

ОПТИЧЕСКИЕ ТАММОВСКИЕ СОСТОЯНИЯ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИЙ ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ – МЕТАЛЛ

© 2015 Д.Н. Гулькин, В.О. Бессонов, И.В. Соболева, А.А. Ежов, А.А. Федянин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет

Поступила в редакцию 05.02.2015

Работа посвящена теоретическому исследованию оптических таммовских состояний в системе холестерический жидкий кристалл (ХЖК) – металл, а также разработке методики создания образцов структур на основе ХЖК для наблюдения в них оптических таммовских состояний. Проведено численное моделирование спектров коэффициентов пропускания и отражения структур ХЖК-металл при возбуждении в них оптических таммовских состояний. Предложен метод создания оптического контакта между металлической плёнкой и ХЖК при помощи нанесения на металлическую плёнку тонкого слоя фотоориентанта PAzo, запускающего процесс ориентации помещенного на неё ХЖК. Продемонстрирована возможность ориентации молекул фотоориентанта PAzo при помощи линейно-поляризованного излучения третьей гармоники импульсного Nd:YAG.

Ключевые слова: оптические поверхностные состояния, холестерический жидкий кристалл, наноплазмоника, нанофотоника.

1. ВВЕДЕНИЕ

Холестерические жидкие кристаллы (ХЖК) представляют собой самоорганизующимися фотонные кристаллы (ФК), состоящие из палочкообразных молекул, выстраиваемых в виде спирали [1]. Благодаря своей структуре в законе дисперсии для ХЖК наблюдается фотонная запрещённая зона (ФЗЗ) для циркулярно поляризованного света. Наличие эффекта селективного отражения для циркулярно поляризованного света в таких структурах делает ХЖК привлекательными для их применения в качестве элементов цветных дисплеев, перестраиваемых поляризаторов или оптических фильтров [2,3].

Показано, что наличие структурных дефектов в ХЖК приводит к изменению их оптических свойств по аналогии с обычными одномерными ФК, – на частотах фотонной запрещённой зоны наблюдаются пики в спектрах коэффициентов пропускания, связанные с локализацией света в дефектных слоях [4]. В последние несколько лет активно проводятся исследования оптических свойств нового типа поверхностных состояний, образующиеся на границе раздела ФК-металл. Данные состояния являются следствием лока-

лизации электромагнитного поля на границе раздела фотонный кристалл-металл и являются оптическим аналогом таммовских поверхностных состояний, возникающих на поверхности кристаллов. Экспериментально оптические таммовские состояния проявляются в виде узкого резонанса в спектрах коэффициентов отражения и пропускания структуры ФК-металл [2, 5]. Оптические таммовские состояния в фотонных кристаллах могут применяться при создании компактных лазерных устройств и сенсоров. Аналогичный эффект для циркулярно-поляризованного света можно ожидать и в системе ХЖК-металл. Однако исследований оптических таммовских состояний в таких структурах в мире не проводилось.

Преимуществом ХЖК перед одномерными фотонными кристаллами является возможность изменений структуры ХЖК при разных температурах, что способствует созданию перестраиваемых лазеров с металлическим контактом и перезаписываемых оптических устройств [6].

2. ОПТИЧЕСКИЕ ТАММОВСКИЕ СОСТОЯНИЯ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИЙ ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ – МЕТАЛЛ

2.1 Метод создания оптического контакта между поверхностью ХЖК и металлом

Основной проблемой при приготовлении структуры ХЖК-металл является создание оптического контакта между поверхностью ХЖК и металлической плёнкой. Вакуумное напыление металла приводит к расплавлению верхнего слоя ХЖК и нарушению в нём спиральной структуры. Поэтому при создании образцов предлагается ис-

Гулькин Дмитрий Николаевич, аспирант.

E-mail: gulkin@nanolab.phys.msu.ru

Бессонов Владимир Олегович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник.

Соболева Ирина Владимировна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

Ежов Александр Анатольевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

Федянин Андрей Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры квантовой электроники. E-mail: fedyanin@shg.ru

пользовать тонкий слой полимерного материала (фотоориентанта), представляющего собой фотохромный полиамид (PAzo), молекулы которого ориентируются с помощью линейно-поляризованного света в ультрафиолетовом диапазоне [7]. Сначала фотоориентант наносится на золотую плёнку и ориентируется при помощи облучения линейно-поляризованным ультрафиолетовым светом. Затем создается ячейка, куда заливается жидкий кристалл, который ориентируется благодаря анизотропии поверхностной энергии фотоориентанта (на рис. 1). Таким образом, получается оптический контакт между металлической плёнкой и созданным на ней ХЖК. В полученных таким образом образцах будут проводиться исследования оптических гаммовских состояний.

