

Сферическая жидкокристаллическая линза с оптическим управлением. Теория и эксперимент

И.Р.Гуральник, С.А.Самагин

Предложена и исследована жидкокристаллическая линза, фокусное расстояние которой меняется в зависимости от интенсивности прошедшего света. Построена теоретическая модель, адекватно описывающая формирование волнового фронта линзой. Приведены результаты визуализации управления волновым фронтом в схеме со скрещенными поляроидами и распределения интенсивности, характеризующие фокусирующие свойства линзы. Для иллюстрации применения предложенной линзы реализована адаптивно-оптическая схема стабилизации мощности излучения на диафрагме диаметром 1 мм, позволяющая уменьшить флуктуации мощности на ней в 30 раз.

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

1. Введение

В предложенных недавно адаптивных жидкокристаллических (ЖК) линзах [1] используется модальный принцип управления [2] с целью получения плавных волновых фронтов управляемой формы. Для целого ряда приложений модальные ЖК линзы (МЖКЛ) являются более удобными адаптивно-оптическими элементами, поскольку не содержат движущихся частей, а их фокусное расстояние легко перестраивается изменением как амплитуды управляющего напряжения, так и его частоты. В работе [3] представлены адаптивные фокусирующие системы на основе сферической и цилиндрической МЖКЛ. Как и в случае любого электрически управляемого адаптивного элемента, цепь обратной связи этих систем содержала фоточувствительный элемент (в данном случае фотодиод) для преобразования оптического сигнала в электрический и компьютер для обработки выходного напряжения фотодиода и выработки управляющего сигнала для МЖКЛ. Однако если бы фокусное расстояние адаптивной линзы зависело от интенсивности падающего света, можно было бы предложить более простую схему с оптической обратной связью.

Такая линза с оптическим управлением (ЛОУ) впервые описана в [4], где также была теоретически исследована ее работа при освещении гауссовым пучком. Первые результаты экспериментальной реализации двухслойной ЛОУ приведены в [5]. Однако двухслойная конструкция заметно снижает фоточувствительность линзы, так что для оптического управления формой прошедшего светового пучка пришлось использовать дополнительный источник освещения. Недавно нам удалось преодолеть технологические трудности создания достаточно фоточувствительного слоя (ФС), совместимого с технологией

сборки ЖК ячеек, и изготовить высокочувствительные однослойные ЛОУ. В настоящей работе приведены результаты теоретического и экспериментального исследования таких линз.

2. Устройство и теоретическая модель ЛОУ

Проще всего описать устройство ЛОУ, отталкиваясь от конструкции МЖКЛ. Если в МЖКЛ обычный высокоомный слой так называемого управляющего электрода заменить фотопроводящим слоем, поверхностное сопротивление которого будет изменяться в зависимости от интенсивности падающего на него излучения, то формой волнового фронта новой линзы можно будет управлять с помощью не только амплитуды и частоты приложенного к ней напряжения U_0 , но и указанной интенсивности. Упрощенная схема ЛОУ приведена на рис. 1. Принципиально важно, чтобы поверхностное сопротивление ФС при рабочих интенсивностях было согласовано с комплексным импедансом ЖК слоя [4].

Механизм формирования требуемого распределения локального напряжения по апертуре модального ЖК корректора выглядит следующим образом. ФС и ЖК слой образуют распределенный емкостно-резистивный делитель. Если к контактам приложено синусоидальное напряжение с частотой ω , мгновенное значение напряжения в центре апертуры линзы не успевает следовать за изменением управляющего напряжения на контактах. Эта задержка увеличивается с ростом частоты и приводит к плавному уменьшению напряжения от контактов к центру

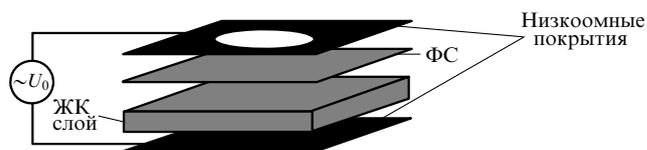


Рис. 1. Принципиальная схема линзы с оптическим управлением. В реальном образце ФС и оба низкоомных покрытия нанесены на стеклянные подложки, между которыми расположен ЖК слой.

