

УДК 621.375

ФУНКЦИЯ ПРОПУСКАНИЯ МОДАЛЬНОЙ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ С ОПТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ ГАУССОВА ПУЧКА

© 2005 И.Р. Гуральник¹, С.А. Самагин²

¹Международная школа Мирас, г. Алматы, Казахстан

²Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Работа посвящена исследованию функции пропускания модальной сферической жидкокристаллической линзы с оптическим управлением при прохождении через неё пучка света с гауссовым распределением интенсивности. В работе представлены зависимости профиля фазовой задержки и фокусного расстояния от управляющих параметров: величины и частоты напряжения, мощности излучения. Показано, что эффективное управление линзой возможно и в случае неоднородного распределения интенсивности по ее апертуре.

Введение

Жидкокристаллические (ЖК) фазовые модуляторы представляют собой привлекательную альтернативу деформируемым зеркалам для использования в недорогих системах адаптивной оптики, поскольку не содержат движущихся частей, управляются небольшими напряжениями, обладают малыми размерами и допускают плоский дизайн. До недавнего времени электрически и оптически управляемые модуляторы света использовали лишь так называемый зональный принцип управления фазой, при котором управление каждым пикселом (или группой пикселов зоной) апертуры осуществлялось непосредственным подведением к нему напряжения. Зональные корректоры [1, 2] имеют существенный недостаток – ступенчатый характер генерируемого распределения фазы. Это означает, что фаза остается постоянной на каждом пикселе, а между ними она претерпевает сильный скачок, что ведет к большим потерям света на дифракцию. Кроме того, обязательные межпиксельные промежутки уменьшают фактор заполнения устройства.

Данные недостатки устраняются в разработанных в Самарском филиале ФИАН ЖК корректорах нового типа, использующих модальный принцип управления [3, 4]. Помимо электрически управляемых ЖК корректоров была предложена сферическая модальная жидкокристаллическая линза с оптическим управлением (ЛОУ) [5]. Главным отличием ЛОУ

от адаптивных ЖК линз с чисто электрическим управлением является зависимость её фокусного расстояния от интенсивности падающего излучения. Такое новое качество позволяет реализовывать на основе ЛОУ адаптивно-оптические схемы со встроенной оптической обратной связью [6, 7]. ЛОУ обладает способностью перестраивать свою функцию пропускания в зависимости от распределения интенсивности проходящего света, поэтому она может найти применение в системах фокусировки, формирования и управления лазерным излучением.

Настоящая работа посвящена исследованию функции пропускания сферической линзы с оптическим управлением для светового пучка с гауссовым распределением интенсивности. В работе представлены зависимости профиля фазовой задержки и фокусного расстояния от управляющих параметров и профиля распределения интенсивности падающего на ЛОУ. Проведён анализ качества волновых фронтов, создаваемых ЛОУ.

Устройство, принцип работы и основные функциональные свойства жидкокристаллических линз с оптическим управлением
Конструкция модальной жидкокристаллической линзы с оптическим управлением.

Конструкция ЛОУ представляет собой многослойную структуру (рис. 1).

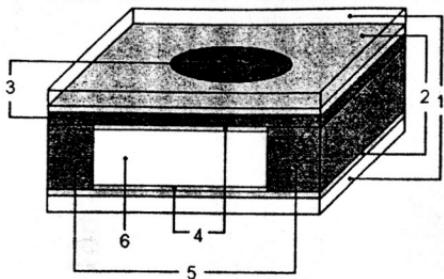


Рис. 1. Оптически управляемая жидкокристаллическая сферическая линза:
1 – стеклянные подложки, 2 – низкоомные электроды,
3 – фотопроводниковый слой, 4 – ориентирующее покрытие,
5 – прокладки, 6 – слой ЖК

Внешними слоями являются стеклянные подложки с нанесёнными на них плоскими прозрачными электродами. На одной из подложек электрод имеет отверстие, играющее роль апертуры. На эту подложку наносится слой фоточувствительного полупроводника. Средой, модулирующей проходящую световую волну, является слой нематического ЖК.

Физический механизм формирования управляемого фазового профиля основан на применении модального принципа управления и использовании ориентационного электрооптического S-эффекта[8].

