабораторного стенда для проведения эксперимента. На рисунках 12, 13, 14 представлены отдельные элементы стенда: расширитель лазерного пучка (рис. 12); объектив, ЖК-ПВМС на рейтере; плата управления ЖК-ПВМС (рис. 13); анализатор излучения – поляризационная пластина из комплекта ЖК-ПВМС, установленная на вращающемся перемещателе фирмы Standa для изменения угла между осью входной поляризации и выходного анализируемого направления (рис. 14).

Пучок лазерного излучения с линейной поляризацией, совпадающей с вертикалью схемы, освещающий ЖК-ПВМС, расширяется до размеров ПВМС и коллимируется с помощью телескопической системы (рис. 12). ПВМС закреплён на вращающемся столике, служащем для изменения угла между плоскостью поляризации входного излучения и направлением директора на передней поверхности слоя ЖК (рис. 13).

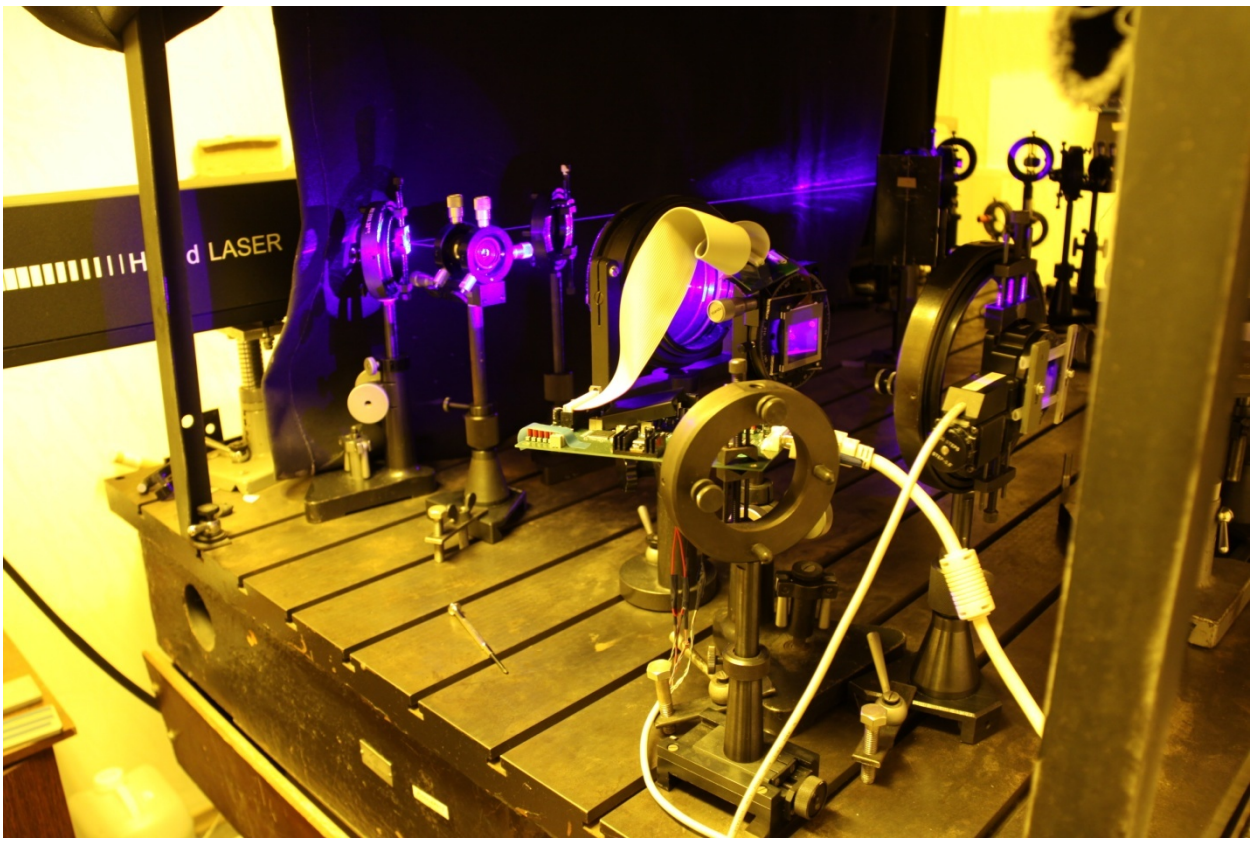

Рис. 11. Общий вид лабораторного стенда

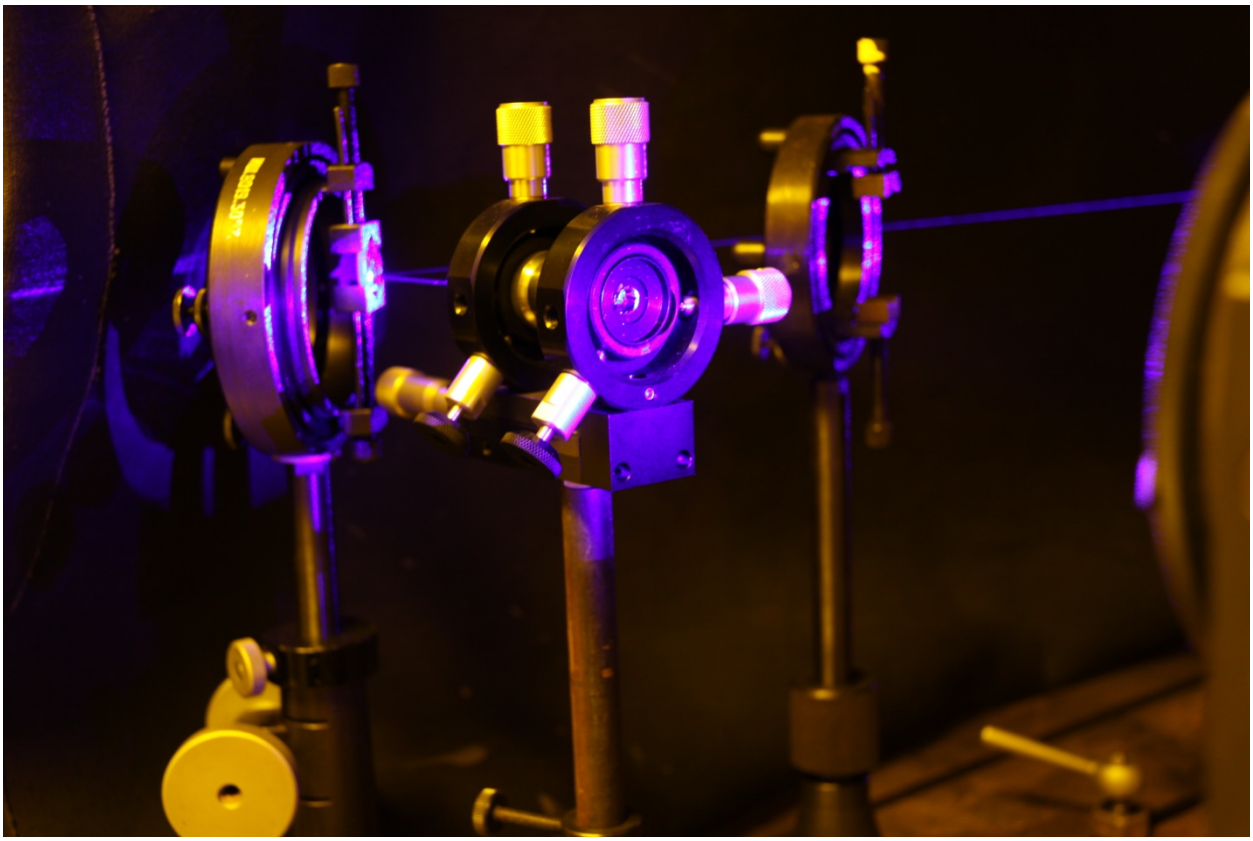

Рис. 12. Расширитель лазерного пучка

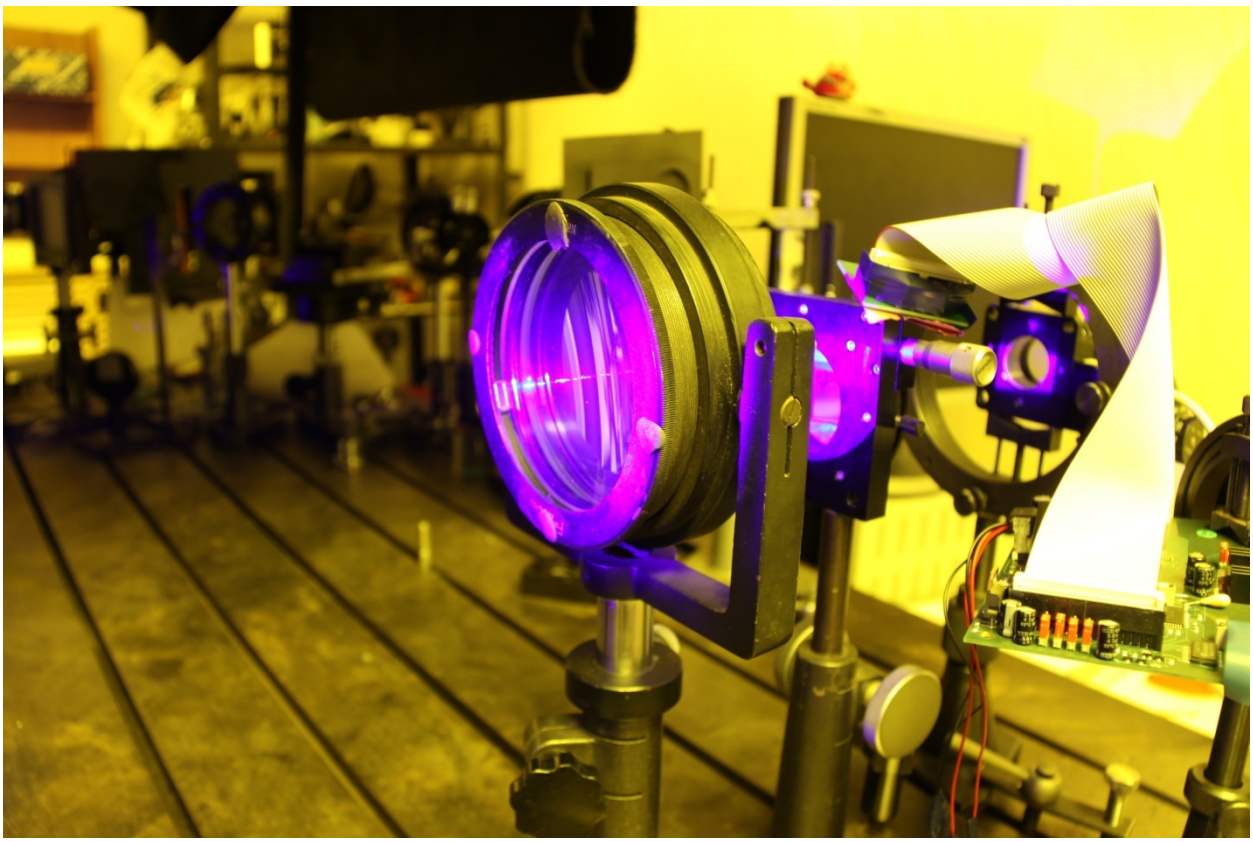

Рис. 13. Плата управления ЖК-ПВМС

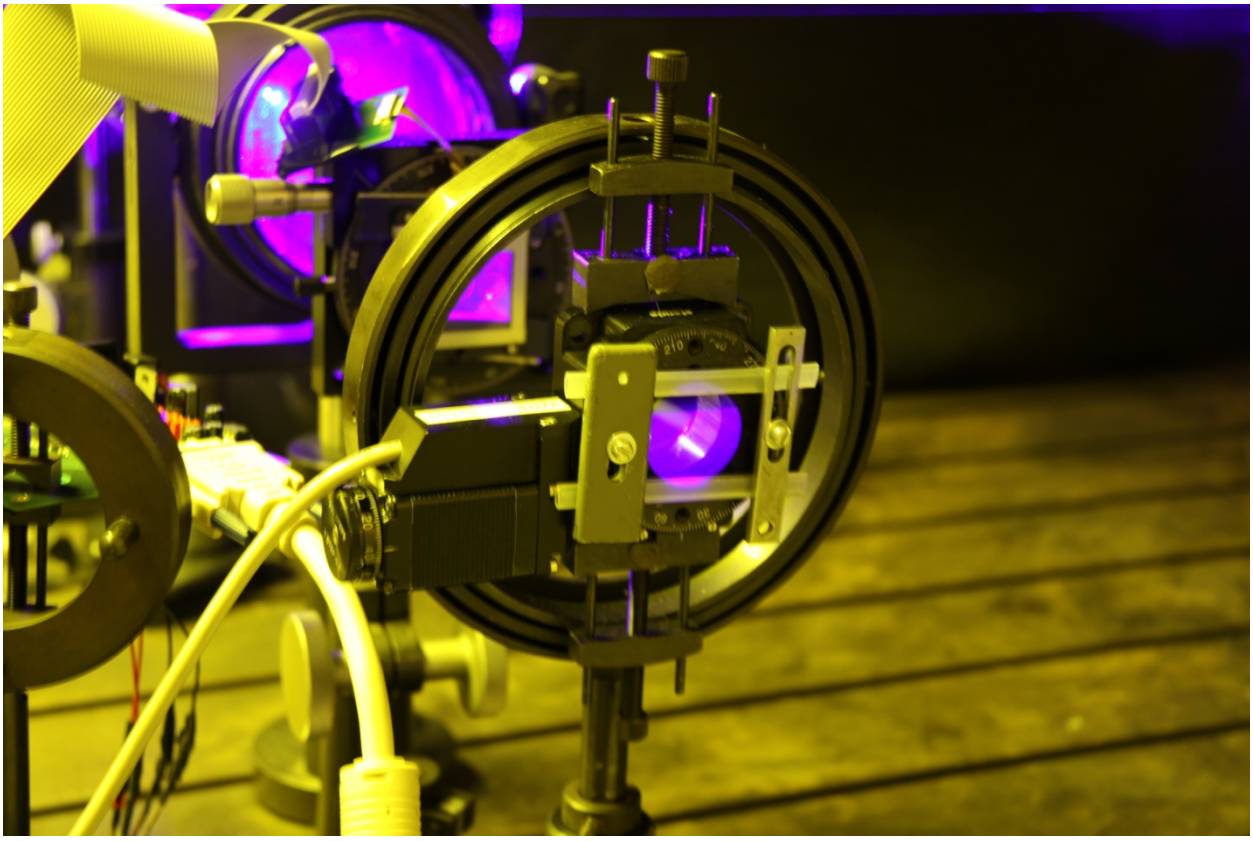

Рис. 14. Анализатор излучения

Анализатором является дихроичная плёнка, наклеенная на стеклянную подложку. Анализатор закреплён на моторизованном вращающемся столике, позволяющем производить изменение угла плоскости выходной поляризации θ_2 (рис.14). Излучение, прошедшее через анализатор, фокусируется объективом на термопарный приёмник измерителя мощности лазерного излучения фирмы «Ophir».

Для определения направления ψ входного директора ЖК (который должен быть порядка 45 °) модулятор был исследован в выключенном состоянии. На рисунке 15 приведён график изменения мощности излучения, вышедшего после анализатора, при вращении ЖК-ПВМС в интервале 0 ° - 360 °.

Из графика видно, что минимум пропускания наблюдался при 4 значениях угла поворота ПВМС: 20 °, 110 °, 200 °, 290 ° (110 °=90 °+20 °; 200 °=2x90 °+20 °; 290 °=3x90 °+20 °). Точки минимумов при повороте свыше 180 ° могут не рассматриваться, так как являются симметричными первым двум.