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

И.Р.Гуральник. Самарский государственный университет, Россия, 443011 Самара, ул. акад. Павлова, 1

Поступила в редакцию 13 сентября 2002 г.

апертуры. Под действием такого напряжения в ЖК слое происходит переориентация молекул (переход Фредерикса). Поскольку локально ориентированный ЖК слой ведет себя как одноосный оптический кристалл, в нем возникает соответствующее распределение фазовой задержки, вносимой ЖК слоем в прошедшую световую волну.

С математической точки зрения распределение напряжения по апертуре описывается следующим уравнением [4]:

$$\nabla_s(\sigma_s \nabla_s U) = (g - i\omega c)U, \quad (1)$$

где ∇_s – двумерный оператор дифференцирования по координатам, лежащим в плоскости ФС; $\sigma_s = \sigma h$ – поверхностная проводимость ФС; σ и h – удельная проводимость и толщина ФС соответственно; c и g – удельные (на единицу площади) емкость и проводимость ЖК слоя соответственно.

В простой модели монополярного фотопроводника с постоянным временем жизни основных носителей заряда удельная проводимость ФС линейно связана с интенсивностью освещения I :

$$\sigma = \gamma I + \sigma_d, \quad (2)$$

где коэффициент пропорциональности γ зависит от коэффициента поглощения, времени жизни и подвижности основных носителей заряда и квантового выхода фотопроводящего материала ФС; σ_d – темновая проводимость ФС.

Электрофизические характеристики ЖК не являются постоянными величинами, а зависят от прикладываемого к нему напряжения [6]. Эти зависимости были экспериментально исследованы для использованного в настоящей работе ЖК на ячейках с калиброванной площадью при различных значениях амплитуды и частоты приложенного напряжения. Они имеют пороговый нелинейный характер (рис.2). В области напряжений, меньших порогового напряжения для перехода Фредерикса $U_S = \pi \{K_{11} / [e_0(\varepsilon'_{\parallel} - \varepsilon'_{\perp})]\}^{1/2}$ (где K_{11} – упругая постоянная ЖК, ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума, ε'_{\parallel} и ε'_{\perp} – действительные части комплексной диэлектрической проницаемости ЖК, измеренные параллельно и перпендикулярно направлению директора соответственно), ЖК сохраняет исходную планарную ориентацию, его емкость и проводимость c_{\perp} и g_{\perp} остаются постоянными. При относительно высоких напряжениях $U > (5 - 7)U_S$ практически весь слой ЖК ориентирован параллельно электрическому полю. Таким напряжениям соответствуют участки насыщения на рис.2, при этом емкость и проводимость обозначаем как c_{\parallel} и g_{\parallel} .

Данные зависимости могут быть аппроксимированы следующими эмпирическими соотношениями, которые остаются справедливыми для напряжений выше порогового и различных частот управляющего напряжения с допустимой степенью погрешности (5% – 10%):

$$c(U) = c_{\parallel} - \frac{c_{\parallel} - c_{\perp}}{1 + (U - U_S)^2}, \quad (3)$$

$$g(U) = g_{\parallel} - \frac{g_{\parallel} - g_{\perp}}{1 + (U - U_S)^2}, \quad (4)$$