Если к контактам ЛОУ приложено синусоидальное управляющее напряжение, то из-за резистивно-емкостного характера системы изменение напряжения в центре фотослоя (ФС) будет отставать от изменения напряжения на контактных электродах. В результате распределение напряжения в слое ЖК имеет спадающий характер от периферии апертуры к её центру.

Из-за неоднородности локального напряжения, приложенного к слою ЖК, появляется неоднородное по апертуре распределение показателя преломления вследствие переориентации молекул ЖК, что приводит к формированию соответствующего профиля фазовой задержки.

Управление формой распределения напряжения осуществляется с помощью изменения величины и частоты прикладываемого к контактам напряжения, а так же величиной и профилем распределения интенсивности излучения проходящего через ЛОУ. Именно

последнее свойство даёт возможность использовать ЛОУ в качестве элемента системы с оптической связью.

Фокусирующие свойства линзы

Проведённые ранее исследования [6, 7] выявили основные особенности поведения профиля фазовой задержки ЛОУ, которые заключаются в следующем. Величина действующего значения прикладываемого напряжения определяет диапазон возможного изменения фазового прогиба между краем и центром апертуры. Сам профиль фазовой задержки определяют частота напряжения и интенсивность проходящего излучения.

При увеличении частоты управляющего напряжения профиль фазовой задержки становится более крутым и глубина фазового прогиба между центром и границей апертуры растет. Увеличение интенсивности приводит к противоположному эффекту, т.е. фазовый прогиб уменьшается. Следует отметить, что на всём рабочем диапазоне управляющих параметров профиль фазовой задержки близок к параболическому (рис. 2а).

При измерении фокусного расстояния сферической ЛОУ, была установлена возрастающая зависимость фокусного расстояния от интенсивности излучения (рис. 2б). С помощью частоты питающего напряжения можно легко управлять скоростью изменения фокусного расстояния при изменении интенсивности (рис. 2б), т.е. фоточувствительностью ЛОУ. Данные свойства являются полезными для практических применений ЖК ЛОУ.

Функция пропускания ЛОУ для гауссова пучка

Для применения ЛОУ в оптических системах управления и фокусировки лазерного излучения необходимо знать функцию пропускания данной линзы при прохождении через неё светового потока с гауссовым распределением интенсивности. Поэтому целью данной работы является определение функции пропускания данной линзы и закономерностей её изменения в зависимости от параметров питающего напряжения и светового потока.

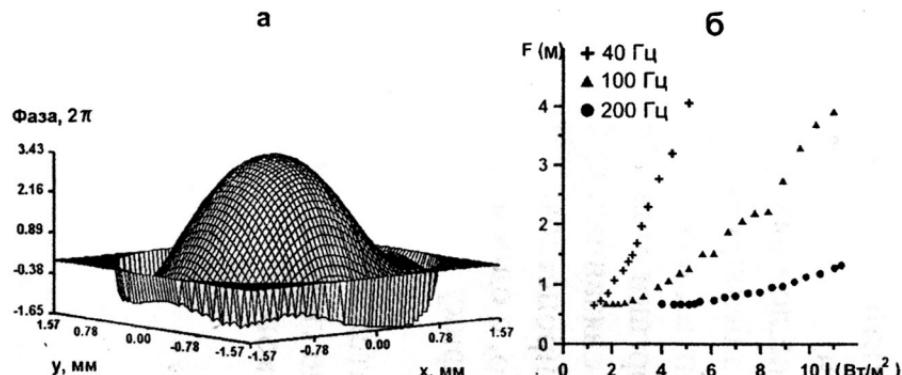


Рис. 2. Оптические свойства ЛОУ:

а – фазовая задержка ЛОУ при амплитуде напряжения 14 В, частота 100 Гц, интенсивность 4,3 Вт/м²;
б – зависимость фокусного расстояния от интенсивности

