

## ЭФФЕКТ ПЕРЕФОКУСИРОВКИ: МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИЧЕСКИХ СХЕМАХ С ФАЗОВЫМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ МОДУЛЯТОРОМ СВЕТА

Ю.Д. Думаревский, Н.Ф. Ковтонюк, И.Н. Компанец, А.В. Парфенов, Г.А. Петровичева, А.И. Савин

УДК 532.783

*Проанализированы особенности формирования изображения в оптической схеме с пространственным фазовым модулятором света. Хорошее согласие с экспериментом дает модель, исходящая из наличия на границе деформированной и недеформированной областей жидкого кристалла пары линз, одна из которых отрицательна, а другая положительна.*

Ранее было обнаружено [1], что в оптической схеме с фазовым жидкокристаллическим пространственным модулятором света (ПМС) можно наблюдать два резких преобразованных ПМС изображения при неизменном расположении отображающего объекта. Одно из них является негативным, а другое — при ортогональном положении анализатора — позитивным. Оба изображения расположены на оптической оси по разные стороны от плоскости геометрического изображения и перемещаются при изменении яркости регистрируемого изображения и напряжения на ПМС, т.е. наблюдается перефокусировка оптической схемы.

Рассмотрим прохождение плоской световой волны через слой жидкого кристалла (ЖК) в ПМС. Предположим, что в какой-либо области ЖК существует квазиступенчатое изменение показателя преломления. Ширина переходной области  $\Delta x$  определяется наибольшей из двух величин: минимальным разрешаемым ПМС элементом или минимальным элементом в регистрируемом изображении.

На кривой переходной характеристики  $\Delta\varphi(x)$  (зависимости относительного сдвига фазы от пространственной координаты в плоскости ЖК) можно выделить два участка по разные стороны от точки перегиба кривой, где знаки оптической силы микролинз, образующихся из-за градиента показателя преломления ЖК, противоположны — одна из линз является отрицательной, другая — положительной. Переходная характеристика симметрична [2] отно-

сительно точки перегиба, фокусные расстояния обеих микролинз равны по модулю, и в предположении квадратичной зависимости показателя преломления от координаты  $x$  на указанных участках

$$F \approx \pm (\Delta x)^2 / 2\Delta n L, \quad (1)$$

где  $\Delta n$  — разность показателей преломления на двух участках характеристики;  $L$  — толщина слоя ЖК (должна быть удвоена, если свет отражается в ПМС и проходит через слой ЖК).

Благодаря такой фокусировке распределение интенсивности в плоскостях  $z_0 \pm F$  обострено по сравнению с распределением в плоскости слоя ЖК  $z_0$  (наблюдение переходной области в поляризационном микроскопе дает в 2-3 раза меньшую ширину при настройке на плоскости  $z_0 \pm F$  по сравнению с плоскостью  $z_0$ ). При построении с помощью проецирующей линзы преобразованного фазовым ПМС изображения экспериментатор, естественно, добивается наибольшей резкости краев деталей в изображении на выходе оптической схемы, а потому настраивает схему на получение изображения плоскостей  $z_0 \pm F$ , а не плоскости  $z_0$ . Соответственно, на выходе будут наблюдаться два изображения. Описанная ситуация имеет место только для бинарных изображений, в случае же полутоновых изображений однозначно такие плоскости найти нельзя вследствие неодинаковости оптической силы микролинз в различных точках плоскости ЖК.

Наблюдаемые изображения отличаются состоянием поляризации света, поскольку фазы лучей света, фокусируемых разными микролинзами, не одинаковы. Соответственно, при преобразовании фазовой модуляции в поляризационную (достигается установлением угла  $45^\circ$  между осью ЖК и плоскостью поляризации падающей световой волны /3/), а затем — с помощью анализатора — в амплитудную, оба изображения имеют противоположный контраст.

Сила линз, даваемая формулой (1), может быть вычислена при следующих типичных значениях величин, входящих в нее:  $\Delta x \approx 3 \cdot 10^{-5}$  м,  $L \approx 10^5$  м. Величину  $\Delta n$  определим из условия получения достаточно контрастного и яркого изображения, поскольку именно в таких условиях и проводятся наблюдения. В этом случае  $\Delta \varphi = 4\pi L \Delta n / \lambda \approx \pi/2$ , где  $\lambda$  — длина волны света ( $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$  м). Тогда  $F = \pm 2(\Delta x)^2 / \lambda = \pm 4 \cdot 10^{-3}$  м.