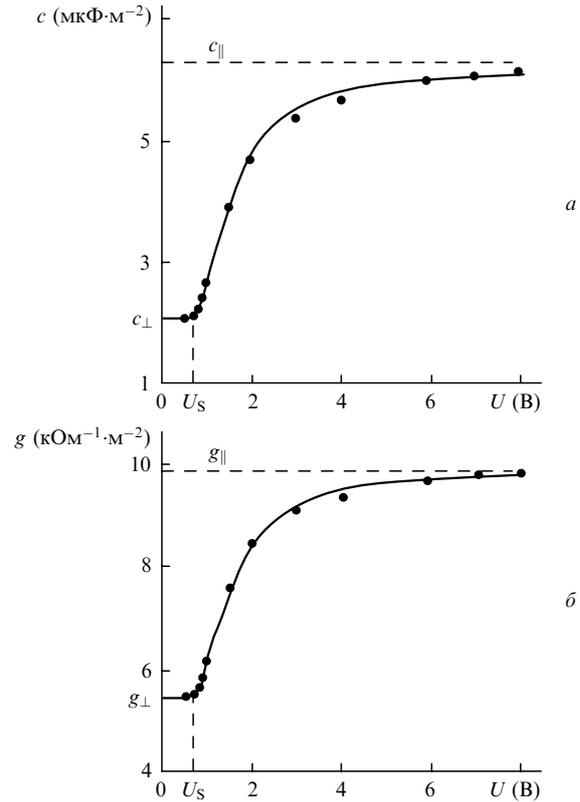


Рис.2. Зависимости удельных ёмкости (а) и проводимости (б) ЖК от действующего значения напряжения.

где U – действующее значение напряжения в вольтах. Как уже указывалось, ЖК слой играет роль электрооптической среды, внося дополнительную задержку в фазу прошедшей волны. Фазовая задержка определяется локальным значением напряжения, приложенного к данной области ЖК (см. экспериментальную вольт-фазную характеристику, приведенную на рис.3,а).

Чтобы проиллюстрировать зависящее от интенсивности управление формой волнового фронта с помощью ЛОУ, рассмотрим однородный пучок с плоским волновым фронтом, проходящий через линзу. Тогда проводимость σ постоянна по всей апертуре, и для сферической линзы осесимметричные граничные условия для (1) имеют вид

$$U(l) = U_0, \quad \left. \frac{dU}{dr} \right|_{r=0} = 0, \quad (5)$$

где l – радиус апертуры; U_0 – действующее значение напряжения, приложенного к верхнему контакту (рис.1).

Так как уравнение (1) является нелинейным, поиск его решения с граничными условиями (5) представляет собой довольно сложную задачу. В связи с этим для решения используются численный метод конечно-разностного представления Рунге – Кутты четвертого порядка и метод пристрелки. С помощью вольт-фазной характеристики распределения напряжения, являющиеся решениями уравнения (1), могут быть преобразованы в пространственные распределения фазовой задержки, показанные на рис.3,б. Видно, что кривизна волнового фронта (а значит и фокусное расстояние) зависит от интенсивности излучения, при этом среднеквадратичное отклонение профиля фазовой задержки от параболического профиля составляет 0.323, 0.020 и 0.005 длины волны соответственно для

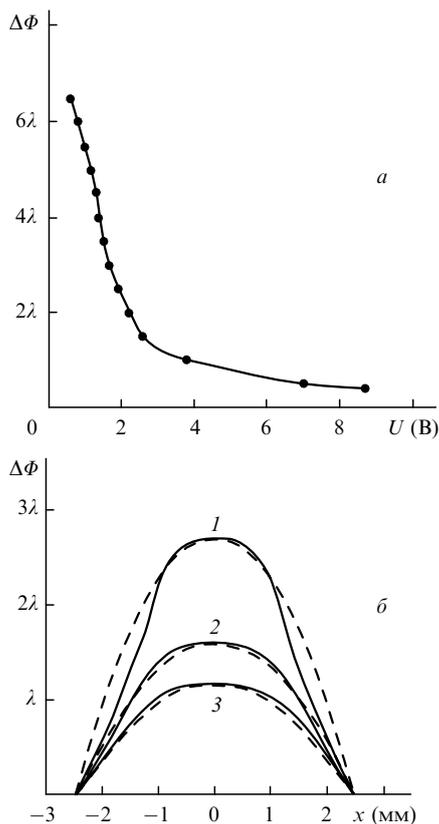


Рис.3. Типичная зависимость фазовой задержки ЖК от действующего значения напряжения (вольт-фазная характеристика) (а) и профили фазовой задержки, вносимой линзой, при интенсивности падающего излучения 2.3 (1), 3.5 (2) и 4.6 мВт/см² (3) (б). Сплошные линии – рассчитанные профили, штриховые – параболические профили с тем же фазовым прогибом $\Delta\Phi_{def}$; x – координата в плоскости радиального сечения.

