

Электрофизические и оптические свойства сферических и цилиндрических жидкокристаллических линз с оптическим управлением

И.Р.Гуральник, С.А.Самагин

Приведены новые экспериментальные результаты по прямому измерению фазового отклика сферических жидкокристаллических (ЖК) линз с оптическим управлением (ЛОУ). Впервые получена простая, удобная для анализа формула для фокусного расстояния адаптивной модальной ЖК линзы. Измерения комплексной проводимости проведены с точностью, достаточной для выявления вклада апертурной области, а расчет проводимости находится в хорошем качественном согласии с экспериментом. Предложена и экспериментально продемонстрирована возможность применения ЛОУ для автокоррекции дефокусировки и в качестве адаптивного дефлектора лазерного пучка.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, оптически управляемые пространственные модуляторы света, адаптивные линзы.

1. Введение

Предложенные одним из авторов [1] жидкокристаллические линзы с оптическим управлением (ЖК ЛОУ) вызывают интерес в связи с возможностью реализации на их основе адаптивно-оптических (АО) схем со встроенной оптической обратной связью. Экспериментальному исследованию ЖК ЛОУ посвящены наши предыдущие работы [2, 3], в которых приведены результаты визуализации волновых фронтов, получаемых с помощью сферических ЛОУ. В настоящей статье впервые проведено прямое измерение формы волнового фронта сферических ЛОУ с помощью датчика волнового фронта (ВФ), а также содержатся первые экспериментальные результаты формирования волнового фронта с помощью цилиндрической ЛОУ. Главным отличием ЛОУ от адаптивных ЖК линз с чисто электрическим управлением [4] является зависимость их фокусного расстояния (кривизны ВФ) от интенсивности падающего на линзу излучения, что позволяет реализовывать новые АО схемы на основе ЛОУ. В дополнение к схеме стабилизации мощности на диафрагме [3] экспериментально продемонстрирована возможность построения еще двух схем: автоматической компенсации дефокусировки и светочувствительного дефлектора лазерного пучка.

2. Формирование волнового фронта лазерного излучения с помощью ЛОУ

В работе [3] опубликованы экспериментальные результаты по формированию ВФ с помощью сферических ЛОУ. В качестве метода визуализации была использована стандартная для ЖК ячеек схема со скрещенными

поляроидами. В этом случае сферически-симметричный ВФ на выходе схемы порождает интерференционную картину в виде концентрических колец. В настоящей работе мы впервые провели прямые измерения формы волнового фронта, формируемого сферической ЛОУ. Для измерений был использован датчик ВФ, разработанный в Делфтском Техническом университете (Голландия). Точность восстановления ВФ на длине волны $\lambda = 0.63$ мкм составляла около $\lambda/20$, а сама процедура была связана с разложением по некоторому числу полиномов Цернике. Детальное исследование формы ВФ позволило провести достаточно точные измерения зависимости фокусного расстояния линзы от управляющих параметров, а также оценить качество получаемых фронтов.

Типичный вид восстановленного ВФ, генерируемого сферической ЖК ЛОУ при освещении ее однородным плоским пучком, приведен на рис. 1. Использовано разложение по полиномам Цернике включая седьмой порядок (35 полиномов). После восстановления можно определить целый ряд параметров ВФ: фазовый прогиб на апертуре, среднеквадратичное отклонение от плоского волнового фронта, оптическую силу (обратное фокусное расстояние), величину aberrаций и др.

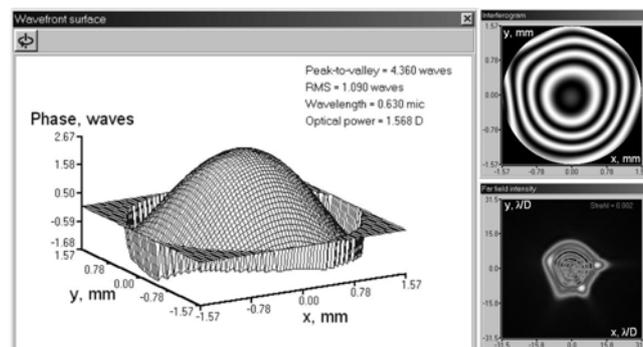


Рис. 1. Копия экрана программного обеспечения для использованного в работе датчика ВФ при работе со сферической ЛОУ. Интенсивность 0.2 мВт/см².

И.Р.Гуральник. Самарский государственный университет, Россия, 443011 Самара, ул. акад. Павлова, 1; e-mail: guralnik@ssu.samara.ru
С.А.Самагин. Самарский филиал Физического института им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 443011 Самара, ул. Ново-Садовая, 221; e-mail: samagin@fian.smr.ru

Поступила в редакцию 19 декабря 2004 г.