Таким образом, плоскости  $z_0 \pm F$  сдвинуты от плоскости  $z_0$  слоя ЖК на расстояние порядка 4 мм. Вычислим, к какому это приведет сдвигу в пространстве изображений при отображении с помощью проецирующей линзы с фокусным расстоянием  $f$ . Проведем расчет с помощью обычных формул геометрической оптики

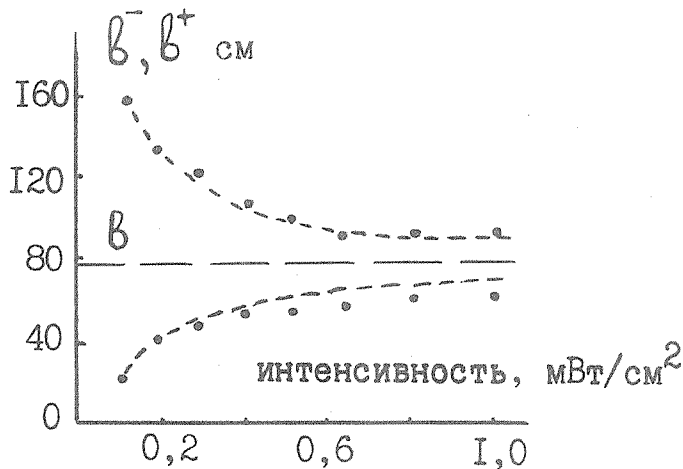
$$1/a + 1/b = 1/f, \quad (2)$$

$$(a + \delta a)^{-1} + 1/(b + \delta b)^{-1} = 1/f. \quad (3)$$

Уравнение (2) соответствует обычному геометрическому изображению, а уравнение (3) — изображениям плоскостей  $z_0 \pm F$ . При этом  $a = z_0$  есть расстояние от предметной плоскости до проецирующей линзы,  $b$  — расстояние от линзы до плоскости изображения; соответственно  $\delta a$  и  $\delta b$  есть сдвиги упомянутых плоскостей, причем  $\delta a = \pm F$ . Изображение объекта (слоя ЖК в данном случае) получают, помещая объект перед фокальной плоскостью линзы на некотором расстоянии  $\Delta$ . Из уравнений (2) и (3), обозначая  $a = f + \Delta$ , получаем:

$$\delta b = -f^2 \delta a / [\Delta(\Delta + \delta a)], \quad (4)$$

где  $\delta a = \pm F$  вычисляется по формуле (1). Проведем оценку  $\delta b$ , взяв следующие значения:  $f = 11$  см,  $\Delta = 1,1$  см,  $\delta a = 0,4$  см. Формула (4) дает два значения:  $\delta b^+ = -29$  см (что соответствует  $\delta a = F$ ) и  $\delta b = 63$  см (при  $\delta a = -F$ ). Сама величина  $b = 121$  см. Таким образом, изображения должны наблюдаться на расстояниях от проецирующей линзы 92 см и 184 см одновременно; это соответствует экспериментальным данным с точностью около 5%.



Р и с. 1. Зависимости положения плоскостей резкого изображения от интенсивности регистрируемого изображения, точки — экспериментальные кривые, пунктир — расчетные; горизонтальная прямая ( $b$ ) — расчетное положение плоскости геометрического изображения. Эксперименты и расчеты выполнены при  $a \approx 14,1$  см;  $f = 11,8$  см (точность измерений 5%)

Дополнительную возможность проверки модели дает сравнение зависимости положения плоскостей изображения от интенсивности (яркости) регистрируемого изображения. На рис. 1 показаны экспериментальная зависимость и зависимость, полученная из расчетов по формулам (1) и (4), в которых исходными данными были измеренная (линейная) зависимость сдвига фазы модулируемого света в жидкокристаллическом ПМС от интенсивности регистрируемой световой картины /4/. Неточное знание  $\Delta x$  и различие длин волн, используемых для модуляции в данных экспериментах и в экспериментах /4/, учтено поправочным множителем в формуле (1) для точного совпадения при малых интенсивностях. Наличие расхождения между расчетными и экспериментальными данными при больших интенсивностях является следствием как неточности измерения  $\Delta$ , так и неучтенной в расчете зависимости разрешающей способности от интенсивности регистрируемого изображения. Тем не менее, расчет совпадает с экспериментом вполне удовлетворительно.

Наблюдаемое явление перефокусировки оптической схемы с жидкокристаллическим ПМС может быть применено для решения задач оптической обработки информации.

Поступила в редакцию 14 февраля 1984 г.

После переработки 14 мая 1984 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.Д. Думаревский и др., ДАН СССР, 276, № 3, 624 (1984).
2. А.А. Васильев, Труды ФИАН, 126, "Наука", М., 1981 г., с. 3-76.
3. Е.Р. Мустель, В.Н. Парыгин, Методы модуляции и сканирования света, "Наука", М., 1970 г., с. 15.
4. А.В. Парфенов, Диссертация, ФИАН, М., 1981 г., с. 69.