

Моделирование фазовых пространственных модуляторов света на основе жидкокристаллических сегнетоэлектриков

С.П. Котова¹, А.М. Майорова¹, Е.П. Пожидаев², С.А. Самагин¹

¹ Самарский филиал ФИАН, ул. Ново-Садовая 221, Самара, Россия, 443011

² ФИАН, Ленинский проспект 53, Москва, Россия, 119991

Аннотация. Проанализирована возможность построения фазовых зональных пространственных модуляторов света на основе квадратичного электрооптического эффекта в жидкокристаллических сегнетоэлектриках, позволяющих обеспечить частоты модуляции около 1 кГц. Исследование выполнено с помощью численного моделирования с использованием экспериментальных модуляционных характеристик жидкокристаллических ячеек.

1. Введение

Фазовые пространственные модуляторы света востребованы во многих областях современной оптики. Задавая фазовое распределение, можно компенсировать фазовые искажения волнового фронта, получать световые поля с определенным распределением интенсивности, например, в форме кривых в поперечном сечении, с ненулевым орбитальным угловым моментом и с заданным распределением его плотности. Традиционным способом реализации чисто фазовой пространственной модуляции является использование ориентационных эффектов в нематических жидких кристаллах (ЖК), характерные частоты для которых составляют несколько десятков Гц. Такое быстрое действие ограничивает возможные области применения пространственных модуляторов света (ПМС) на основе нематических ЖК.

2. Описание и методы

Увеличение быстродействия возможно за счет ориентационных эффектов в сегнетоэлектрических жидких кристаллах (СЖК) с субволновым шагом спиральной структуры, в частности, ориентационного эффекта Керра [1,2]. Характерные времена релаксации в этих средах составляют 30-100 микросекунд. Достигнутое уменьшение шага спиральной структуры жидкокристаллического сегнетоэлектрика до значений порядка 100 нанометров [3] позволяет устранить рассеяние света на спиральной структуре. Электроуправляемое двулучепреломление спиральной структуры жидкокристаллического сегнетоэлектрика пропорционально квадрату приложенного электрического поля; при этом отклонение главной оптической оси спиральной структуры от равновесного положения пропорционально напряженности электрического поля. Эллипсоид показателей преломления слоя жидкокристаллического сегнетоэлектрика может быть представлен как эллипсоид показателей преломления одноосного кристалла. При приложении электрического поля он изменяется: испытывает наклон, соотношения осей эллипса меняются, появляется двуосность. Это приводит в общем случае к изменению состояния

поляризации прошедшего через ячейку света. В данной работе методом численного моделирования проанализирована возможность построения пространственных модуляторов различного типа на основе ячейки с сегнетоэлектрическим жидким кристаллом с субволновым шагом спирали с ориентацией оси геликоида вдоль подложек.

Были проведены измерения электрооптических характеристик СЖК 587 (синтезирован в ФИАН, группа Е.П.Пожидаева) с планарной ориентацией оси геликоида подложкам. Шаг спирали этой ЖК смеси составлял 150 нм, толщина ячейки 50 мкм. Зависимости угла отклонения оси эллипсоида показателей преломления, а также двулучепреломления от напряженности приложенного поля определялись в схеме со скрещенными поляроидами. Для измерения показателей преломления вдоль длинной и короткой осей эллипсоида и эффективной фазовой задержки использовалась интерферометрическая схема. Эффективная фазовая задержка – это фазовый сдвиг, который получает волна с ориентацией поляризации, параллельной оси геликоида. Результаты этих измерений были представлены в [2].