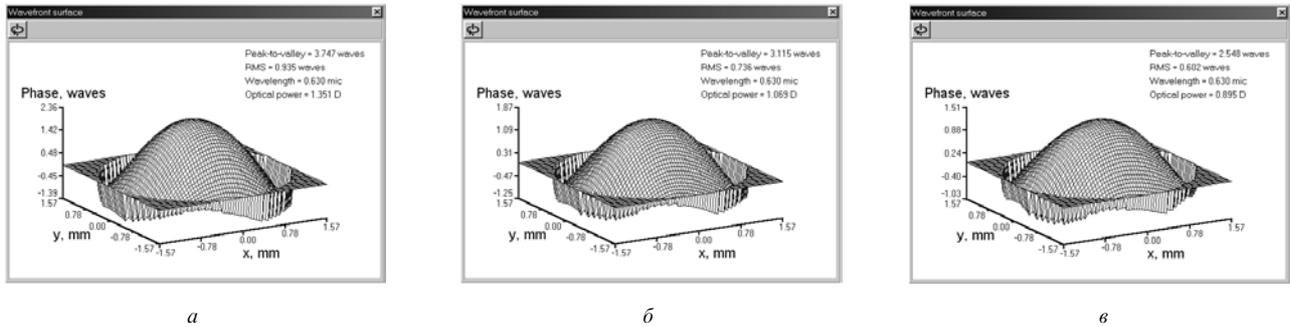


Рис.2. Форма волнового фронта, полученного на сферических ЛОУ при интенсивностях падающего на линзу излучения 0.23 (а), 0.29 (б) и 0.34 мВт/см² (в). Амплитуда управляющего напряжения равна 9 В, частота – 100 Гц.

На рис.2 показано изменение ВФ за сферической ЖК ЛОУ. При увеличении интенсивности падающего на нее излучения от 0.23 до 0.34 мВт/см² фазовый прогиб уменьшается с 3.7λ до 2.5λ . Эти данные говорят о значительной фоточувствительности линзы, поскольку относительные изменения фазового прогиба сравнимы с относительным изменением интенсивности. Кроме того, из рис.2 видно, что при большей интенсивности форма ВФ ближе к параболической. Действительно, для рис.2,а,б, в aberrации составляют 0.242λ , 0.219λ и 0.162λ соответственно. Уменьшение aberrаций с уменьшением фазового прогиба является общим свойством адаптивных модальных ЖК линз [4].

Как отмечалось, качественным отличием ЖК ЛОУ от других линз является зависимость ее фокусного расстояния от интенсивности фокусируемого излучения. Используя теорию ЖК ЛОУ [1–3], получим эту важную зависимость аналитически при следующих предположениях: задействован линейный участок вольтфазной характеристики ЖК, импеданс ЖК слоя не зависит от приложенного к слою напряжения (так называемое приближение постоянного импеданса) и прогиб профиля напряжения на апертуре мал по сравнению с напряжением на контакте.

Фокусное расстояние линзы F связано с величиной фазового сдвига на ее апертуре соотношением

$$F = \frac{\pi l^2}{\lambda[\Delta\Phi(0) - \Delta\Phi(l)]}, \tag{1}$$

где l – радиус апертуры ЛОУ; $\Delta\Phi(0) - \Delta\Phi(l)$ – фазовый сдвиг между центром и краем апертуры. На линейном участке вольтфазной характеристики для зависимости фазовой задержки $\Delta\Phi$, вносимой ЖК слоем в прошедшую световую волну, имеем

$$\Delta\Phi(r) = \Delta\Phi_0 - \alpha|U(r)|, \tag{2}$$

где $\Delta\Phi_0$ – максимальная фазовая задержка, вносимая ЖК слоем; α – наклон вольтфазной характеристики на линейном участке; $U(r)$ – действующее напряжение в точке на апертуре с радиальной координатой r .

В свою очередь распределение напряжения по апертуре ЛОУ задаётся уравнением модального корректора с соответствующими граничными условиями. В рамках приближения постоянного импеданса решение этого уравнения имеет вид [1, 4]

$$U(r) = U_0 \frac{J_0(i\chi r)}{J_0(i\chi l)}, \tag{3}$$

где U_0 – напряжение на контакте; χ – так называемый модальный параметр, определяемый для ЖК ЛОУ соотношением

$$\chi^2 = \frac{g - i\omega c}{h\sigma(I)}. \tag{4}$$

В этом соотношении g и c – удельные проводимость и ёмкость ЖК соответственно; ω – частота управляющего напряжения; h – толщина фотослоя; $\sigma(I)$ – зависимость его проводимости от интенсивности. В теории модальных ЖК корректоров параметр χ играет важную роль, т.к. его обратная величина имеет смысл характерной длины спада локального напряжения у контактов.