Рис. 15. Пропущенная мощность излучения при угле между поляризатором и анализатором равном 0° в зависимости от угла поворота ЖК-ПВМС

Одно из двух положений 20 ° и 110 ° является искомым, в котором плоскость поляризации входного излучения совпадает с направлением директора на первой поверхности модулятора. Другое положение соответствует состоянию, когда направление входной поляризации перпендикулярно директору на входной

плоскости, что также в выключенном состоянии ячейки ЖК будет давать минимум пропускания. Это объясняется тем, что при твист-эффекте в выключенном состоянии в ячейке ЖК происходит поворот эллипса поляризации входного излучения на угол поворота директора α [8], а т.к. α≈90 °, то линейная поляризация на выходе модулятора будет перпендикулярна плоскости поляризации анализатора. С точки зрения использования ПВМС в качестве амплитудного модулятора оба этих положения равносильны, но в случае использования фазовой или гибридной модуляции необходимо установить точное положение входного директора, так как именно в нём модулятор будет производить максимальную модуляцию фазовой задержки, равную

$$\beta=2\pi/\lambda(n_e(GL)-n_o). \qquad (10)$$

Значение фазовой задержки будет меняться вследствие изменения показателя преломления для необыкновенной волны n_e (см. выражение (10)), зависящего от напряжения на электродах ячейки, а значит и от уровня серого (GL=gray level) в изображении на модуляторе.

При этом было учтено, что пропускание ЖК-ПВМС максимально при выключенном состоянии, поэтому для максимальной засветки в схеме голографической памяти можно просто отключать модулятор, а не выводить на него изображение белого цвета. Кроме того, белый цвет, соответствующий уровню серого 255, не обязательно даёт максимальное пропускание системы при заданном наборе параметров и углов поворота элементов схемы.