кривых 1, 2 и 3 на рис.3,б. Мы рассчитали фокусные расстояния ЛОУ по известной формуле

$$F = \frac{\pi l^2}{\lambda \Delta\Phi_{def}}, \tag{6}$$

где $\Delta\Phi_{def}$ – фазовый прогиб на апертуре, т.е. разность фазовых задержек в центре апертуры и на ее границе; λ – длина волны падающего на линзу излучения. Результаты расчета (см. рис.4) показывают, что фокусным расстоянием ЛОУ можно управлять с помощью трех параметров: амплитуды напряжения, его частоты и интенсивности падающего излучения. Фокусное расстояние изменится практически линейно с интенсивностью, что удобно для калибровки ЛОУ. Интересно также отметить, что чувствительность фокусного расстояния к изменению интенсивности зависит как от частоты (разные углы наклона кривых на рис.4), так и от напряжения (масштаб вертикальной оси на рис.4,а в два раза меньше, чем на рис.4,б). Следовательно, подбором этих параметров можно управлять величиной отклика ЛОУ на изменение интенсивности излучения. Мы использовали этот факт для оптимизации поведения ЛОУ в системе стабилизации интенсивности на заданной диафрагме (см. разд.3).

3. Оптические свойства ЛОУ

Были изготовлены сферические ЛОУ с диаметром апертуры 5 мм и цилиндрические ЛОУ с рабочей апертурой 15 × 5 мм. На первом этапе на стеклянные подложки

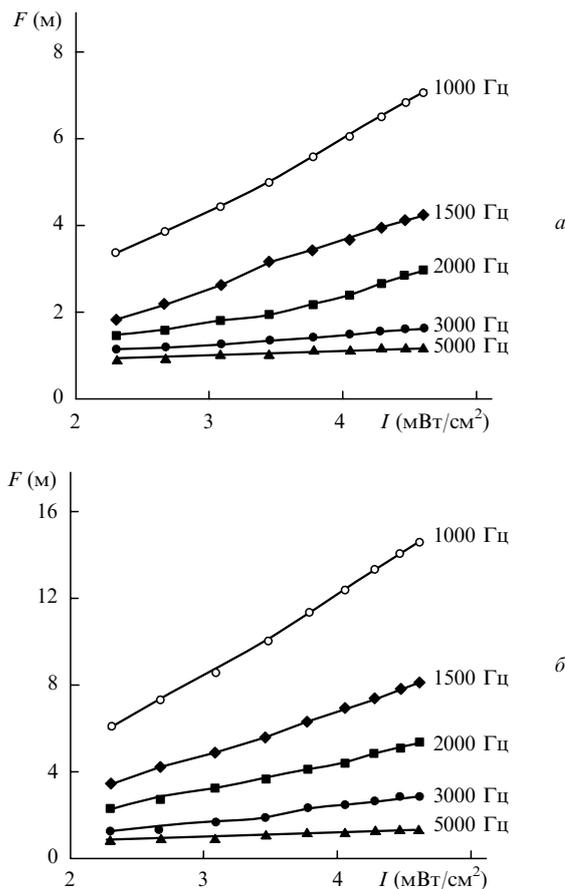


Рис.4. Зависимости фокусного расстояния от интенсивности падающего излучения при различных частотах и действующих значениях управляющего напряжения 5 (а) и 10 В (б).

наносились низкоомные тонкопленочные контакты из окиси олова с отверстиями требуемой формы. Затем поверх этих слоев напылялся фоточувствительный слой гидрогенизированного кремния α -Si:H. На вторую подложку также наносился низкоомный слой, служащий общим электродом для ЛОУ. Затем по обычной технологии собирались ЖК ячейки с планарной исходной ориентацией ЖК слоя, толщина которого составляла 12.5 мкм. Питание линз осуществлялось подачей на низкоомные контакты переменного синусоидального напряжения.

С помощью изготовленных линз мы наблюдали эффективное управление волновым фронтом прошедшего лазерного пучка He–Ne-лазера с длиной волны 0.633 мкм. Для визуализации формы волнового фронта исследуемая линза помещалась между скрещенными поляроидами так, что исходная ориентация оптической оси ЖК слоя составляла угол 45° с осями поляроидов. Результаты наблюдений представлены на рис.5–7. Интерферограммы на рис.5, 6, полученные при различных значениях приложенного напряжения и его частоты, соответствуют обычному поведению электрически управляемой модалной ЖК линзы [1, 3].