Согласно формулам (2), (3) прогибы распределения напряжения на апертуре являются малыми в случае $|\chi l| \ll 1$. Тогда из соотношений (1)–(4) с учётом асимптотического поведения функции J_0 при малых значениях аргумента получим

$$F = \frac{4\pi h}{\lambda\alpha U_0} \frac{\sigma(I)}{(g^2 + \omega^2 c^2)^{1/2}}. \tag{5}$$

Это простое соотношение является весьма удобным для анализа свойств ЖК ЛОУ. В частности, если зависимость $\sigma(I)$ для фоточувствительного слоя близка к линейной, в соответствии с формулой (5) фокусное расстояние ЖК ЛОУ также должно линейно расти с ростом интенсивности падающего излучения, причем угол наклона графика должен уменьшаться с ростом частоты. Результаты измерения фокусного расстояния реальной ЖК ЛОУ от интенсивности приведены на рис.3,а. Видно, что зависимости действительно близки к линейным, а тангенс угла наклона (рис.3,б) практически обратно пропорционален частоте. Заметим, что квазилинейная зависимость фокусного расстояния от интенсивности излучения существенно упрощает процесс калибровки ЖК ЛОУ для практических применений.

Цилиндрические ЖК ЛОУ отличаются от сферических только геометрией низкоомного контакта, формирующего распределение управляющего напряжения по апертуре. В цилиндрической линзе низкоомный контакт представляет собой две параллельные полоски, расположенные по краям стеклянной подложки. Расстояние между полосками задаёт ширину апертуры линзы. Мы изготовили цилиндрические ЖК ЛОУ с апертурой 15×5 мм, причем ширина апертуры равна 5 мм. Остальные геометрические параметры аналогичны параметрам сферических ЖК ЛОУ. В схеме со скрещенными поляроидами цилиндрические фронты порождают полосовые интерфе-

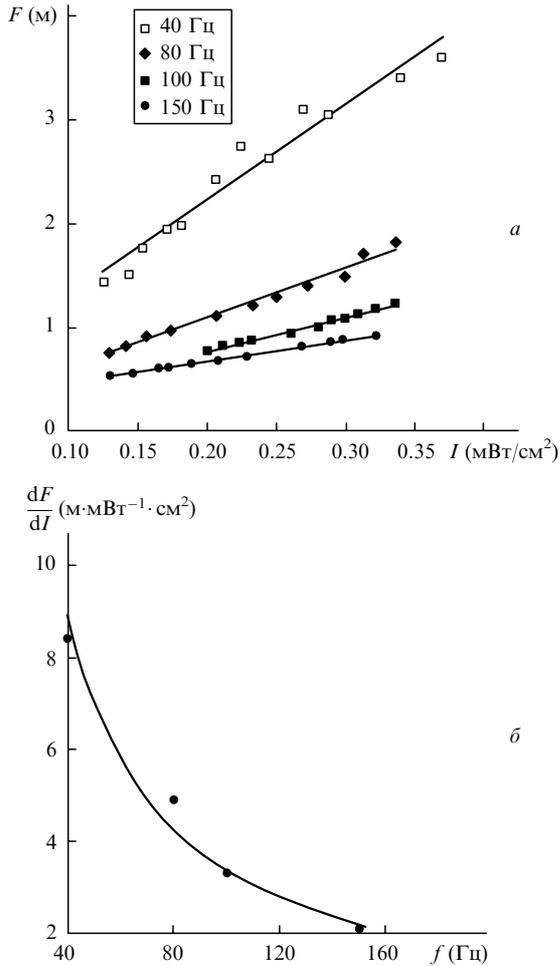


Рис.3. Зависимости фокусного расстояния сферической ЖК ЛОУ от интенсивности при разных частотах (а), а также тангены углов наклона кривых (точки) и гипербола $1/f$ (сплошная кривая) (б).

