

УДК 535+535: 621.373.826

ХII Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сборник конкурсных докладов (Самара, 12–15 ноября 2014 г.). – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 2014. – 520 с.

ISBN 978-5-902622-27-7

В сборнике представлены работы участников ХII Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике. Тематика работ охватывает широкий круг вопросов современной физической оптики, спектроскопии, нанофотоники и оптики жидких кристаллов. В отдельный раздел вынесены исследования, посвященные проблемам биофотоники.

Мероприятие проведено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Проект № 14-32-10052 мол\_г.

Для студентов, аспирантов, специализирующихся в области оптики, спектроскопии, лазерной физики, научных работников и преподавателей.

ISBN 978-5-902622-27-7

© Авторы, 2014

# УПРАВЛЯЕМЫЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ ФОТОННЫЕ МОДЫ В СТРУКТУРЕ ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИЙ ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ – ФАЗОВАЯ ПЛАСТИНКА – МЕТАЛЛ

**М.В. Пятнов, С.Я. Ветров, И.В. Тимофеев**

*Сибирский федеральный университет  
(660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79)  
Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН  
(660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/38)  
e-mail: MaksPyatnov@yandex.ru*

## АННОТАЦИЯ

Показана возможность существования в системе холестерический жидкий кристалл-фазовая пластинка-металл изолированной волноводной поверхностной моды, характеристиками которой можно управлять посредством внешних полей. Степень локализации поверхностных мод и коэффициенты пропускания, для света различных поляризаций, существенно различаются. Спектры пропускания при распространении света в прямом и обратном направлении имеют различный характер. Предложена конструкция поляризационного оптического диода, базирующегося на поверхностных фотонных модах.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы, наряду с изучением объемных свойств одномерных фотонных кристаллов (ФК), активно исследуются поверхностные электромагнитные волны в таких средах [1]. Кроме распространяющихся поверхностных волн можно получить состояние в виде стоячей поверхностной волны, которое имеет нулевое волновое число вдоль поверхности и не переносит энергию. Наблюдать такое состояние можно при падении волн по нормали к слоям ФК. Уравнение Максвелла для электрического поля в этом случае является точным аналогом одноэлектронного уравнения Шредингера для полубесконечного кристалла, решением которого является таммовское поверхностное состояние. В силу этого электромагнитный аналог таммовского электронного состояния называется оптическим таммовским состоянием (ОТС), или, иначе, таммовским плазмон-

поляритонном. ОТС могут возбуждаться между двумя различными фотонными кристаллами, имеющими перекрывающиеся запрещенные зоны или между фотонным кристаллом и средой с отрицательной диэлектрической проницаемостью. На частоте, соответствующей Таммовскому состоянию, возникает узкий пик пропускания, связанный с туннелированием света через ОТС.

Потенциальными применениями ОТС являются датчики и резонансные оптические фильтры, поляритонные лазеры, оптические переключатели, многоканальные фильтры, усилители Фарадеевского вращения, усилители эффекта Керра, органические солнечные элементы поглотители. Недавно предложен и экспериментально реализован лазер на основе таммовской структуры, которая состоит из квантовых ям, внедренных в брэгговский отражатель, поверхность которого покрыта слоем серебра [2].

Важной задачей оптики ФК является получение материалов, спектральными свойствами которых можно эффективно управлять при помощи внешних воздействий. Особым классом одномерных фотонных кристаллов являются холестерические жидкие кристаллы (ХЖК), обладающие уникальными свойствами: широкой областью прозрачности, сильной нелинейностью и высокой чувствительностью к внешним полям [3]. Характерной особенностью ХЖК является сильная зависимость их свойств от поляризации света. Для света с тем же направлением круговой поляризации, что и закрутка ХЖК, существует фотонная запрещенная зона. Свет с противоположной круговой поляризацией не испытывает дифракционного отражения и проходит сквозь структуру. При отражении от ХЖК не происходит изменения знака поляризации.

## **2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ**

В данной работе демонстрируется возможность реализации поверхностных оптических состояний в структуре, включающей ХЖК [4]. Получить, как в случае с ОТС, поверхностное состояние на границе ХЖК и металла при нормальном падении света нам не удалось. Трудность заключается в изменении поляризации волны при отражении от металла и существовании брэгговского отражения не для любой поляризации. Для возникновения локализации света мы должны изменить фазу волны между ХЖК и металлом. С этой целью внедряем между ХЖК и металлом четвертьволновую анизотропную пластинку, вырезанную параллельно оптической оси

и сдвигающую фазу волны на  $\pi/2$ . На границе ХЖК и фазовой пластинки молекулы холестерика ориентированы вдоль оптической оси пластинки. Рассматриваемая нами структура схематически представлена на рисунке 1. Система состоит из слоя ХЖК толщиной  $L$ , фазовой пластинки толщиной  $d$  с коэффициентами преломления  $n'_e, n'_o$ , для которой  $2\pi(n'_e - n'_o)d/\lambda = \pi/2$ , и слоя металла. Структура окружена средой с показателем преломления  $n$ , равным среднему показателю преломления ХЖК. Для рассматриваемого случая  $n'_o = n_o, n'_e = n_e$ , френелевское отражение на границе ХЖК–фазовая пластинка практически исключается.