Система основных уравнений

ЛОУ представляет собой фазовый модулятор света. Её функции пропускания может быть записана в следующем виде:

$$F(x, y) = \exp(i\Phi(x, y)), \quad (1)$$

где $\Phi(x, y)$ – фазовая задержка ЛОУ, x, y – координаты точки в плоскости апертуры. Как говорилось ранее, фазовая задержка ЛОУ определяется распределением напряжения по апертуре линзы и зависимостью фазовой задержки слоя ЖК от напряжения. Профиль напряжения $U(r)$ в области апертуры в рамках разработанной модели [6] описывается следующим уравнением с соответствующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} h\nabla_s(\sigma\nabla_s U) - (g - i\omega c)U &= 0, \\ U(r = l) &= U_0, \end{aligned} \quad (2)$$

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

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

$$\sigma(x, y) = \alpha f(x, y) + \sigma_t$$

где $\nabla_s = n_x \frac{\partial}{\partial x} + n_y \frac{\partial}{\partial y}$, h – толщина фотопроводника,

$\sigma(x, y)$ – удельная проводимость фотопроводника, c и g – соответственно ёмкость и проводимость ЖК на единицу его площади, ω – циклическая частота управляющего

напряжения, l – радиус апертуры ЛОУ, $f(x, y)$ – интенсивность излучения, σ_t – удельная темновая проводимость, α – коэффициент пропорциональности, $c_{||}, g_{||}, c_{\perp}, g_{\perp}$ – ёмкость и проводимость ЖК при ориентации директрисы перпендикулярно и в направлении вектора напряженности электрического поля, U_{th} – пороговое напряжение для данного ЖК. В случае гауссова пучка света с шириной ρ и интенсивностью в максимуме I_0 распределение интенсивности можно записать в следующем виде:

$$I(x, y) = I_0 \exp\left(-\frac{2((x - x_0)^2 + y^2)}{\rho^2}\right), \quad (5)$$

где x_0 задаёт смещение центра пучка относительно центра апертура ЛОУ.

Для восстановления профиля фазовой задержки ЛОУ при известном распределении локального напряжения мы использовали экспериментально найденную вольт – фазную зависимость слоя ЖК (рис. 3).

Поиск решения в аналитическом виде весьма сложная задача, т.к. уравнение ЛОУ является нелинейным уравнением с переменными коэффициентами. Поэтому решение поставленной задачи определялось численными методами. При расчётах использовались величины электрофизических характеристик ЖК и фотослоя для реально действующего образца, а рассматриваемые значения частоты напряжения и мощности излучения соответствуют рабочим диапазонам ЛОУ.

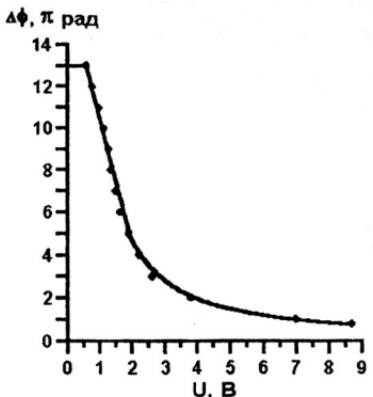


Рис. 3. Зависимость фазовой задержки слоя ЖК от действующего значения приложенного напряжения

Фазовая задержка ЛОУ в случае осесимметричного распределения интенсивности

В результате исследования были установлены следующие основные закономерности поведения фазовой задержки ЛОУ. Параметры питающего напряжения играют такую же роль, как и в случае однородного по интенсивности светового потока. Величина действующего значения прикладываемого напряжения определяет диапазон возможного изменения фазового прогиба. С помощью частоты напряжения можно контролировать глубину фазовой модуляции ЛОУ. Сам профиль фазовой задержки определяют мощность и ширина гауссова пучка.

При освещении ЛОУ гауссовым пучком пространственное распределение удельной проводимости фотослоя будет иметь соответствующую гауссову форму. Данная неоднородность $\sigma(r)$ будет приводить к распределению напряжения и как следствие фазовой задержки по апертуре отличному от случая равномерной освещённости. На рис. 4 приведены характерные профили фазы для однородного и гауссова пучка при одинаковой их мощности. Ширина гауссова распределения равна радиусу линзы, а радиальная координата r взята в нормированных на радиус апертуры ЛОУ единицах.