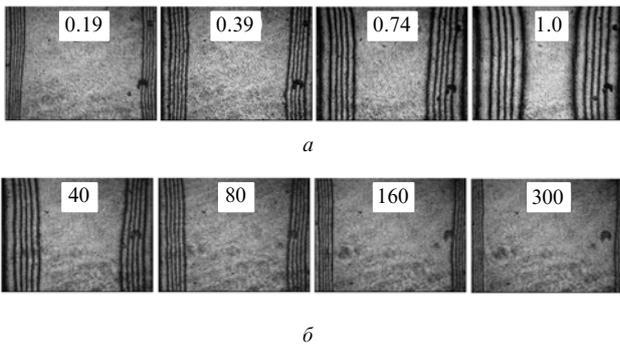


Рис.4. Интерферограммы, визуализирующие ВФ за цилиндрической ЖК ЛОУ при амплитуде напряжения 15 В и частоте 40 Гц (цифры соответствуют падающей на линзу интенсивности в относительных единицах, её максимальное значение составляет 2.5 мВт/см²) (а) и при амплитуде напряжения 10 В, интенсивности 2.4 мВт/см² (цифры соответствуют частоте приложенного напряжения в герцах) (б).

ренционные картины (рис.4). С ростом интенсивности пучка уменьшается поверхностное сопротивление фотослоя ЛОУ, что уменьшает прогиб распределения напряжения на апертуре и соответственно увеличивает расстояние между соседними полосами (рис.4,а). Увеличение частоты приложенного напряжения, напротив, увеличивает градиент распределения фазы, что сокращает расстояние между полосами (рис.4,б).

3. Электрофизические свойства ЛОУ

Хотя основное назначение адаптивных ЖК линз – управление формой волнового фронта, с точки зрения электродинамики они представляют собой двухполюсники. Исследование комплексного импеданса таких структур часто дает ценную информацию об их функциональных свойствах [4, 5]. Кроме того, комплексный импеданс ЖК слоя играет важную роль в работе модальных ЖК корректоров, частным случаем которых являются ЖК ЛОУ. Так, например, согласно (5) фокусное расстояние ЖК ЛОУ непосредственно определяется модулем импеданса ЖК слоя. Отметим прежде всего, что при исследовании модальных ЖК устройств удобнее пользоваться понятием обратного импеданса, т.е. комплексной проводимости (адмиттанса) Z^{-1} , определяемого как отношение комплексной амплитуды тока через двухполюсник к комплексной амплитуде напряжения на нем. Зная комплексную проводимость линзы, можно найти её эквивалентные ёмкость и сопротивление в параллельной цепочке замещения:

$$C = -\frac{1}{\omega} \text{Im } Z^{-1},$$

$$R = \frac{1}{\text{Re } Z^{-1}}.$$

Мы исследовали эквивалентные RC -параметры ЖК ЛОУ экспериментально и теоретически. Адмиттанс адаптивной ЖК линзы впервые был вычислен в работе [6]. Для цилиндрических и сферических линз было получено соответственно

$$Z_{\text{cyl}}^{-1} = \frac{2a(g - i\omega c)}{\chi} \tanh(l\chi) + Z_1^{-1},$$

$$Z_{\text{sph}}^{-1} = \frac{2\pi l(g - i\omega c)}{i\chi} \frac{J_1(i\chi)}{J_0(i\chi)} + Z_1^{-1},$$

где $Z_1^{-1} = S_{\text{cont}}(g - i\omega c)$ – вклад в адмиттанс областей линзы, расположенных под низкоомным контактом и имеющих площадь S_{cont} . Для цилиндрических линз апертура представляет собой прямоугольник $a \times 2l$, а для сферических – круг радиусом l . Поскольку $g - i\omega c$ есть удельная комплексная проводимость ЖК слоя, удобно ввести эффективную площадь апертуры S_{eff} адаптивной ЖК линзы с помощью соотношения

$$Z^{-1} = (g - i\omega c)(S_{\text{eff}} + S_{\text{cont}}).$$

Согласно формулам (7) эффективная площадь апертуры зависит от геометрии линзы и определяется для цилиндрической и сферической линз следующими формулами:

$$S_{\text{eff cyl}} = \frac{2a}{\chi} \tanh(l\chi),$$

$$S_{\text{eff sph}} = \frac{2\pi l J_1(i\chi)}{i\chi J_0(i\chi)}.$$

Соотношения (6)–(9) применимы и для описания RC -параметров ЖК ЛОУ, при этом модальный параметр χ определяется выражением (4). Через модальный параметр вклад в комплексную проводимость, обусловленный апертурой, зависит не только от частоты, но и от интенсивности освещения. В предельном случае малых интенсивностей из (9) получаем $S_{\text{eff cyl}} = 2a\chi^{-1}$ и $S_{\text{eff sph}} =$