Таким образом, за направление директора ψ на входной поверхности модулятора можно принять либо угол в 20 °, либо 110 °, что существенно отличается от 45 °. Для проверки результатов эксперимента было решено провести дополнительное исследование работы ЖК-ПВМС во включенном состоянии, когда тот повёрнут на угол ψ, рекомендованный производителем ЖК-модулятора (ψ≈45 °).

Величину поворота молекулярного директора ЖК (α≈90 °) при выключенном состоянии ПВМС можно не искать, т.к. при подаче разных величин напряжения на электроды ячейки α все равно изменится.

Далее ЖК-ПВМС исследовался во включённом состоянии, то есть его коэффициент пропускания рассчитывался с учётом угла поворота директора α, напрямую зависящего от напряжения на электродах ЖК-ячейки. Показания измерителя мощности снимались при всем доступном интервале напряжений. Уровень напряжения на ЖК-ячейке выражен уровнем серого (GL) в изображении, передаваемом на модулятор, от GL=0 до GL=255. При этом в изображении будет задаваться однородный фон, т.е. страница будет полностью заполнена пикселями одного цвета.

Глубина модуляции рассчитывается по формуле

$$[T(GL = 255) - T(GL = 0)] \times 100\% \ , \qquad (11)$$

где T(GL=x) – измеренный уровень мощности излучения при выведенном на ЖК цвете x. С практической точки зрения, конфигурация, дающая максимальную глубину модуляции (11), наиболее предпочтительна [7].

В результате этого опыта были получены результаты, представленные в виде графика на рисунке16.

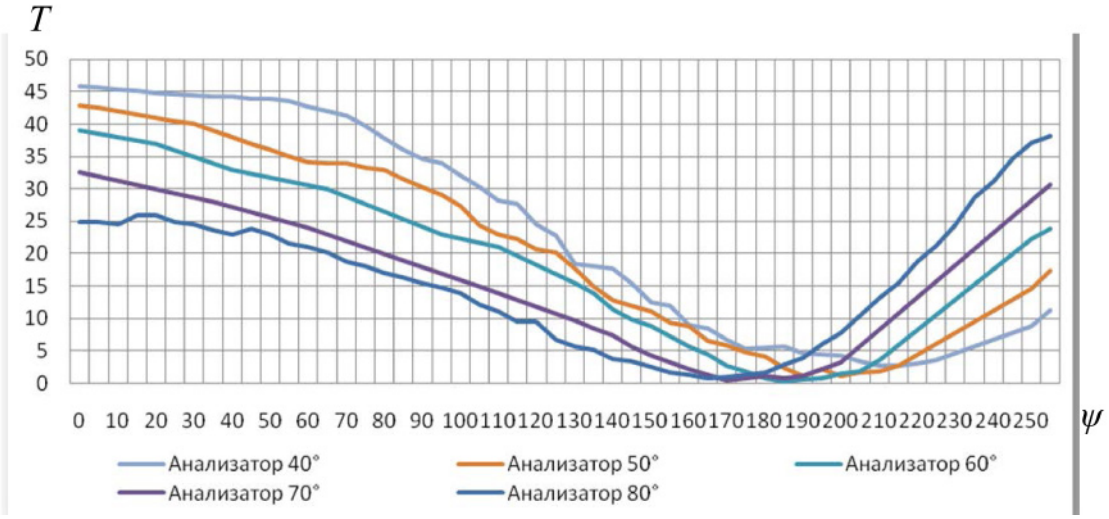

Рис. 16. Амплитудное пропускание ЖК-ПВМС при различных уровнях серого в изображении (горизонтальная ось) и углах поворота анализатора относительно лабораторной вертикали (пять кривых разного цвета)

Из графика видно, что наивысший контраст, рассчитываемый по формуле

(«1»-«0»)/(«1»+«0»),

дает кривая, соответствующая углу поворота анализатора на 60 °. Значение контраста между «1» (GL=0) и «0» (GL=185) в таком случае равно 0.984.