Для создания образцов необходимо определить оптимальные условия одноосной ориентации фотоориентанта. Для этого слой фотоориентанта PAzo толщиной 30 нм наносился на стеклянную подложку. Для ориентации молекул использовалась третья гармоника (длина волны 355 нм) импульсного Nd:YAG лазера. Интегральная мощность лазера менялась в диапазоне от 14 до 150 мВт/см², частота следования импульсов составляла 10 Гц, длительность импульсов – 7 нс (на рис. 2). Время экспозиции варьировалось для разных серий образцов от 5 минут до нескольких часов, диаметр области экспонирования составлял 5 мм².

Оптические свойства получившихся плёнок фотоориентанта характеризованы методом эллипсометрии. Было обнаружено изменение показателя преломления плёнки в области экспонирования, что свидетельствует о возникновении ориентации молекул фотоориентанта вдоль направления, перпендикулярного плоскости поляризации ультрафиолетового света. На рис. 3 представлены зависимости измеренных эллипсометрических параметров I_s и I_c в зависимости

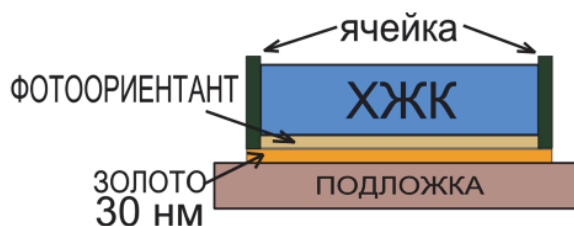


Рис. 1. Схема образца

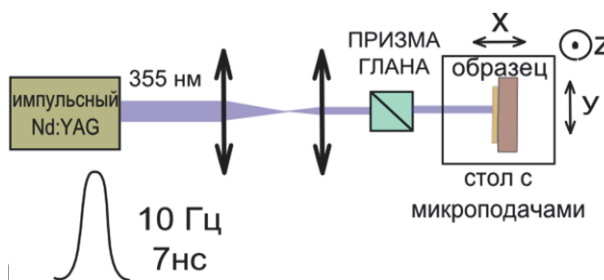


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

от длины волны зондирующего света в методе эллипсометрии.

При интегральной мощности 50 мВт/см² и времени экспонирования 20 минут (диаметр области экспонирования – 7 мм) наблюдается отличие между эллипсометрическими кривыми для экспонируемых областей образца для случая, когда молекулы фотоориентанта лежат в плоскости падения линейно-поляризованного света, и для случая, когда они перпендикулярны плоскости. Обнаружено изменение показателя преломления плёнки в области экспонирования, а также что общий характер кривых, соответствующих экспонируемым областям, аналогичен характеру кривой неэкспонируемой области. Это свидетельствует о возникновении ориентации молекул фотоориентанта. При мощностях более 100 мВт/см² происходит расплавление слоя фотоориентанта.

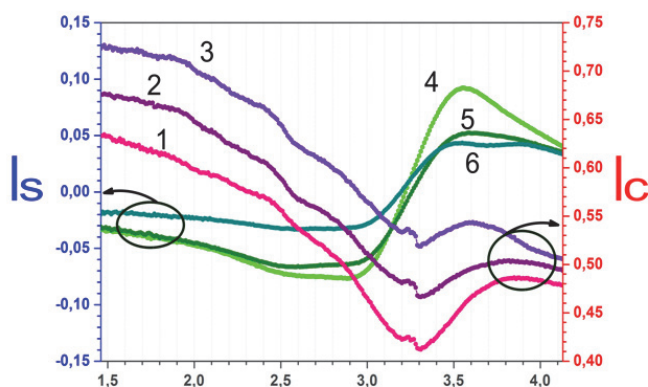
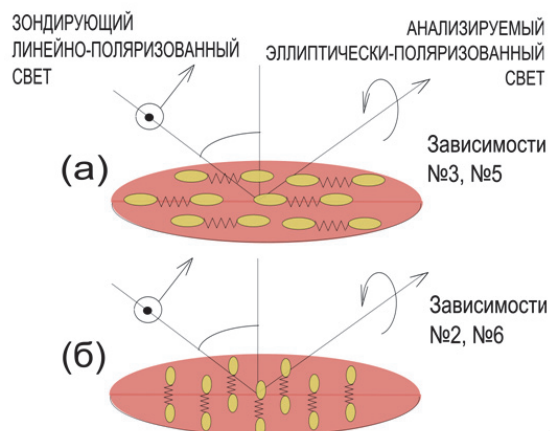