$2\pi l \chi^{-1}$. Учитывая, что χ^{-1} характеризует ширину области спада напряжения вблизи контактов, оба соотношения имеют наглядный физический смысл: с точки зрения проводимости апертура представляет собой две примыкающие к контактам полоски $a \times \chi^{-1}$ (цилиндрическая линза) либо узкое кольцо, примыкающее к границе апертуры. Напротив, при больших интенсивностях формулы (9) дают $S_{\text{eff cyl}} = 2al$ и $S_{\text{eff sph}} = \pi l^2$, т. е. эффективная площадь апертуры совпадает с её геометрической площадью. Этого следовало ожидать, поскольку при больших интенсивностях напряжение во всех точках апертуры равно напряжению, приложенному к контакту, т. е. линза работает в режиме ячейки. Этот анализ показывает, что с ростом интенсивности эффективная площадь линзы монотонно увеличивается, что согласно (6), (8) приводит к увеличению ёмкости и уменьшению сопротивления.

Отметим также, что вклад апертуры в проводимость не превышает $S_{\text{eff max}} / (S_{\text{eff max}} + S_{\text{cont}})$, что составляет около 47 % для цилиндрических линз и всего 12 % для сферических.

Измерения комплексного импеданса ЖК ЛОУ осуществлялись по мостовой методике, примененной нами ранее для исследования импеданса многоканального модального ЖК корректора [5]. Типичные зависимости ёмкости и сопротивления цилиндрической линзы от напряжения приведены на рис.5. Для сферической ЖК ЛОУ зависимости аналогичны. Как показывают эти данные, зависимости RC -параметров от напряжения в основном обусловлены зависимостью от него проводимости и ёмкости слоя ЖК вследствие переориентации молекул ЖК во внешнем поле (переход Фредерикса). Пороговое напряжение для перехода в использованных нами ЖК составляет около 1 В, а исходная ориентация слоя является планарной (молекулы параллельны подложкам), поэтому при меньших напряжениях параметры слоя ЖК определяются компонентами тензора комплексной диэлектрической проницаемости, измеренными перпендикулярно электрическому полю. С ростом напряжения на обычной ЖК ячейке наблюдается переход к соответствующим компонентам, параллельным полю, величина которых заметно больше. С этим обстоятельством связан известный рост эквивалентной ёмкости и уменьшение эквивалентного сопротивления ЖК ячеек с напряжением. Как видно из рис.5, для линзы это явление также имеет

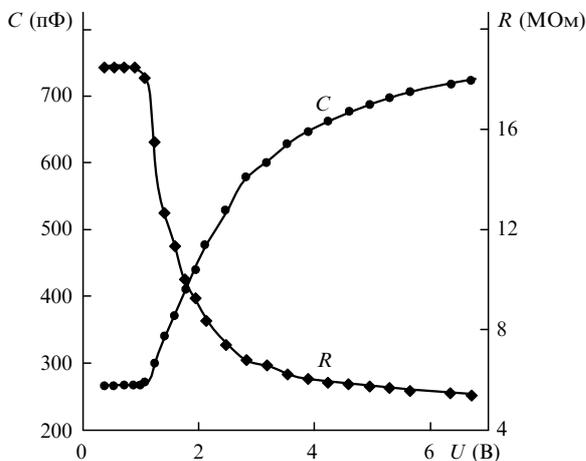


Рис.5. Зависимости эквивалентных ёмкости и сопротивления цилиндрической ЖК ЛОУ от приложенного напряжения (действующие значения) в отсутствие освещения при частоте сигнала 1 кГц.