Аналогичные эксперименты, проведенные для положения ЖК под углом 110 ^{0}, показали наилучший контраст, равный 0,967, при угле поворота анализатора 70 ^{0}.

Затем был проведён эксперимент при положении элементов блока модуляции согласно рекомендациям производителя, т.е. в предположении, что входной директор ЖК направлен под углом 45 ° к вертикальной оси ЖК-модулятора. Пропускание модулятора в этом случае оказалось практически таким же, как и в предыдущем опыте. То есть такую конфигурацию тоже можно использовать для модуляции по интенсивности, при которой в целом не имеет значение, в каком положении установлена входная ось поляризации, главное – правильно установить выходной анализатор, чтобы пропустить максимум возможной энергии. Однако, для распространения исключительно необыкновенной волны в транспаранте необходимо согласовать молекулярный директор с направлением входной поляризации. Особенно это важно в случае использования фазовой модуляции. Поэтому результаты первых опытов, дающих информацию о положении директора ЖК-модулятора, чрезвычайно важны.

Выберем конкретную конфигурацию взаимного расположения поляризатора, ЖК-ПВМС и анализатора, а также уровни серого, которые будут задавать информационные единицу «1» и ноль «0» так, чтобы получался максимально достижимый контраст между ними.

За базовую конфигурацию примем результаты первого опыта: угол между входным директором ЖК и направлением поляризации 20 °, угол поворота анализатора относительно направления входной поляризации 60 °.

Для этого в качестве «1» выберем уровень яркости 0, (в эксперименте пропускаемая мощность нулевой яркости оказывается равной 39 мкВт), а в качестве «0» уровень яркости 185 (соответствующий в эксперименте мощности 0,3 мкВт). Тогда:

Максимальное отношение	"1"/"0"	130
Максимальная разница	"1"-"0"	38,7
Максимальный контраст	("1"-"0")/("1"+"0")	0,98

Таким образом, оптимальная конфигурация характеризуется следующими параметрами

Угол Анализатор – ЖК	20°
Угол Анализатор - Поляризатор	60°
«1»	Яркость 0
«0»	Яркость 185
Контраст	0,984

1.4 Экспериментальные исследования фазовой модуляционной характеристики

На рисунке 17 представлена фотография общего вида лабораторного стенда по исследованию фазовой модуляционной характеристики ЖК-ПВМС.

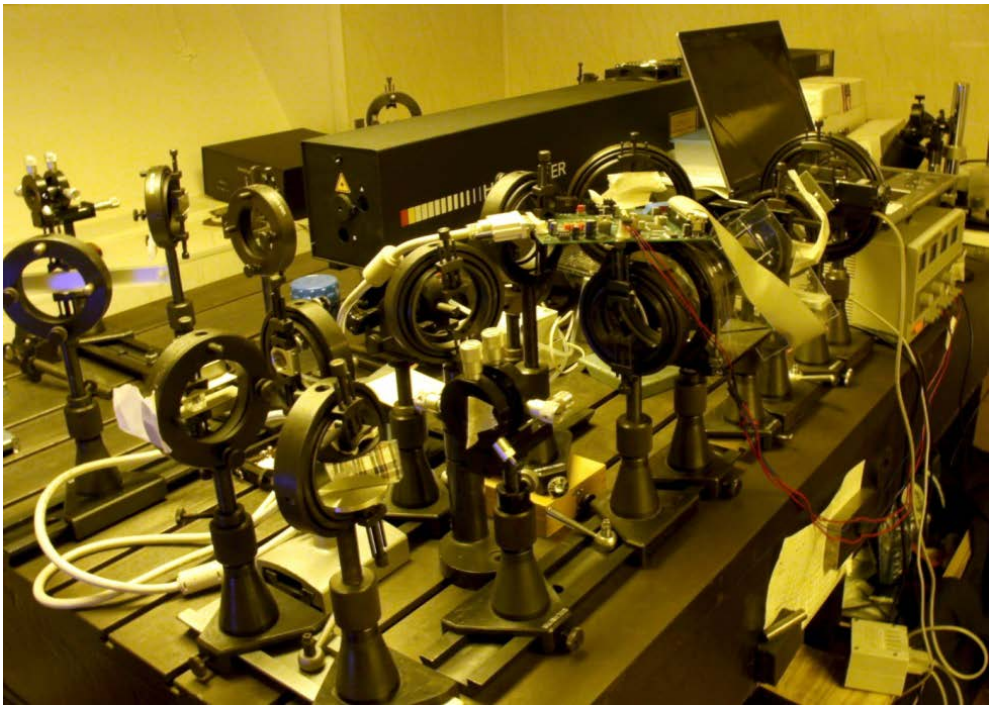

Рис. 17. Лабораторный стенд по исследованию фазовой модуляционной характеристики ЖК-ПВМС

Оптическая схема для экспериментального исследования фазовой модуляционной характеристики была построена на базе интерферометра Маха-Зендера. В схеме использовалось излучение He-Cd лазера с длиной волны 441,6 нм. Узкий пучок на выходе лазера разделялся на два при помощи светоделительного кубика, затем в обеих ветвях пучки расширялись при помощи телескопических систем, состоящих из микрообъектива, диафрагмы типа pin-hole и коллимирующего объектива. В ветви сравнения пучок проходил без изменения до плоскости МПИ, тогда как в объектную ветвь вводился калибруемый ЖК-ПВМС. Перед регистрацией на МПИ две ветви снова объединялись в одну светоделительным кубиком большего диаметра. [9]

В результате в объединенном пучке формировалась интерференционная картина, несущая информацию о фазовой модуляционной характеристике ЖК-ПВМС. Далее в схеме был установлен анализатор, а после него МПИ (ПЗС-камера), в регистрирующей плоскости которого формируется двумерное распределение интенсивности излучения в виде интерференционных полос.

На рисунках 18 и 19 представлены фотографии ЖК-ПВМС, установленного на ручном вращающемся столике, и анализатора, закрепленного на моторизованном вращающемся столике.