Интерферограммы на рис.7 представляют наибольший интерес, поскольку они иллюстрируют зависимость фазового прогиба от интенсивности падающего на линзу излучения. Кроме того, в соответствии с расчетными данными на рис.3,б и 4, с ростом интенсивности экспериментально наблюдаемый фазовый прогиб уменьшается (фокусное расстояние растет).

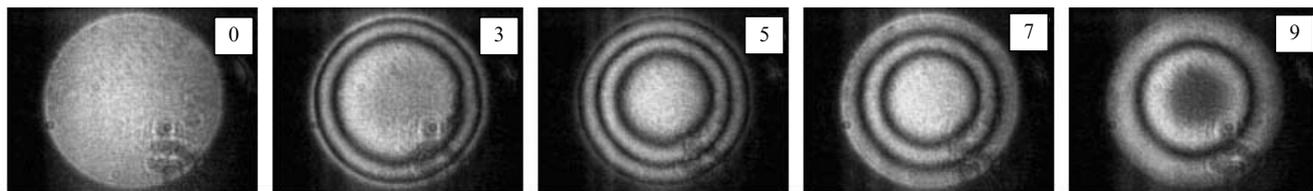


Рис.5. Визуализирующие волновой фронт интерферограммы, полученные при частоте 1,8 кГц и интенсивности 4,6 мВт/см². Числа на фотографиях – амплитуда напряжения в вольтах.

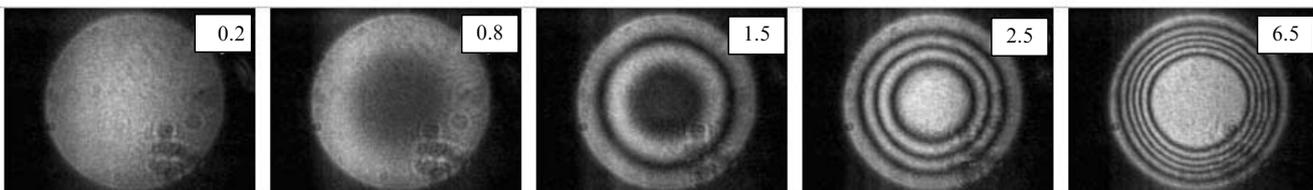


Рис.6. То же, что и на рис.5, при амплитуде напряжения 7 В и интенсивности 4,6 мВт/см². Числа на фотографиях – частота приложенного напряжения в килогерцах.

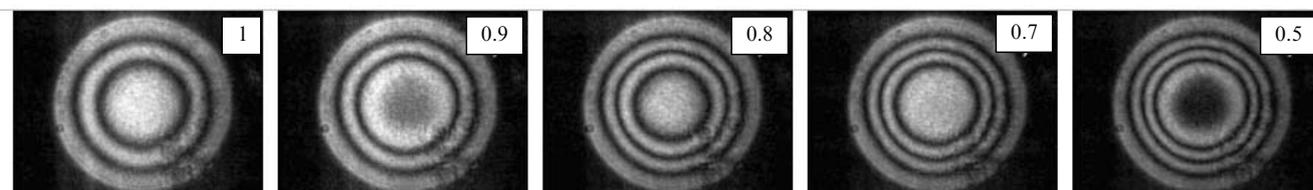


Рис.7. То же, что и на рис.5, при амплитуде напряжения 7 В и частоте 1,78 кГц. Числа на фотографиях – интенсивность падающего на линзу излучения, нормированная на свое максимальное значение 4,6 мВт/см².

Поскольку ЛОУ превращает плоский волновой фронт падающей волны в квазипараболический, имеет место фокусировка прошедшего излучения. На рис.8 показаны распределения интенсивности прошедшего лазерного пучка на экране, удалённом от линзы на расстояние 2 м, при различных интенсивностях падающего излучения. Хорошо видно, что форма распределений зависит от интенсивности. При используемых амплитуде и частоте приложенного напряжения наилучшая фокусировка достигается при интенсивности 0,8 – 0,9 от максимальной.