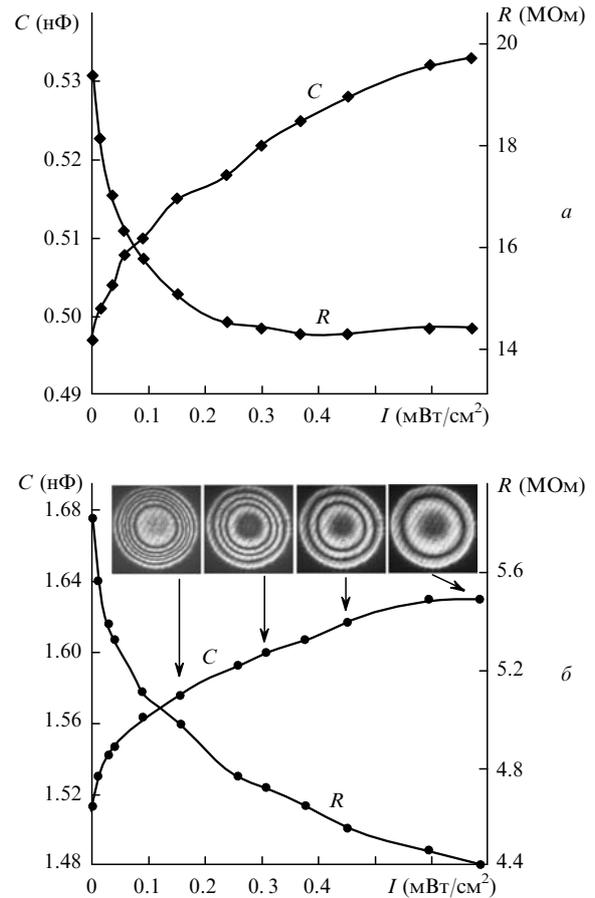


Рис.6. Зависимости эквивалентных ёмкости и сопротивления сферической ЖК ЛОУ от интенсивности падающего излучения при приложенном напряжении 0.5 В (а) и 9 В (б). На вставках приведены экспериментальные интерферограммы, снятые при значениях интенсивности, указанных стрелками.

место, однако рост, например, ёмкости с напряжением происходит медленнее. Это объясняется тем, что в линзе локальное напряжение равно приложенному напряжению U_0 только вблизи контактов, а в остальной части апертуры оно меньше. В результате те же значения R и C в линзе достигаются при больших напряжениях.

Как уже отмечалось, наибольший интерес для ЖК ЛОУ представляют зависимости её параметров от интенсивности освещения (рис.6). Изменение RC -параметров с ростом интенсивности хорошо согласуется с теоретическими выводами. При напряжении 0.5 В ёмкость примерно в три раза меньше, а сопротивление во столько же раз больше, чем при $U = 9$ В, что соответствует переходу от перпендикулярных компонент тензора диэлектрической проницаемости к параллельным. Интерферограммы на вставках свидетельствуют об уменьшении прогиба профиля напряжения с ростом интенсивности, хотя, как показывает крайняя правая интерферограмма, на данной частоте полная однородность напряжения по апертуре (режим ячейки) не достигается даже при максимальной интенсивности.

Таким образом, как локальные характеристики ЖК ЛОУ (форма ВФ), так и интегральные (проводимость) указывают на высокую фоточувствительность изготовленных линз, что позволяет говорить об их возможных применениях в АО системах.

4. Возможные применения ЛОУ для адаптивно-оптических систем

4.1. Система автоматической компенсации дефокусировки

Коррекция фазы является одной из наиболее актуальных задач адаптивной оптики. Среди различных типов фазовых aberrаций зачастую основную роль играют aberrации низкого порядка – наклон и дефокусировка. Поскольку АО системы без электронной петли обратной связи вызывают заметный интерес, здесь мы рассматриваем простой вариант такой системы на основе ЖК ЛОУ (рис.7).

Система линз Л1 и Л2 играла роль коллиматора и одновременно служила источником управляемой дефокусировки. С помощью делителя пучка и фотодиода контролировалась интенсивность пучка непосредственно за ЖК ЛОУ. Необходимость такого контроля была связана с небольшими флуктуациями интенсивности во время измерений. Вышедший из линзы пучок анализировался датчиком ВФ (см. разд. 2) и измерялась величина оптической силы D пучка.

Когда расстояние между линзами Л1 и Л2 равно сумме их фокусных расстояний, световая волна за линзой Л2 является плоской. Если же линза Л2 смещается из этого положения на малое расстояние d , волна за линзой Л2 становится либо расходящейся (Л2 приближается к Л1, $d < 0$), либо сходящейся (Л2 отодвигается от Л1, $d > 0$). В результате изменяется как форма ВФ, так и интенсивность пучка непосредственно перед ЖК ЛОУ. Если последняя выключена, то кривизна ВФ сохраняется и на её выходе. При включенной ЖК ЛОУ изменения интенсивности перед ней приводят к изменению её фокусного расстояния.