Хорошо видно, что величина фазового прогиба для гауссова пучка больше чем для однородного случая. Это связано с тем, что область вблизи контакта (на краю апертуры) слабо освещена и имеет большое сопротивление фотослоя, поскольку интенсивность излучения на краю ЛОУ для гауссова распределения с $\rho=1$ составляет всего около 14% от максимального значения в центре. Это приводит к быстрому падению напряжения даже на небольшом удалении от контакта и как следствие этому быстрому росту фазовой задержки. При приближении к центру интенсивность быстро нарастает и приводит к уменьшению градиентов напряжения и фазы (рис. 4). В результате полный фазовый прогиб увеличивается, а фокусное расстояние уменьшается по сравнению с однородным случаем при одинаковой мощности излуче-

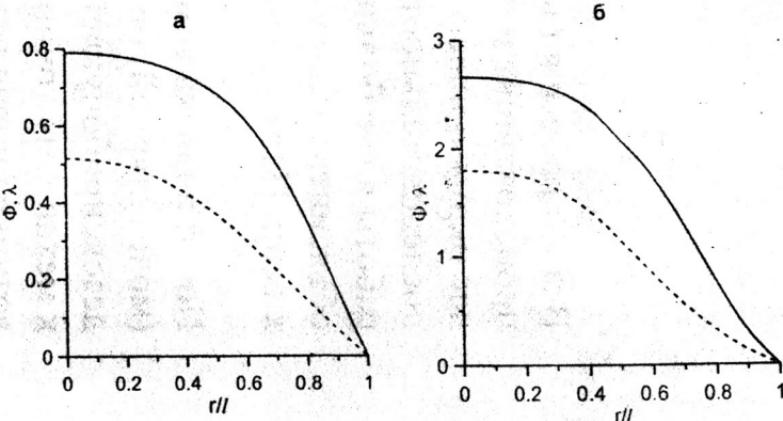


Рис. 4. Профили фазовой задержки ЛОУ для однородного (пунктирная линия) и гауссова распределения интенсивности при мощности излучения 0,2 мВт: а – 40 Гц, б – 120 Гц

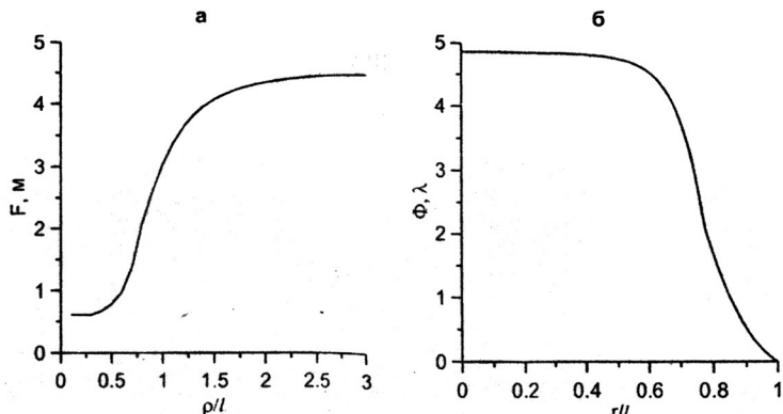


Рис. 5. Зависимость фокусного расстояния ЛОУ от ширины гауссова пучка (а) и профиль фазовой задержки для пучка с $\rho=0.5$ при мощности излучения попадающего в апертуру 0,1 мВт

ния. Характерная зависимость фокусного расстояния ЛОУ как функции ширины гауссова пучка представлена на рис. 5а. Для пучков с шириной более двух радиусов ЛОУ фазовое распределение близко к случаю однородного освещения, и оптические свойства линзы будут практически одинаковыми в обоих случаях. Если же ширина гауссова распределения меньше $0.5l$, то напряжение быстро падает до порогового значения ориентационного S-эффекта вблизи контакта и в области с достаточно высокой освещенностью уже не происходит переориентации ЖК и изменения фазовой задержки (рис. 5б). В такой ситуации ЛОУ теряет способность фокусировать

излучение и представляет собой для светового потока плоскопараллельную пластинку. Таким образом, эффективное управление с помощью ЛОУ пучками с гауссовым распределением интенсивности может осуществляться при значениях параметра $\rho > 0.5l$. Существенное влияние распределение интенсивности будет проявляться для ρ в диапазоне от 0,75 l до 1,25 l .