4. Система стабилизации интенсивности на основе ЛОУ

Вообще говоря, в системе с оптической обратной связью световая волна на выходе адаптивного элемента после определенной обработки вновь возвращается на элемент для подстройки его параметров с целью минимизации/максимизации некоторой характеристики. В системах фокусировки такая характеристика часто представляет собой функционал фокусировки [7]

$$P = \int_S E(r)E^*(r)ds, \tag{7}$$

где $E(r)$ – амплитуда поля световой волны; r – радиус-вектор точки наблюдения в плоскости мишени с площадью S . Поскольку в наших экспериментах роль мишени играла круговая диафрагма, функционал фокусировки представляет собой мощность излучения, проходящего через диафрагму.

К сожалению, из-за высокой фоточувствительности и связанного с этим сильного поглощения коэффициент пропускания полученных линз был не слишком велик. Это не позволило реализовать систему с оптической обратной связью как таковую, поскольку интенсивность выходного пучка на ЛОУ составляла около 12 % от интенсивности входного пучка, что недостаточно для эффективного управления линзой. Однако мы продемонстрировали работоспособность ЛОУ в системе с автоматической стабилизацией мощности.

Схема эксперимента изображена на рис.9. Измерялась мощность излучения P за диафрагмой как функция интенсивности I падающего на ЛОУ излучения при двух положениях диафрагмы: на расстоянии 2 и 0,35 м от линзы. Результаты измерений приведены на рис.10. Участок возрастания мощности, наблюдающийся при меньших интенсивностях, соответствует естественному её росту при увеличении интенсивности. Этот участок существу-

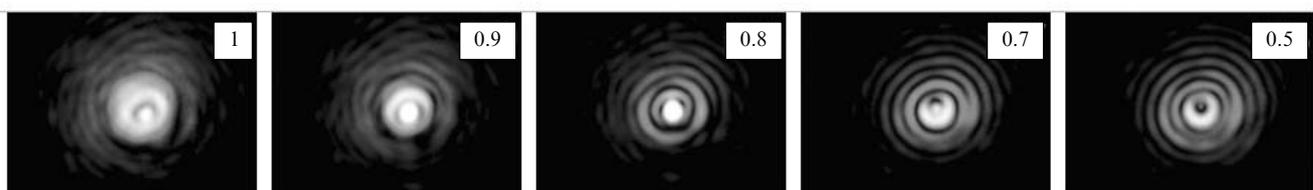


Рис.8. Распределение интенсивности на экране, расположенном на расстоянии 2 м от ЛОУ, при амплитуде приложенного напряжения 7 В и частоте 1,78 кГц. Числа на фотографиях – интенсивность, нормированная на 4,6 мВт/см².

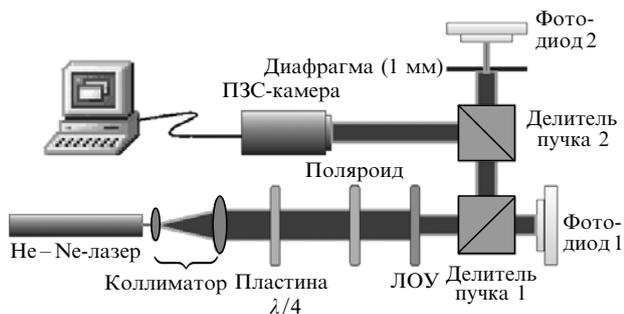


Рис.9. Схема системы стабилизации мощности на заданной диафрагме.

ет, когда вклад ЛОУ в перераспределение интенсивности в плоскости диафрагмы невелик. Напротив, при больших интенсивностях имеет место падение мощности с ростом интенсивности. Такое необычное поведение мощности объясняется тем, что в данной области параметров управления линза вызывает перераспределение интенсивности на мишени, что не только замедляет рост мощности, но и приводит к её уменьшению.