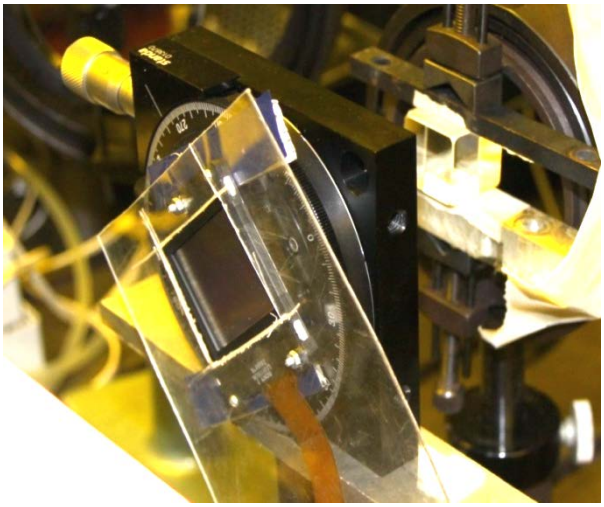

Рис. 18. ЖК-ПВМС фирмы HoloEye, закрепленный на вращающем устройстве для изменения угла между направлением директора на входной плоскости и плоскостью поляризации лазерного излучения

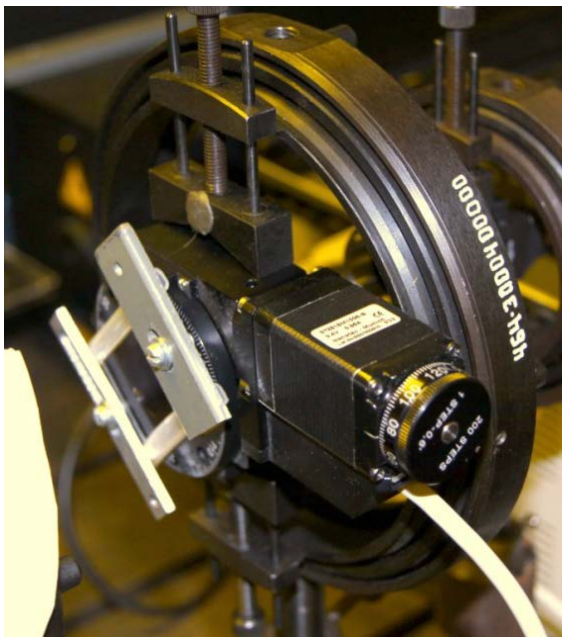

Рис. 19. Поляризационный анализатор, закреплённый на моторизованном вращающемся столике

Электронный блок модулятора подключён к персональному компьютеру, который передаёт на него требуемое изображение, состоящее из двух широких полос с разным оттенком серого для исследования фазовой модуляционной характеристики. Для удобства текущий (изменяемый или исследуемый) цвет выводился только на одну половину поля модулятора. На другую половину поля модулятора был выведён цвет, принятый как опорный, т.е. для которого фазовая задержка считалась равной нулю.

На рисунке 20 представлена характерная интерференционная картина, регистрировавшаяся в эксперименте. Посередине фотографии чётко видна горизонтальная граница между двумя интерференционными картинами, сдвинутыми друг относительно друга.

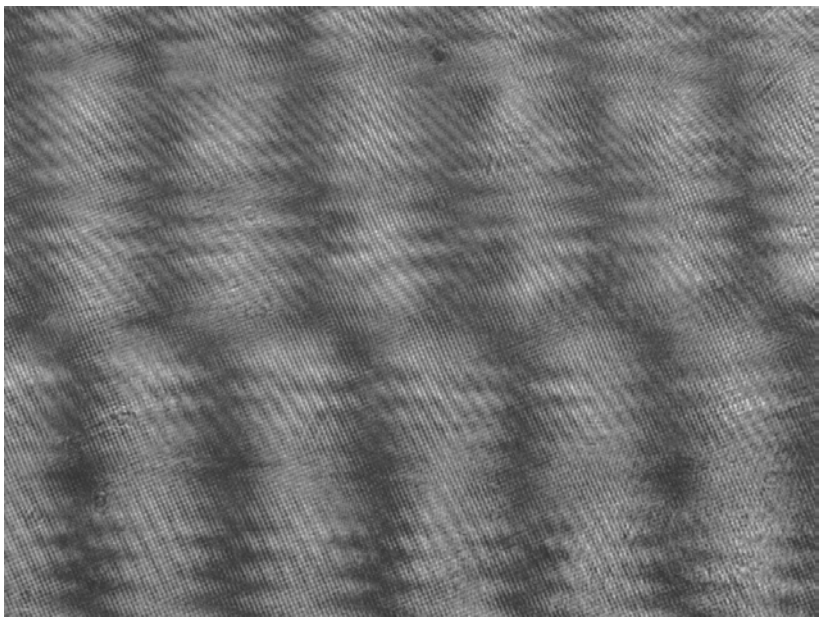

Рис. 20. Интерференционная картина в плоскости регистрации ПЗС-камеры для схемы ЖК-ПВМС с углом между анализатором и поляризатором 60° и уровнем серого GL=165

Между интерференционными картинами от двух разделённых пучков, один из которых проходит через верхнюю половину поля ПВМС, а другой через нижнюю, образуется некий сдвиг (9). Он превышает половину ширины интерференционной полосы, что соответствует фазовому сдвигу больше π. Этот сдвиг, выраженный в относительных долях ширины полосы интерференционной картины, впоследствии измерялся для нахождения фазовой модуляционной характеристики [10].

Эксперимент по исследованию фазовой модуляции проводился для тех наборов параметров схемы, которые были изучены во время эксперимента по амплитудной модуляции, так как для реализации гибридного кодирования нужно знать обе эти характеристики.

Наиболее важным будет провести измерения тех конфигураций, которые дали максимальный контраст по амплитудному пропусканию. В первую очередь была измерена фазовая модуляционная характеристика для набора параметров, выявленных в ходе первого опыта, то есть с заданным углом между входным

директором ЖК и поляризатором 20° и углом между анализатором и поляризатором равным 60°. При этом одна половина экрана сохраняла свой цвет в течение всего эксперимента, это опорный цвет, относительно которого будет измеряться фазовая задержка. В данном эксперименте за опорный цвет верхней половины экрана был выбран черный.

В результате эксперимента весь набор полученных изображений интерференционных картин, аналогичных рисунку 20, был в дальнейшем обработан в среде Matlab. В результате были получены профили, соответствующие распределению интенсивности в интерференционных полосах, в которых нивелированы шумы регистрации (рис. 21).