Рассмотрим, например, случай $d < 0$, когда на ЖК ЛОУ падает расходящийся пучок. Из-за расходимости интенсивность пучка перед ЖК ЛОУ будет меньше, чем за Л2, поскольку лишь часть энергии пучка попадает на апертуру ЖК ЛОУ. Величина этой энергии зависит, в частности, от степени расходимости пучка. Следовательно, с ростом $|d|$ одновременно растет расходимость и уменьшается интенсивность пучка на входе ЖК ЛОУ. На кривизну пучка на её выходе влияют оба этих фактора. Увеличение расходимости, очевидно, приводит к соответствующему росту расходимости пучка на выходе линзы. С другой стороны, уменьшение интенсивности (см. разд. 2) приводит к уменьшению фокусного расстояния ЖК ЛОУ (см. рис.3), т.е. уменьшает расходимость ВФ. Таким образом, адаптивная фокусировка с помощью ЖК ЛОУ частично компенсирует расходимость входного ВФ. Степень компенсации можно изменять надле-

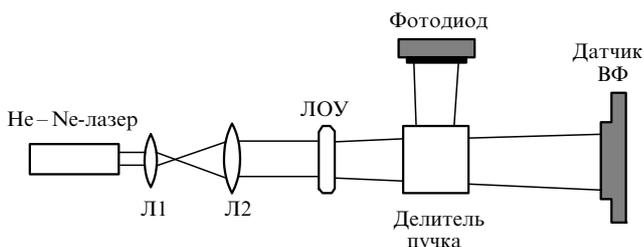


Рис.7. Система автоматической компенсации дефокусировки на основе сферической ЖК ЛОУ.

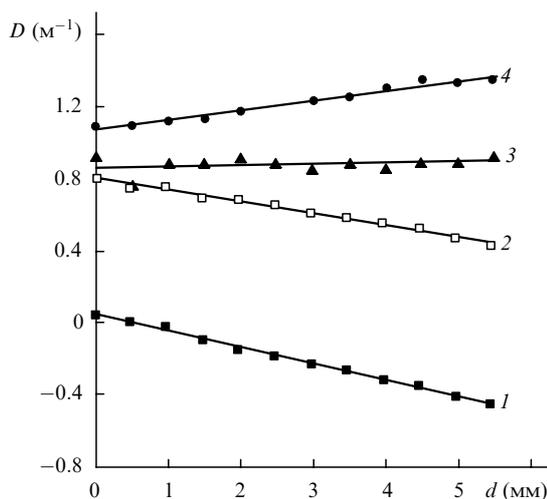


Рис.8. Адаптивная компенсация дефокусировки с помощью ЖК ЛОУ для $d < 0$ при выключенной ЖК ЛОУ (1), $s = 30$ (2), 50 (3) и 80 см (4).

жащим выбором величины и частоты управляющего напряжения, а также расстоянием s от ЛОУ до линзы Л2.

Мы провели измерения оптической силы D выходного пучка как функции модуля смещения d (см. рис.8). Видно, что при выключенной ЖК ЛОУ оптическая сила D отрицательна, а её величина растет с ростом d (кривая 1). Однако при включении ЖК ЛОУ вид кривых меняется в зависимости от s . Это объясняется тем, что одно и то же изменение d приводит к более сильному изменению интенсивности в плоскости апертуры ЖК ЛОУ с увеличением расстояния s . Поэтому следует ожидать более сильного влияния ЖК ЛОУ при больших значениях s . Фактически, как показывает кривая 4 рис.8, это влияние настолько сильно, что при увеличении расходимости входного пучка выходной пучок становится более сходящимся. Небольшое уменьшение s , в нашем случае до 50 см, позволяет практически полностью скомпенсировать переменную расходимость пучка: вместо линейного изменения D от нуля до -0.46 м^{-1} имеют место лишь её слабые флуктуации, обусловленные колебаниями интенсивности лазерного источника.

4.2. Угловая селекция пучков по интенсивности

На основе цилиндрической ЖК ЛОУ можно создать адаптивную призму, угол отклонения которой зависит от интенсивности падающего пучка. Использование такого устройства позволило бы осуществлять угловое разделение пучков, различающихся по интенсивности.

Исследованию электрически управляемой ЖК призмы как альтернативы традиционным для адаптивно-оптических систем деформируемым зеркалам с пьезоприводом посвящена работа Г.Лавы с сотр. [7]. По мнению авторов статьи, при управлении ЖК слоем с помощью нематического transient-эффекта скорость изменения угла отклонения оказывается сравнимой с требуемой скоростью коррекции фазы.

Для того чтобы цилиндрическая ЖК ЛОУ работала в режиме адаптивной призмы, необходимо создать линейное распределение управляющего напряжения вдоль апертуры линзы. Это достигается при одновременном выполнении двух условий: 1) линза работает в режиме малого модалного параметра, т.е. $|\chi l| \ll 1$; 2) на контакты подается разное по величине или фазе напряжение.