Такое поведение мощности означает, что с помощью ЛОУ можно автоматически компенсировать увеличение/уменьшение интенсивности падающего излучения дополнительной дефокусировкой/фокусировкой прошедшей через ЛОУ волны. По существу, именно эта ситуация реализуется вблизи максимумов кривых на рис.10,а, поскольку при небольших изменениях интенсивности I мощность P остается практически неизменной. Однако при данных условиях стабилизация малоэффективна, т. к. дефокусировка слишком сильна. Для оптимизации стабилизации мощности необходимо понизить фоточувствительность линзы, что достигалось уменьшением расстояния между мишенью и ЛОУ. При этом изменения фазы на линзе приводили к меньшим изменениям в распределении интенсивности в плоскости мишени. Кроме того, мы оптимизировали фоточувствительность подбором частоты управляющего напряжения.

Экспериментальные кривые на рис.10,б показывают, что хорошая стабилизация достигается для частот в диапазоне 1.35–1.5 кГц. Что касается интенсивности, то при её изменении почти в 2.5 раза мощность на диафрагме для этого диапазона частот изменяется всего лишь на 4%–5%. Таким образом, флуктуации мощности на мишени будут примерно в 30 раз меньше флуктуаций интенсивности падающего на систему излучения.

5. Заключение

Таким образом, рассмотрены экспериментальные результаты исследования разработанной адаптивной модальной ЖК линзы, фокусным расстоянием которой можно управлять путем изменения интенсивности падающего на линзу излучения. Управление формой волнового фронта с помощью изменения интенсивности проде-

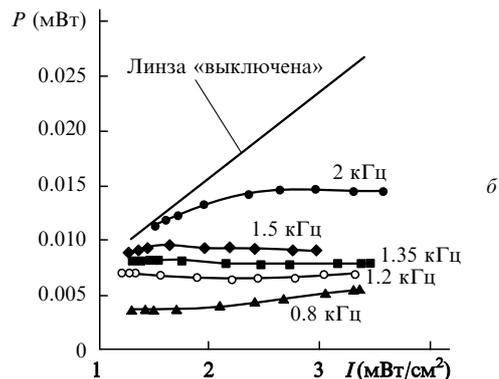
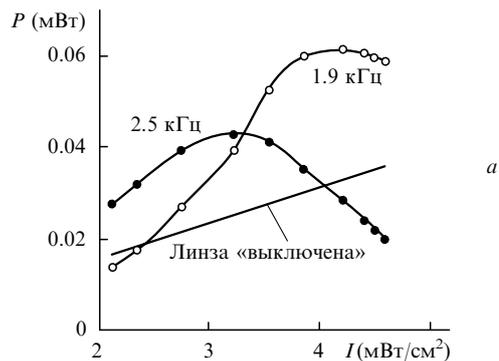


Рис.10. Фокусировка излучения с помощью ЛОУ на диафрагму диаметром 1 мм, расположенную на расстоянии 2 (а) и 0.35 м (б) от линзы.

монстрировано как в схеме со скрещенными поляризаторами, так и при регистрации распределений интенсивности. Предложена и реализована схема автоматической стабилизации мощности на круглой мишени диаметром 1 мм, позволяющая в 30 раз уменьшить флуктуации мощности. Заметим, что следующим адаптивно-оптическим применением ЛОУ может стать схема компенсации не амплитудных, а фазовых искажений падающего излучения.

Авторы выражают благодарность Н.А.Феоктистову за напыление фоточувствительных слоев, М.А.Рахматулину за сборку образцов ЛОУ, а также А.Ф.Наумову и Г.В.Вдовину за ценные замечания.

1. Naumov A.F., Loktev M.Yu., Guralnik I.R., Vdovin G.V. *Opt. Lett.*, **23**, 992 (1998).
2. Guralnik I.R., Naumov A.F., Loktev M.Yu. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4338**, 171 (2000).
3. Вдовин Г.В., Гуральник И.Р., Котова С.П., Локтев М.Ю., Наумов А.Ф. *Квантовая электроника*, **26**, 256 (1999).
4. Гуральник И.Р. *Автометрия*, № 1, 107 (2000).
5. Guralnik I.R., Sozinova I.V. *Intern. Conf. ILLA'01* (Vladimir-Suzdal, Russia, 2001).
6. Гуральник И.Р., Самагин С.А. *Квантовая электроника*, **32**, 362 (2002).
7. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. *Принципы адаптивной оптики* (М.: Наука, 1985).