Одной из главных характеристик ЛОУ является зависимость её фокусного расстояния от мощности излучения (рис. 6а). Как и для случая однородного распределения интенсивности, частота напряжения определяет скорость изменения фокусного расстояния

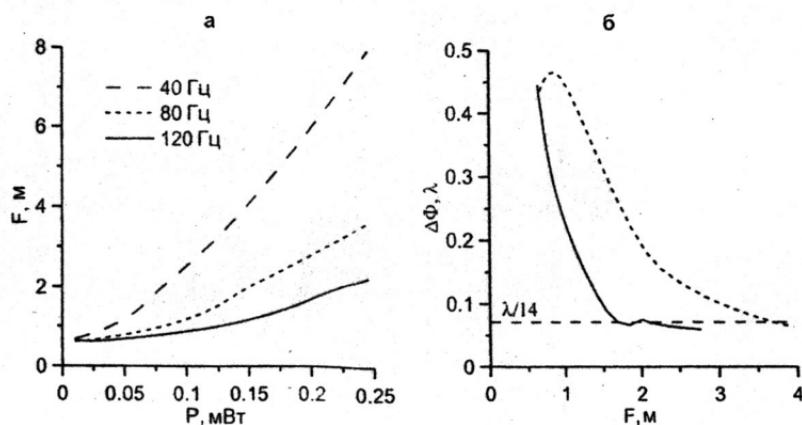


Рис. 6. Зависимость фокусного расстояния ЛОУ от мощности (P) гауссова пучка с шириной равной радиусу линзы (а) и зависимость средне квадратичного отклонения волнового фронта как функция фокусного расстояния для случая однородного распределения (пунктирная линия) и гауссова (сплошная линия) с шириной l (б).

при росте мощности излучения, попадающего в апертуру. Как показало исследование, фоточувствительность ЛОУ при фиксированной частоте возрастает с увеличением ширины гауссова пучка и достигает максимума для однородного распределения.

Для оценки качества формируемой ЛОУ фазовой задержки, был проведен анализ среднеквадратичного отклонения (СКО) фазового профиля как функции величины фокусного расстояния. Характерный вид данной зависимости представлен на рисунке 6б. Хорошо видно, что отклонение от идеального параболического фронта для гауссова пучка меньше чем для однородного. Это обусловлено тем, что приконтактные области освещены слабее, чем центральная часть, и в то же время слабее случая однородного по интенсивности пучка с той же мощностью. Поэтому градиент напряжения здесь достаточно высок, чтобы скомпенсировать нелинейность ВФХ слоя ЖК, чего не удается получить при однородном освещении. Следует также отметить, что условие Марешала [9] выполняется для гауссова распределения интенсивности проходящего через ЛОУ излучения для профилей фазовой задержки, соответствующих значительно меньшим фокусным расстояниям. Хотя длиннофокусные aberrации для данного случая больше, чем для однородного, величина СКО не превосходит $\lambda/14$.

Случай гауссова распределения с произвольным положением максимума интенсивности в области апертуры ЛОУ

Для применения ЛОУ в лазерных системах необходимо знать, насколько точно нужно совместить центры апертуры линзы и лазерного пучка. Мы провели исследование зависимостей профиля фазовой задержки от смещения x_0 цента распределения интенсивности. Сечение профиля фазы при смещении центра пучка $x_0 = -0,1/l$ плоскостью, проходящей через ось ОХ и нормаль к плоскости апертуры, представлено на рис. 7а. В такой ситуации фазовая задержка ЛОУ перестает обладать осевой симметрией и отклонение от идеального параболического профиля увеличивается (рис. 7б). Максимум профиля фазы смещается в противоположном направлении от смещения центра пучка. Однако следует отметить, что величина фокусного расстояния ЛОУ при небольшом смещении максимума интенсивности остается постоянной (рис. 7б). Таким образом, малое отклонение около 0,05/центра гауссова пучка от центра апертуры не приводит к сильному изменению характеристик профиля фазовой задержки ЛОУ.