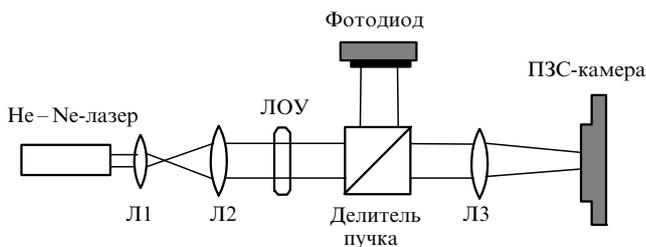


Рис.9. Схема наблюдения адаптивного отклонения лазерного пучка с помощью ЖК ЛОУ.

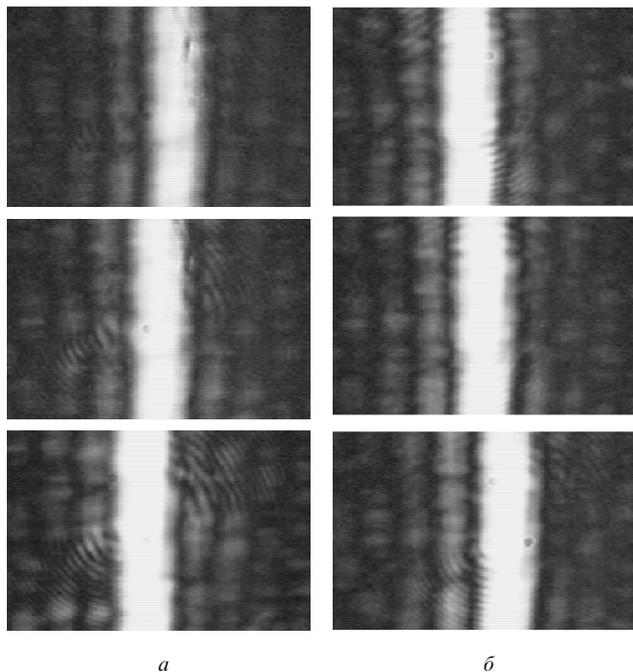


Рис.10. Смещение фокальной полосы при частоте 40 Гц и интенсивности (сверху вниз) 2.4, 3.5 и 6.8 мВт/см² (а), а также при интенсивности 4.7 мВт/см² и частотах 40, 80, 120 Гц (б). Амплитуда напряжения в обоих случаях равна 9 В.

Схема наблюдения отклонения с помощью ЖК дефлектора изображена на рис.9. ПЗС-камера расположена в фокальной плоскости линзы Л3. Степень отклонения пучка ЖК дефлектором определяется величиной попе-

речного смещения фокальной полосы. На рис.10 показано положение фокальной полосы при изменении управляющих параметров на дефлекторе. Следует отметить, что параметры использованной ЖК ЛОУ не были оптимизированы для рассматриваемого случая. Тем не менее, как видно из рис.10, максимальное смещение составляет примерно половину ширины фокальной полосы. В дальнейшем мы собираемся исследовать этот режим работы ЖК ЛОУ более подробно.

5. Заключение

Таким образом, в данной работе впервые непосредственно измерена форма волнового фронта сферических ЖК ЛОУ с помощью датчика ВФ и оценена величина aberrаций линзы. Эти результаты, а также экспериментальное исследование формы ВФ, формируемого цилиндрическими ЖК ЛОУ, свидетельствуют о высокой фоточувствительности образцов. Новые возможности практического применения ЖК ЛОУ иллюстрируются новыми адаптивно-оптическими системами – компенсации дефокусировки и адаптивного фоточувствительного ЖК дефлектора. Измерения эквивалентных электрических параметров цилиндрических и сферических ЖК ЛОУ позволили исследовать вклад в проводимость линз, обусловленный перераспределением напряжения по апертуре линзы. Результаты находятся в качественном соответствии с теорией проводимости адаптивных модальных ЖК линз.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Интеграция науки и высшего образования России на 2002–2006 гг.» (госконтракт Б0051/1369).

1. Гуральник И.Р. *Автометрия*, № 1, 107 (2000).
2. Guralnik I.R., Sozinova I.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4644**, 369 (2001).
3. Гуральник И.Р., Самагин С.А. *Квантовая электроника*, **33**, 430 (2003).
4. Вдовин Г.В., Гуральник И.Р., Котова С.П., Локтев М.Ю., Наумов А.Ф. *Квантовая электроника*, **26**, 256 (1999).
5. Гуральник И.Р., Самагин С.А. *Квантовая электроника*, **32**, 362 (2002).
6. Guralnik I.R., Naumov A.F., Loktev M.Yu. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4071**, 209 (2000).
7. Love G.D., Major J.V., Purvis A. *Opt. Lett.*, **19**, 1170 (1994).