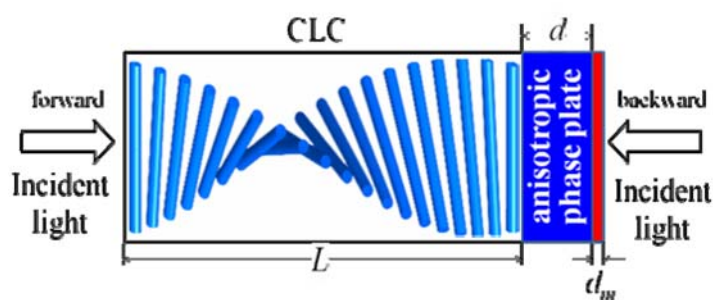


Рис. 1. Схематическое представление структуры

На рисунке 2 представлены спектры пропускания ХЖК, фазовой пластинки и рассматриваемой структуры. В спектре пропускания ХЖК отчетливо проявилась запрещенная зона для света правой круговой поляризации. Спектр пропускания серебряной пленки обозначен штрихпунктирной линией. Из рисунка видно, что пик волноводной поверхностной моды возникает в спектре пропускания (сплошная линия), если внедрить между ХЖК и металлом анизотропную четвертьволновую пластинку, которая управляет фазой световых волн. Затухание поля локализованной моды внутри металла обусловлено отрицательной диэлектрической проницаемостью металлической пленки, в то время как его затухание внутри ХЖК обусловлено брэгговским отражением на границе ХЖК-пластинка.

Распределение электрического поля для длины волны, соответствующей максимуму пропускания в структуре ХЖК-фазовая пластинка-металл, показано на рисунке 3. Из рисунка видно, что свет локализуется вблизи металлической пленки с максимальным значением электрического поля на границе фазовой пластинки и металлической пленки.

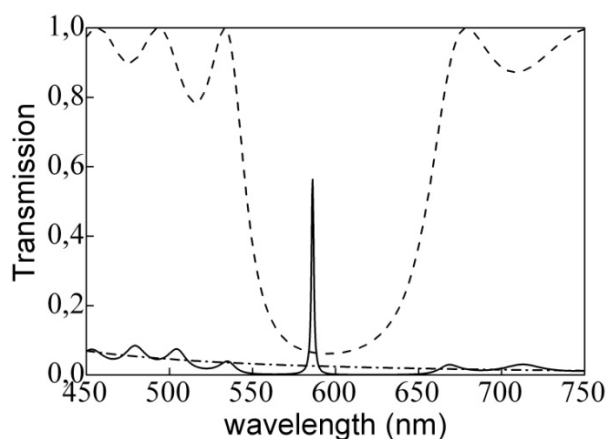


Рис. 2. Коэффициенты пропускания как функции длины волны при нормальном падении света на ХЖК (штриховая линия), на серебряную пленку (штрихпунктирная линия) и на структуру ХЖК-фазовая пластинка-металл (сплошная линия)