Выводы

На основе результатов проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

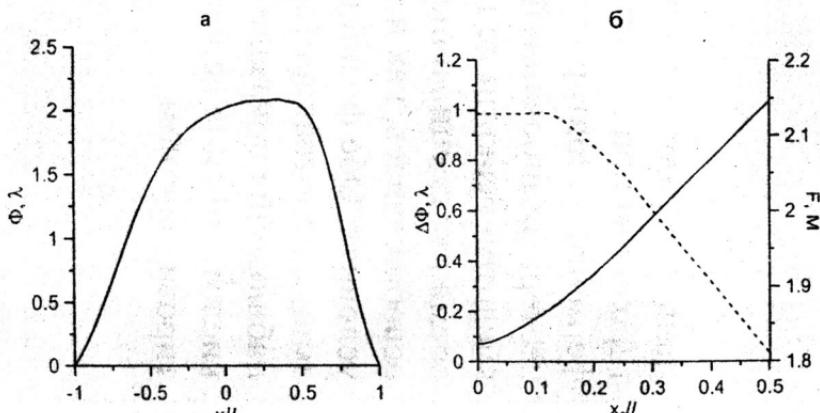


Рис. 7. а - сечение профиля фазовой задержки ЛОУ при смещении центра гауссова пучка на $-0,1/l$; б - зависимости среднеквадратичного отклонения профиля фазовой задержки от параболического (сплошная линия) и фокусного расстояния ЛОУ (пунктирная линия) от величины смещения центра пучка; амплитуда управляющего напряжения составляет 14 В, частота 100 Гц, значение интенсивности в максимуме составляет $23 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

1. Зависимость фокусного расстояния модальной ЖК линзы с оптически управлением от мощности гауссова пучка имеет возрастающий характер. Характер зависимости определяется частотой питающего напряжения: чем выше частота, тем меньше изменение фокусного расстояния при росте мощности пучка.

2. Фазовая задержка сферической жидкокристаллической линзы с оптическим управлением при прохождении через неё светового пучка с гауссовым распределение интенсивности имеет близкий к параболическому профиль. Величина среднеквадратичного отклонения от параболического рельефа уменьшается с ростом фокусного расстояния.

3. Эффективное управление с помощью ЛОУ может осуществляться световыми пучками с гауссовым распределением интенсивности, имеющими параметр ширины в диапазоне от 0,75 до 1.25 радиуса ЛОУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 *Chan W.W., Kowal S.T.*, Imaging performance of the liquid-crystal-adaptive lens with conductive ladder meshing // Applied Optics. 1997. Т. 36.
- 2 *Barbier P.R., Wang L., Moddel G.* Thin-film photosensor design for liquid crystal spatial light modulators // Optical Engineering. 1994. Т. 33.
- 3 *Наумов А.Ф.* Модальные корректоры волнового фронта // Труды ФИАН. 1993. Т. 217.
- 4 *Гуральник И.Р., Котова С.П., Локтев - М.Ю., Наумов А.Ф.* Жидкокристаллические линзы с перестраиваемым фокусным расстоянием // Квантовая электроника. 1999. Т. 26. № 3.
- 5 *Гуральник И.Р.* Модальная адаптивная жидкокристаллическая линза с оптическим управлением // Автометрия. 2000. № 1.
- 6 *Гуральник И.Р., Самагин С.А.* Сферическая жидкокристаллическая линза с оптическим управлением. Теория и эксперимент // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 5.
- 7 *Гуральник И.Р., Самагин С.А.* Электрофизические и оптические свойства сферических и цилиндрических жидкокристаллических линз с оптическим управлением // Квантовая Электроника. 2004. Т. 34. № 7.
- 8 *Блинов Л.М.* Электро- и магнитооптика жидкких кристаллов. М.: Наука, 1978.
- 9 *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970.

OPTICAL PERFORMANCE OF THE MODAL SPHERICAL LIQUID-CRYSTAL LENS WITH OPTICAL ADDRESSING UNDER GAUSSIAN BEAM ILLUMINATION

© 2005 I.R. Guralnik¹, S.A. Samagin²

¹ Miras International School, Almaty, Kazakhstan

² Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Lebedev of Russian Academy of Sciences

The paper is devoted to the investigation of the transmission of the modal spherical liquid-crystal lens with optical addressing when the latter is illuminated by a light beam with Gaussian distribution of intensity. Profiles of the phase delay and focal length are presented as functions of control parameters, i.e., amplitude and frequency of the voltage, and light power. It was shown that efficient control of the lens is possible in the case of the non-uniform illumination of the lens.