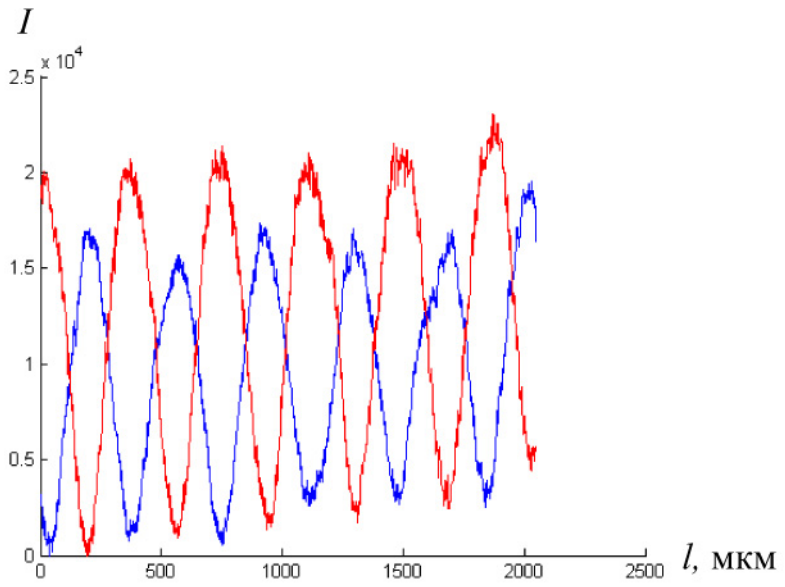

Рис. 21. Профили интерференционных картин:
линия синего цвета – профиль верхней (неизменяемой) части; красного цвета – профиль нижней (изменяемой) части изображения

Также была произведена дополнительная фильтрация значений в полученных векторах-строках на основе удаления высоких частот из их фурье-образов. [10] Пример профиля распределения интенсивности излучения в интерференционной картине, полученной в результате такой фильтрации, представлен на рисунке 22.

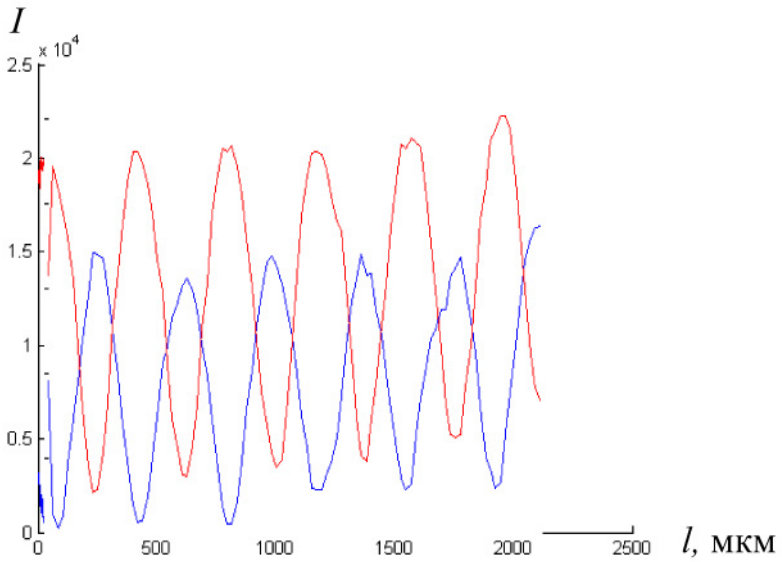

Рис. 22. Сглаженные кривые распределения интенсивности излучения в интерференционных картинах, полученные при низкочастотной фильтрации

После нахождения локальных максимумов синих и красных линий, соответствующие друг другу, выводятся их индексы (координаты по оси абсцисс), а разница эти индексов, получаемая вычитанием индекса синей кривой из индекса красной, даёт смещение по фазе между двумя линиями, а, следовательно, и между двумя интерференционными картинами. Если учесть, что ширина полосы между локальными максимумами по оси абсцисс соответствует полному кругу фаз, то можно посчитать, какая фазовая задержка была в каждом случае для конкретного уровня серого, используя формулу 9. Полученный график зависимости фазовой задержки от уровня серого представлен на рисунке 23 (за ноль фазовой задержки принят уровень серого GL=0).

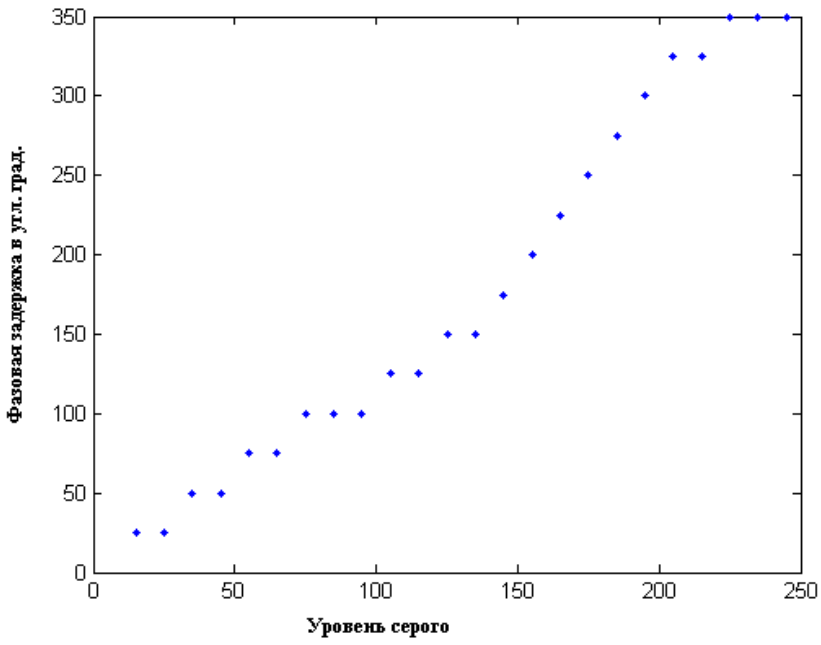

Рис. 23. Фазовая модуляционная характеристика исследуемого ЖК-ПВМС

Видно, что ПВМС позволяет осуществить модуляцию фазы проходящего излучения от 0 до 360 °.

2 Рекомендации по выбору оптимальных параметров схемы ЖК-ПВМС для реализации гибридного кодирования бинарной информации

На рисунке 24 одновременно приведены графики амплитудной и фазовой модуляционных характеристик, из которого легко определить три точки, оптимальные для реализации гибридной модуляции.

Для формирования нулей в схеме гибридной модуляции [4] следует задать уровень серого 185 с минимальным амплитудным пропусканием, а для формирования единиц надо выбрать два уровня, дающих одинаковое, достаточно высокое пропускание, но отличающихся примерно на π радиан по фазовому сдвигу. Это могут быть уровни серого GL=135 и GL=225, сдвиг фаз между которыми равен 180 °, а амплитудное пропускание для обоих равно 33 %.