Рис. 3. (Слева) Зависимость эллипсометрических параметров от энергии фотона, где зависимости №1, №4 – неэкспонируемая область образца, зависимости №2 и №3 (а также №5 и №6) – экспонируемые области; (Справа) Рассматриваемые случаи: плоскость, содержащая зондирующий и анализируемый свет параллельна направлению ориентации молекул (а) и перпендикулярна



2.2 Численное моделирование оптического таммовского состояния, возникающего в системе ХЖК-металл

Для определения свойств оптической системы ХЖК – металл при известных оптических (диэлектрические проницаемости) и геометрических параметрах использовался матричный 4x4 метод Берремана, основанный на уравнениях Максвелла [8]. Метод является универсальным, поскольку учитывает многократные отражения в слоистых структурах. Холестерический жидкий кристалл представлялся в виде совокупности большого числа плоскопараллельных тонких однородных слоёв с заданным направлением ориентации молекул. В этом случае матрица распространения ХЖК Берремана может быть рассчитана путём последовательного умножения друг на друга матриц распространения каждого слоя разбиения.

В качестве основы для моделирования был выбран ХЖК с периодом направления вектора ориентации молекул равным 465 нм, толщина кристалла составляет 3695 нм (≈ 8 периодов). Толщина слоя разбиения равнялась $1/256$ периода. Также для моделирования были взяты следующие значения диэлектрических проницаемостей ХЖК [9]:

$$\varepsilon_{\parallel} = 2,52 + 5,65 \cdot 10^4 / \lambda^2 - 6,0 \cdot 10^{-4} i$$

$$\text{и } \varepsilon_{\perp} = 2,25 + 2,30 \cdot 10^4 / \lambda^2 - 6,0 \cdot 10^{-4} i,$$

где λ – длина волны падающего на образец света (λ в нм).

На рис. 4 показаны спектры коэффициентов пропускания и отражения для циркулярно-поляризованного излучения, падающего под нормалью из воздуха на систему ХЖК – полубесконечный слой стекла (коэффициент преломления

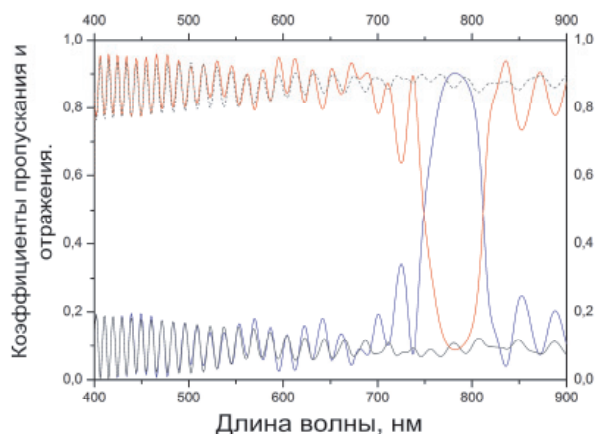


Рис. 4. Цветными линиями представлены линии для право-циркулярно поляризованного света: красная линия – коэффициент пропускания, синяя – коэффициент отражения; чёрными линиями изображены спектры для лево-циркулярно поляризованного света: пунктир – коэффициент пропускания, сплошная – коэффициент отражения

стекла равен 1,5). Центр фотонной запрещённой зоны соответствует длине волны падающего света 725 нм. Показано, что ФЗЗ для данного ХЖК возникла только при право-циркулярно поляризованном свете.

Для проверки утверждения о существовании пика пропускания в спектре коэффициента пропускания ФЗЗ в случае создания дефекта в структуре холестерического жидкого кристалла [4] были смоделированы случаи сдвига фаз и внедрения изотропного слоя. Оба дефекта были реализованы в середине ХЖК.