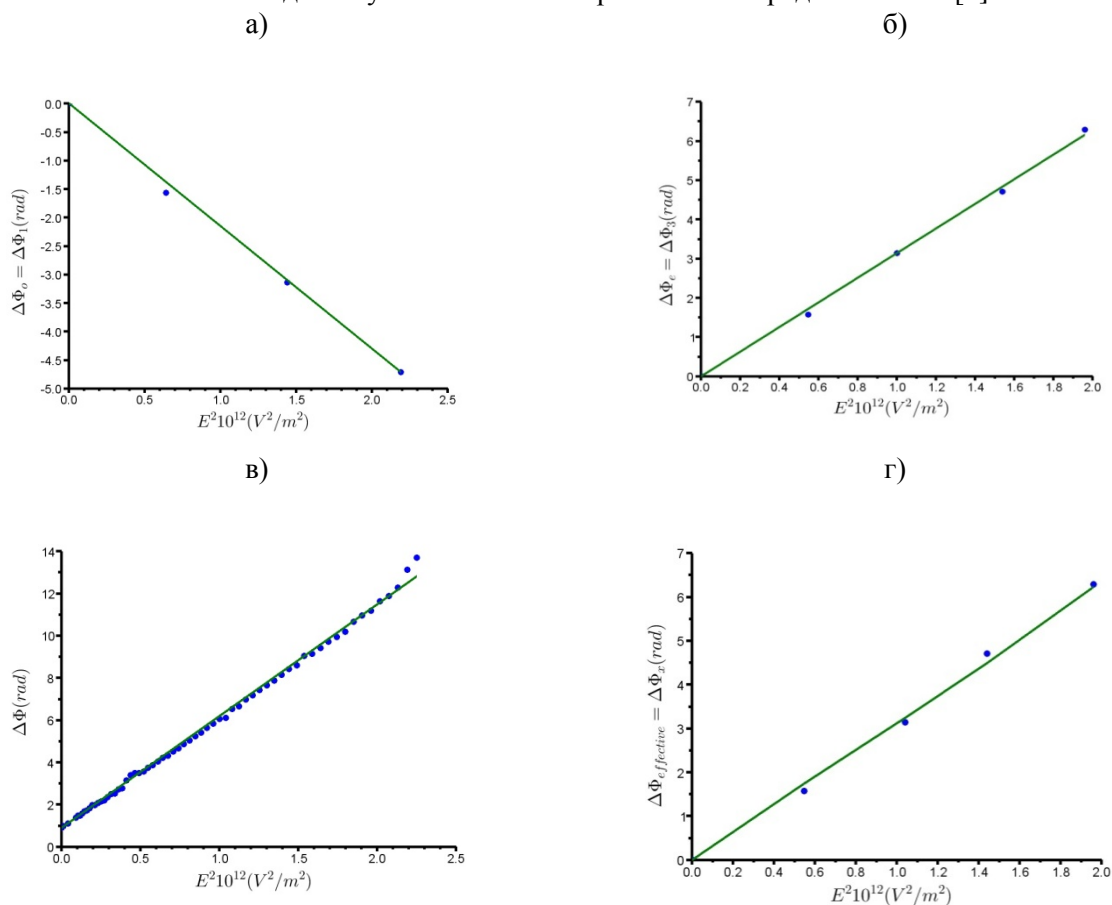


Рисунок 1. Зависимости фазовой задержки для обыкновенной (а) и необыкновенной волны (б), двулучепреломления (в) и эффективной фазовой задержки (г) от квадрата величины приложенного электрического поля.

Аппроксимация экспериментальных данных позволила получить зависимости показателей преломления, двулучепреломления, эффективной фазовой задержки от величины приложенного к слою электрического поля, необходимые для моделирования работы ЖК модулятора на основе СЖК. На рисунке 1 представлены результаты аппроксимации. Точками отмечены экспериментальные значения, а сплошными линиями аппроксимирующие зависимости, полученные в рамках модели одноосного кристалла с изменяющимся положением оптической оси и главных показателей преломления.

Рассматривались многопиксельные модуляторы с квадратной конфигурацией ячеек и модуляторы секторного типа, работающие как в режиме пропускания, так и отражения. Расчеты световых полей выполнялись для следующей схемы. ПМС освещался линейно поляризованным световым пучком. Величины напряжения, подаваемого на каждый пиксель, задавались в соответствии с требуемой величиной эффективной фазовой задержки, которую нужно сформировать у проходящей волны. Пропущенный или отраженный (в зависимости от типа модулятора) модулятором свет проходил через поляризатор с плоскостью пропускания, совпадающей с первоначальным направлением поляризации, и фокусировался линзой. Интерес представляет поле, получающееся в фокальной плоскости линзы.

Было промоделировано получение двух типов полей с ненулевым орбитальным моментом: аксиально-симметричных с различной величиной топологического заряда и в виде кривых в поперечном сечении. Для расчета фазового профиля масок, позволяющих формировать световые поля в виде произвольных кривых, использовался подход, базирующийся на оптике спиральных пучков света. Были изучены характеристики световых полей в виде кривой линии (спираль Архимеда) и замкнутой кривой (треугольник). Рассматривался СЖК модулятор отражательного типа с толщиной слоя ЖК 25 мкм, размером пикселя 100 мкм и разрешением 1024x1024 пикселей.