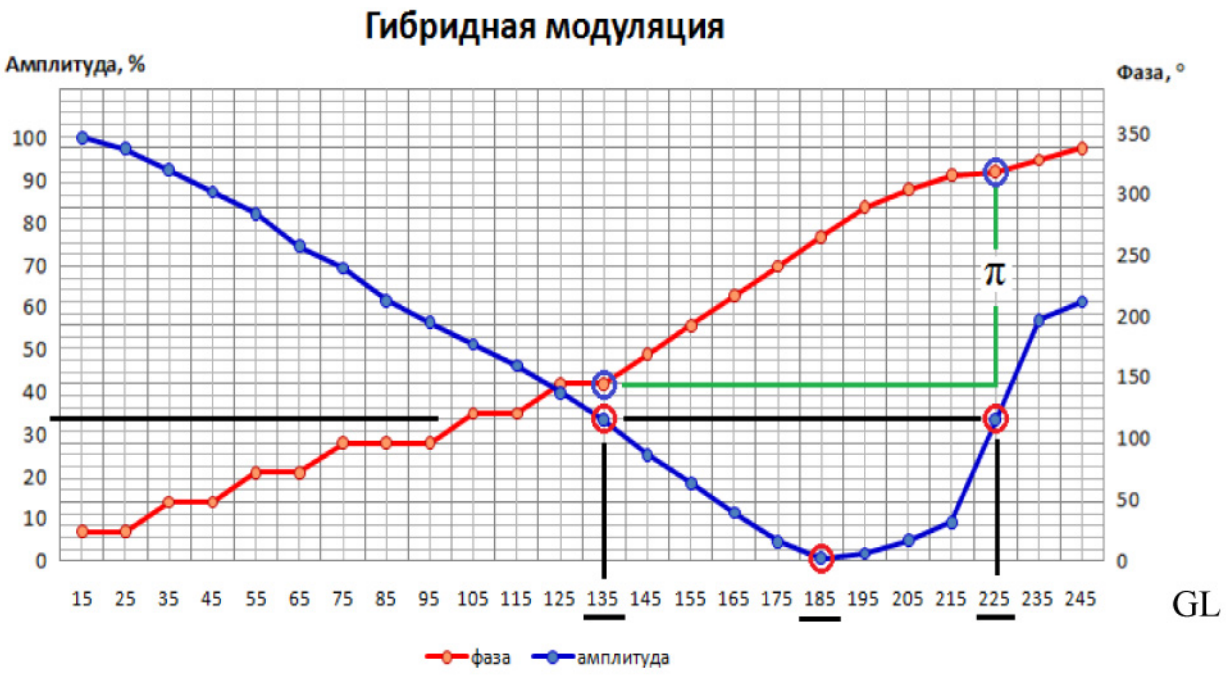

Рис. 24. Обобщённый график модуляционных характеристик ЖК-ПВМС

Итоговая схема ЖК-ПВМС должна иметь следующие параметры:

ЖК	А	«0»	«1 (а)»	«1 (б)»
20°	60°	185	135	225

Отдельный интерес представляет собой эксперимент по исследованию модуляционных характеристик для параллельного положения анализатора и ЖК-панели, что значительно более выгодно с точки зрения компактности схемы записи, а значит, и с точки зрения емкости голографического носителя. Ведь при таком взаимном положении этих двух элементов они будут занимать меньше места в пространстве, а значит, можно будет уместить большее количество каналов записи для мультиплексирования голограмм. Вместе с ростом числа каналов мультиплексирования растёт и ёмкость носителя.

Тогда угол поворота ЖК-панели и анализатора задаёт угол выходной поляризации, при этом входная поляризация может быть повёрнута произвольно.

Именно за счёт этого угла поворота можно найти наиболее оптимальное положение, и именно этот угол будет меняться в ходе следующего эксперимента.

Чтобы выбрать точки гибридной модуляции, необходимо вначале исследовать прохождение сигнала по амплитудной составляющей, который показал, что вне зависимости от выбранного угла поворота элементов относительно входной поляризации, график амплитудного пропускания будет одинаковым, а наибольшее пропускание наблюдается в интервале маленьких углов (производителем также советуется устанавливать элементы ЖК-модулятора параллельно плоскости поляризации излучения).

Затем были получены фазовые модуляционные характеристики ЖК-ПВМС при совместном повороте модулятора и анализатора. Было показано, что кривые фазовой модуляции также как кривые амплитудной модуляции не сильно меняются при разных углах. Таким образом, достаточно выбрать одну пару кривых, чтобы определить точки гибридной модуляции для этого случая (рис. 25).

GL

Рис. 25. Обобщенный график модуляционных характеристик для схемы параллельных модулятора и анализатора

Из графика (рис. 25) видно, что для получения максимального контраста, равного 47 %, возможно задать только одну точку высокого пропускания на уровне GL=220, а для гибридной модуляции нужно две таких точки (кружком отмечены «1» и «0»).

Если же выбрать две точки на одном уровне амплитуды пропускания (отмечены одинарными прямоугольниками), то разница фаз между двумя «1» составит как раз 180 °, то есть π радиан (см. точки на фазовой кривой, обозначенные двойными прямоугольниками). Однако контраст между «1» и «0» будет тогда равен всего 17 %.

Распознать единицы и нули в восстановленном с голограммы изображении с таким контрастом будет очень сложно. Поэтому от этой схемы надо отказаться, хотя она и дает некоторое преимущество по плотности записи, так как является более компактной. Следовательно, такая схема непригодна для системы голографической памяти, так как добиться идеального состояния для гибридной модуляции сложнее, чем при раздельном вращении поляризатора и анализатора (рис. 24).

Из результатов, полученных в ходе проведенных экспериментов, можно сделать вывод, что в системе голографической памяти необходимо применить схему с разделенными модулятором и анализатором излучения, параметрами настройки ЖК-модулятора которой уточнены экспериментальным путем. Именно в такой схеме можно получить идеальную гибридную модуляцию страниц данных (рис. 24).

Научная новизна работы

Впервые доказана возможность реализации гибридного кодирования с помощью стандартной ЖК-панели на базе исследования ее модуляционных характеристик, в результате чего были выявлены оптимальные параметры схемы, отличные от параметров производителя, но удовлетворяющие требованиям системы оптико-голографической памяти.

Впервые исследован ЖК-ПВМС марки HoloEye HEO-0017 и описаны его модуляционные характеристики.

Разработана схема экспериментальной установки на базе интерферометра Маха-Зендера, позволяющая регистрировать интерференционную картину на ПЗС при исследовании фазовой модуляции.

Разработана новая методика обработки экспериментальных данных с целью получения точной амплитудной и фазовой модуляционных характеристик, анализ которых позволил определить параметры схемы (углы между элементами блока модуляции и уровни напряжения на электродах ЖК-ячейки), обеспечивающие высокий контраст и помехозащищенность, а следовательно, и идеальное качество микроголограмм и оптико-голографической системы памяти в целом.

Заключение

Проанализированы особенности работы важного компонента системы оптико-голографической памяти – ЖК-ПВМС. Коммерческие ЖК-ПВМС в основном предназначены лишь для систем отображения информации, их использование в системах голографической памяти сдерживается рядом факторов, таких как: ограниченная глубина модуляции, низкий контраст, перекрестные шумы, поэтому для улучшения качества оптико-голографической памяти необходимо оптимизировать параметры ЖК-ПВМС.

В работе рассмотрен интерференционный метод исследования фазовой и амплитудной модуляции ЖК-ПВМС, позволяющий экспериментально определить характеристики конкретной ЖК-панели и основные взаимозависимости различных параметров схемы на модуляционные характеристики. Для проведения эксперимента была выбрана схема интерферометра Маха-Зендера, позволяющая регистрировать интерференционную картину на ПЗС при исследовании фазовой модуляции. При этом одна включенная ветвь интерферометра (объектная) дает схему исследования амплитудной модуляционной характеристики. Была разработана новая методика обработки экспериментальных данных с целью получения точной амплитудной и фазовой модуляционных характеристик.