В первом случае на рис. 5 сдвиг фазы направления ориентации молекул составлял $-\pi/2$. Полученный пик пропускания (736 нм) для данного значения сдвига фазы находится в середине ФЗЗ. Во втором случае на рис. 6 в качестве дефектного

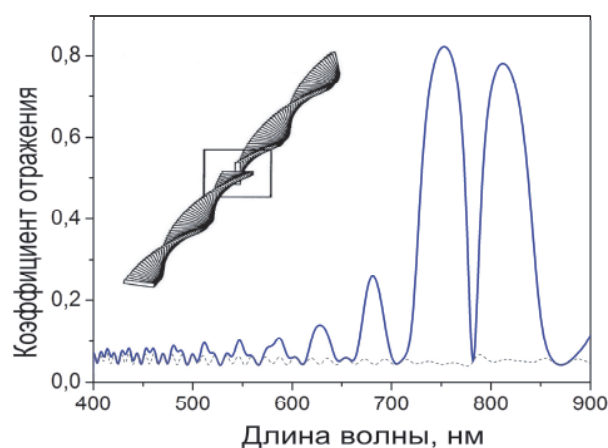


Рис. 5. Зависимость спектра коэффициента отражения от длины волны излучения для сдвига фазы. Сплошная синяя линия – право-циркулярно поляризованная волна, пунктир – лево-циркулярно поляризованная; на вставке изображён сдвиг фазы в ХЖК

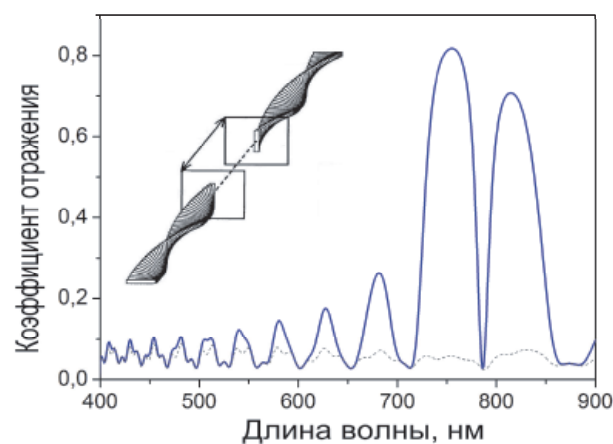


Рис. 6. Зависимость спектра коэффициента отражения от длины волны излучения для дефектного слоя. Сплошная синяя линия – право поляризованная волна, пунктир – лево поляризованная; на вставке изображён дефектный слой в ХЖК

изотропного слоя взято стекло (толщина стекла составляет 200/256 периода кристалла, коэффициент преломления – 1,5).

Для получения оптического таммовского состояния, возникающего в системе ХЖК-металл, была смоделирована система ХЖК-золотая плёнка-полубесконечный слой стекла (толщина золотой плёнки равна 40 нм). На рис. 7 показаны спектры коэффициента пропускания моделируемой системы. Виден острый пик пропускания на длине волны 715 нм, лежащий внутри ФЗЗ, соответствующий возбуждению ОТС. Прерывистая линия соответствует спектру коэффициента пропускания системы ХЖК-полубесконечный слой стекла.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована возможность экспонирования фотоориентанта PAzo при помощи линейно-поляризованного излучения третьей гармоники (длина волны 355 нм) импульсного Nd:YAG лазера в диапазоне мощностей 2-150 мВт/см² и временем экспозиции 2 минуты – 2 часа. Методом эллипсометрии обнаружено изменение показателя преломления плёнки в области экспонирования (при мощностях 50 мВт/см² и времени экспонирования 20 мин), что свидетельствует о возникновении ориентации молекул фотоориентанта. При моделировании структурных дефектов в холестерическом жидком кристалле были получены пики пропускания, лежащие внутри фотонной запрещённой зоны ХЖК. В системе ХЖК-металл-полубесконечное стекло обнаружено возникновение оптического таммовского состояния, которое проявляется в виде резонанса коэффициента пропускания в спектральной области фотонной запрещённой зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gennes P. G. and Prost J., The Physics of Liquid Crystals, 2nd ed. (Clarendon Press, Oxford, 1993), pp, 271-280
2. Afinozenov B.I., Bessonov V. O., Nikulin A. A., & Fedyanin A. A. (2013). Observation of hybrid state of Tamm and surface plasmon-polaritons in one-dimensional photonic crystals // Applied Physics Letters, 103(6), 061112.
3. Ha N. Y., Ohtsuka Y., Jeong S. M., Nishimura S., Suzuki G., Takamishi Y., & Takezoe H. (2007). Fabrication of a