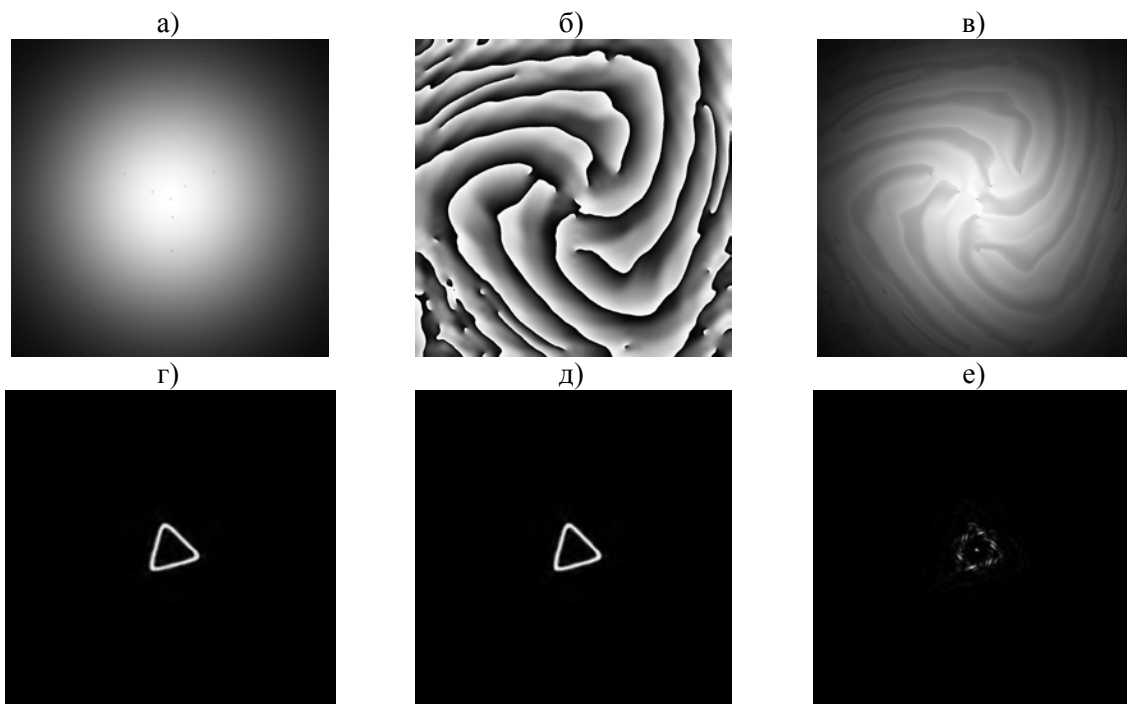


Рисунок 2. а) начальное распределение амплитуды поля, б) профиль фазовой задержки, в) амплитуда поля, получаемого за поляризатором, г) распределение интенсивности в фокальной плоскости, д) требуемое распределение интенсивности (без амплитудной модуляции), е) отклонение полученного распределения интенсивности от требуемого, нормированное на своё максимальное значение.

На рисунке 2 представлен пример формирования светового поля в виде границы треугольника. Видно, что получающееся световое поле близко к требуемому, но наблюдается некоторое отклонение в профиле распределения интенсивности. После прохождения поляризатора полная мощность уменьшается на 11 % для обоих случаев. Среднее отклонение интенсивности от требуемого относительно максимальной интенсивности составило не более 1%. Величина энергии, которая перераспределилась в отличном от требуемого распределения, составила 3% от всей прошедшей для обоих из рассматриваемых полей.

Моделирование формирования кольцеобразных световых полей с различным значением углового момента выполнялось как для модулятора отражательного типа с квадратной

конфигурацией ячеек (256x256 пикселей, размер пиксела 100 мкм, толщина слоя ЖК 25 мкм), так и для модулятора секторного типа (диаметр 1 см, 12 секторов, толщина слоя ЖК 50 мкм), работающего на пропускание. В первом случае топологический заряд варьировался от 1 до 10, во втором от 1 до 6. Было найдено, что общие потери энергии составляют величину около 11%, среднее отклонение интенсивности не превосходит 5%.

3. Выводы

Таким образом, можно сделать вывод, что возникающая модуляция амплитуды не оказывает принципиального, существенного влияния на формирование световых полей с ненулевым угловым моментом в форме заданных кривых. Результаты исследования указывают на возможность построения фазовых ПМС на основе СЖК с частотами модуляции свыше 0,5-1 кГц.

4. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-42-630773 и 16-29-14012 офи_м).

5. Литература

- [1] Pozhidaev, E.P. Orientational Kerr effect and phase modulation of light in deformed-helix ferroelectric liquid crystals with subwavelength pitch / E.P. Pozhidaev, A.D. Kiselev, A.K. Schrivastava, V.G. Chigrinov, H.S. Kwok, M. Minchenko // *Phys. Rev. E.* – 2013. – Vol. 87(5). – P. 052502.
- [2] Kotova, S.P. Light modulation in planar aligned short-pitch deformed-helix ferroelectric liquid crystals / S.P. Kotova, S.A. Samagin, E.P. Pozhidaev, A.D. Kiselev // *Phys. Rev. E.* – 2015. Vol. 92(6). – P. 062502.
- [3] Pozhidaev, E.P. New Chiral Dopant Possessing High Twisting Power./ E.P. Pozhidaev, S.I. Torgova V.E. Molkin, M.V. Minchenko, V.V. Vashchenko, A.I. Krivoshey, A. Strigazzi // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* – 2009. – Vol. 509. – P. 1042-1050.

Simulation of Spatial phase light modulators based on the ferroelectric liquid-crystals

S.P. Kotova¹, A.M. Mayorova¹, E.P. Pozhidaev², S.A. Samagin¹

¹ Lebedev Physical Institute, Samara Branch, Novo-Sadovaya street 221, Samara, Russia, 443011

² Lebedev Physical Institute, Leninskiy Prospekt 53, Moscow, Russia, 119991

Abstract. The work investigates the possibility for building of zonal spatial phase light modulators employing the quadratic electro-optic effect in ferroelectric liquid-crystals and capable of providing modulation frequencies up to 1 kHz. The study is made through the use of numerical simulation methods and experimental modulation characteristics of liquid crystal cells.

Keywords: spatial light modulators, phase modulation, ferroelectric liquid crystals.