Приведены экспериментальные исследования ЖК-панели марки HoloEye HEO-0017. На основе полученных модуляционных характеристик были даны

рекомендации по выбору оптимальных параметров схемы ЖК-ПВМС для реализации гибридного кодирования.

Таким образом, в процессе проведения исследований разработана методика определения МПФ ЖК-ПВМС и получены характеристики конкретной ЖК-панели, что позволяет найти наиболее оптимальный набор параметров, который будет соответствовать требованиям гибридного кодирования информации в системах голографической памяти. При этом ПВМС будет «сдвинут» в рабочую точку при соответствующем уровне напряжения на электродах ЖК-панели, положении поляризатора, анализатора, уровне яркости и контраста, что позволит получить высокое качество архивной голографической памяти.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, в рамках государственного контракта от 28.04.2011 № 16.513.12.3006 ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы".

Список литературы

1. Лушников Д.С., Маркин В.В., Одиноков С.Б. и др. Устройство записи мультиплексных голограмм в системе оптико-голографической памяти: пат. 80968 РФ. 2009. Бюл. № 6.
2. Одиноков С.Б., Вереникина Н.М., Маркин В.В., Лушников Д.С., Усович Е.А., Гончаров А.С., Кузнецов А.С., Павлов А.Ю., Николаев А.И., Андреева О.В. Разработка и исследование метода и оптической системы получения мультиплексных голограмм в системах архивной оптико-голографической памяти // Оптический журнал. 2009. Т. 76, №7. С. 3-9.
3. Кузнецов А.С., Одиноков С.Б., Вереникина Н.М., Маркин В.В., Лушников Д.С., Павлов А.Ю., Ковалев М.С., Соломашенко А.Б. Оптическая система для записи мультиплексных микроголограмм на фоточувствительный материал в системе голографической памяти // Естественные и технические науки. 2011. № 4. С. 405-406.

4. Renu John, Joby Joseph, Kehar Singh. Content-addressable holographic digital data storage based on hybrid ternary modulation with a twisted-nematic liquid-crystal spatial light modulator // Optical review. 2005. Vol. 12, no. 3. P. 155–160. DOI: 10.1007/s10043-005-0155-2
5. http://www.kompstat.ru/view_sostav.php?id=7
6. Жидкокристаллический дисплей. Википедия. Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/LCD (дата обращения 21.09.2012).
7. Banyal R.K. Data Storage and Retrieval using Photorefractive Crystals (Holographic Memories) : A Thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy. Indian Institute of Astrophysics. Bangalore, 560034, INDIA. 2005.
8. Yang, D.-K., Wu. S.-T. Fundamentals of Liquid Crystal Devices. John Wiley & Sons, 2006. 387 p.
9. Fernández E., Ortuño M., Gallego S., García C., Márquez A., Beléndez A., Pascual I. Multiplexing holograms for data page storage using a LCD as a hybrid ternary modulation // Proc. of SPIE. 2009. Vol. 7358. P. 73581C-1. DOI: 10.1117/12.820622
10. Martin-Badosay E., Carnicer A., Juvells I. and Vallmitjana S. Complex modulation characterization of liquid crystal devices by interferometric data correlation // Measurement Science and Technology. 1997. Vol. 8, no. 7. P. 764–772. doi:10.1088/0957-0233/8/7/011

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU

SCIENCE and EDUCATION

EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

Realization of hybrid method of modulation in liquid crystal light modulator for optical holographic memory

09, September 2012

DOI: 10.7463/0912.0455904

Odinokov S.B., Verenikina N.M., Lushnikov D.S., Markin V.V., Betin A.Yu.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

odinokov@bmstu.ru

1.verenikina@bmstu.ru

dmlu41@yandex.ru

hololab@rl2.bmstu.ru

The article considers problems of increasing density of information stored on optical-holographic discs and playback of data bits using a hybrid method of data page modulation. The authors carry out a theoretical and experimental analysis of liquid crystal display (LCD) panels used as space-time light modulators (STLM).

Publications with keywords: optical-holographic memory, liquid-crystal modulator of light, modulation characteristic, hybrid method of encryption

Publications with words: optical-holographic memory, liquid-crystal modulator of light, modulation characteristic, hybrid method of encryption

References

1. Lushnikov D.S., Markin V.V., Odinokov S.B., et al. *Ustroistvo zapisi mul'tipleksnykh gologramm v sisteme optiko-golograficheskoi pamiati* [Device of recording of multiplexed hologram in the system of optical holographic memory]. Patent RF no. 80968, 2009.

2. Odinokov S.B., Verenikina N.M., Markin V.V., Lushnikov D.S., Usovich E.A., Goncharov A.S., Kuznetsov A.S., Pavlov A.Iu., Nikolaev A.I., Andreeva O.V. Razrabotka i issledovanie metoda i opticheskoi sistemy polucheniia mul'tipleksnykh gologramm v sistemakh arkhivnoi optiko-golograficheskoi pamiati [Development and investigation of the method and the optical

system for obtaining multiplex holograms in systems of archival optical-holographic memory]. *Opticheskii zhurnal* [Optical journal], 2009, vol. 76, no. 7, pp. 3-9.

3. Kuznetsov A.S., Odinokov S.B., Verenikina N.M., Markin V.V., Lushnikov D.S., Pavlov A.Iu., Kovalev M.S., Solomashenko A.B. Opticheskaia sistema dlia zapisi mul'tipleksnykh mikrogologramm na fotochuvstvitel'nyi material v sisteme golograficheskoi pamiati [Optical system for recording a multiplex microholograms at the photo-sensitive material in the system of holographic memory]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and Technical Sciences], 2011, no. 4, pp. 405-406.

4. John R., Joseph J., Singh K. Content-addressable holographic digital data storage based on hybrid ternary modulation with a twisted-nematic liquid-crystal spatial light modulator. *Optical review*, 2005, vol. 12, no. 3, pp. 155–160. DOI: 10.1007/s10043-005-0155-2

5. *Zhidkokristallicheskii displei. Vikipediia* [Liquid crystal display. Wikipedia]. Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/LCD , accessed 21.09.2012.

6. Banyal R.K. *Data Storage and Retrieval using Photorefractive Crystals (Holographic Memories). A Thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy*. Indian Institute of Astrophysics. Bangalore, 560034, INDIA. 2005.

7. Yang, D.-K., Wu. S.-T. *Fundamentals of Liquid Crystal Devices*. John Wiley & Sons, 2006. 387 p.

8. Fernández E., Ortuño M., Gallego S., García C., Márquez A., Beléndez A., Pascual I. Multiplexing holograms for data page storage using a LCD as a hybrid ternary modulation. *Proc. of SPIE*, 2009, vol. 7358, pp. 73581C-1. DOI: 10.1117/12.820622

9. Martin-Badosay E., Carnicer A., Juvells I. and Vallmitjana S. Complex modulation characterization of liquid crystal devices by interferometric data correlation. *Measurement Science and Technology*, 1997, vol. 8, no. 7, pp. 764–772. doi:10.1088/0957-0233/8/7/011