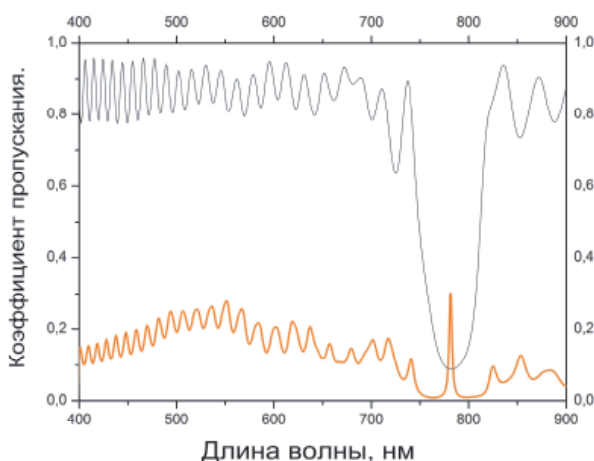


Рис. 7. Зависимости спектров коэффициентов пропускания от длины волны излучения: оранжевая линия – для системы ХЖК-металлическая плёнка-полубесконечное стекло; сплошная линия – для системы ХЖК-полубесконечный слой стекла

simultaneous red–green–blue reflector using single-pitched cholesteric liquid crystals // Nature materials, 7(1), 43-47.

4. Yang Y. C., Kee C. S., Kim J. E., Park H. Y., Lee J. C., & Jeon Y. J. (1999). Photonic defect modes of cholesteric liquid crystals. Physical Review E, 60(6), 6852.
5. Гибридные состояния таммовских и поверхностных плазмон-поляритонов в одномерных фотонных кристаллах / В.О. Бессонов, И.В. Соболева, Б.И. Афиногенов, Д. Н. Гулькин, Д. А. Шилкин, А. Т. Ле, А.А. Федянин // Ученые Записки Физического Факультета, 1, 141202, (2014).
6. Tamaoki N. (2001). Cholesteric liquid crystals for color information technology. Advanced Materials, 13(15), 1135-1147.
7. Bobrovsky A., Ryabchun A., & Shibaev V. (2011). Liquid crystals photoalignment by films of side-chain azobenzene-containing polymers with different molecular structure // Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 218(1), 137-142.
8. Bethune D.S. (1991). Optical harmonic generation and mixing in multilayer media: extension of optical transfer matrix approach to include anisotropic materials // JOSA B, 8(2), 367-373.
9. Park J. R., Ryu G., Byun J., Hwang, H., Kim S. T., & Kim, I. (2002). Numerical modeling and simulation of a cholesteric liquid crystal polarizer // Optical review, 9(5), 207-212.

OPTICAL TAMM STATES AT THE CHOLESTERIC LIQUID CRYSTAL/METAL INTERFACE

© 2015 D.N. Gulkin, V.O. Bessonov, I.V. Soboleva, A.A. Ezhov, A.A. Fedyanin

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics

The following study is concerned with theoretical investigation of Optical Tamm States (OTS) in the cholesteric liquid crystal (CLC) – metal structure, and with development of a method of creation samples of structures based on the CLC for observation Optical Tamm States. The calculated reflectance and transmittance spectra of the CLC – metal structures are shown when the OTS is excited. Method of creation an optical contact between the metal film and the CLC by applying a PAzo thin film as photoaligning substrate (which starts the orientation process of the CLC) to the metal film is demonstrated. The possibility of orientation of the photoalignment molecules is demonstrated by using linearly polarized third harmonic radiation and a Nd:YAG pulse oscillator was used as the source of the radiation.

Key words: Optical Tamm States, Cholesteric Liquid Crystals, nanoplasmonic, nanophotonics.

Dmitriy Gulkin, Graduate Student.

E-mail: gulkin@nanolab.phys.msu.ru

*Vladimir Bessonov, Candidate of Physics and Mathematics,
Leading Research Fellow.*

*Irina Soboleva, Candidate of Physics and Mathematics, Senior
Research Fellow.*

*Alexander Ezhov, Candidate of Physics and Mathematics,
Senior Research Fellow.*

*Andrey Fedyanin, Doctor of Physics and Mathematics,
Professor at the Chair of Quantum Electronics.*

E-mail: fedyanin@shg.ru