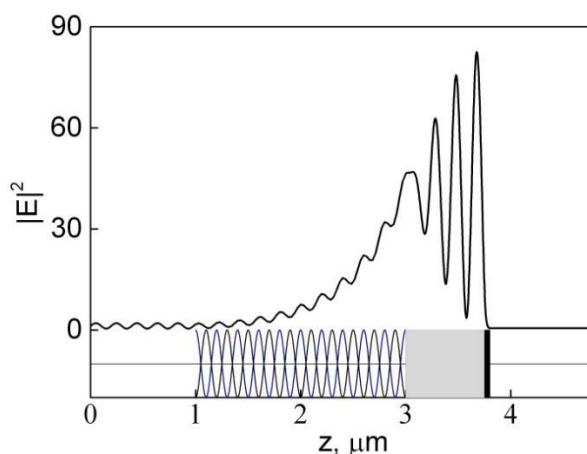


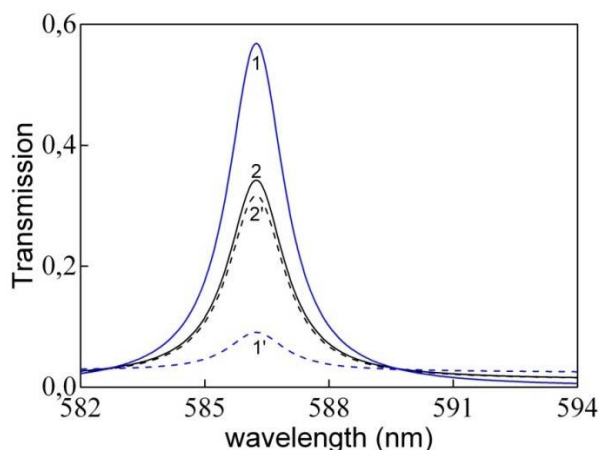
Рис. 3. Распределение квадрата модуля напряженности электрического поля  $|E(z)|^2$  в структуре ХЖК-фазовая пластинка-металл для  $\lambda=586$  нм. Поле нормировано на входное значение равное единице

Установлено, что локализованная мода возбуждается в образце, только с разным вкладом, светом различных поляризаций. Это обусловлено тем, что из-за наличия диэлектрических границ свет обеих круговых поляризаций возбуждает локализованную моду за счет преобразования поляризаций на диэлектрических границах. Любая поляризация света на выходе его из ХЖК становится эллиптической в разной степени, в зависимости от начальной поляризации.

Изменяя параметры системы, можно контролировать положение пика пропускания через изолированную волноводную поверхностную моду.

Сильную зависимость шага спирали, например, от температуры, по сравнению с другими элементами структуры, можно использовать для эффективного управления частотой пика пропускания, связанного с туннелированием света через поверхностное состояние.

Теперь рассмотрим распространение света через образец в обратном направлении, т.е. свет падает нормально со стороны металла. При распространении света в прямом направлении коэффициент пропускания для света правой дифрагирующей поляризации равен 0.57, в обратном направлении 0.34. Для левой круговой поляризации коэффициенты пропускания при распространении света в прямом и обратном направлении равны 0.09 и 0.32, соответственно. Таким образом, имеет место диодный эффект для обеих круговых поляризаций (рис. 4). Следует отметить, что данный эффект принципиально невозможен в скалярных структурах.



*Рис. 4. Спектр пропускания структуры: 1 и 1' соответственно для правой и левой поляризаций при падении света на ХЖК; 2 и 2' соответственно для правой и левой поляризаций при падении света на металл*

По этой причине структуру, рассматриваемую в данной работе, возможно использовать как поляризационный оптический диод. Преимуществом данного оптического диода является его перестраиваемость и простота в изготовлении, т.к. он состоит всего из трёх элементов.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрировано существование поверхностных электромагнитных состояний, локализованных в структуре ХЖК-фазовая пластинка-слой серебра. Спектральными свойствами такой системы можно эффективно управлять из-за высокой чувствительности структурных параметров ХЖК

к внешним воздействиям. Изменение поляризации волны при отражении от металла и особые поляризационные свойства ХЖК вынуждают использовать фазовую пластинку, внедренную между ХЖК и слоем металла. Свет любой поляризации падающей волны локализуется с максимумом интенсивности поля на границе металла и пластинки. Однако, различные эллиптичности волн, прошедших через ХЖК, и их поляризационные свойства приводят к различным коэффициентам пропускания для каждой поляризации. Указана возможность управления положением пика пропускания через изменение шаг спирали ХЖК посредством внешних полей. Отметим также, что найденная поверхностная мода – есть фактически собственная мода микрорезонатора, где в качестве зеркал выступают слои ХЖК и металлической пластинки. Следовательно, появляется возможность получения лазерной генерации в микрорезонаторе, если взять в качестве фазовой пластинки оптически активный материал.

Установлено, что спектры пропускания при распространении света в прямом и обратном направлении имеют различный характер. Данное свойство присуще только хиральным средам, к которым относят и ХЖК. На основе этого предложена конструкция поляризационного оптического диода, базирующегося на поверхностных фотонных модах.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ Сибирскому федеральному университету на выполнение НИР в 2014 году (Задание № 3.1276.2014/К) и при поддержке РФФИ (грант № 14-02-31248).

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. А.П. Виноградов, А.В. Дорофеев, А.М. Мерзликин, А.А. Лисянский// УФН, 2010, т. 180. С. 249-263.
2. С. Symonds, G. Lheureux, J.P. Hugonin, J.J. Greffet, J. Laverdant, G. Bruccoli, A. Lemaitre, P. Senellart, and J. Bellessa// NanoLett., 2013, v. 13, p. 3179-3184.
3. В.А.Беляков, А.С.Сонин, Оптика холестерических жидких кристаллов. М.: Наука, 1982, 360 с.
4. S.Ya. Vetrov, M.V. Pyatnov, I.V. Timofeev // Opt. Lett., 2014, v. 39, p. 2743-2746.