УДК: 535.3 + 535.5

DOI: 10.18384/2310-7251-2017-3-97-107

МИКРОСТРУКТУРЫ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ БОРОСИЛОКСАНА. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНОЙ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Мащенко В.И., Соломатин А.С., Шашкова Ю.О., Беляев В.В.

Московский государственный областной университет,
учебно-научная лаборатория теоретической и прикладной нанотехнологии
105005, г. Москва, ул. Радио, д. 10А, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена комплексному исследованию вопроса получения и использования жидкокристаллических композитов на основе боросилоксана. Авторами по оригинальной методике были получены жидкокристаллические композиты. Теоретически и экспериментально исследована их микроструктура. Смоделированы оптические свойства нематических ЖК доменов в изотропной фазе. Материалы на базе исследованных ЖК-композитов, а также разработанные методы определения оптических характеристик и размеров ЖК доменов имеют прикладное значение при проектировании ЖК индикаторных средств, например микрорезонаторов и электрооптических датчиков.

Ключевые слова: жидкокристаллический оптически анизотропный композит, боросилоксан, домены ЖК, моделирование оптических свойств.

MICROSTRUCTURES OF LIQUID CRYSTALLINE COMPOSITES BASED ON BOROSILOXANE. OPTICAL PROPERTIES OF THEIR DISPERSION LIQUID CRYSTALLINE STRUCTURE

V. Mashchenko, A. Solomatin, Yu. Shashkova, V. Belyaev

ul Radio 10A, 105005 Moscow, Russian Federation
Education & Research Lab of Theoretical and Applied Nanotechnology

Abstract. We report a complex study of the problem of obtaining and using borosiloxane-based liquid crystalline composites. Using an original method, we have obtained liquid crystal composites. Their microstructure is theoretically and experimentally studied. Optical properties of nematic LC domains in the isotropic phase are simulated. Materials on the basis of the investigated LC composites, as well as developed methods for determining the optical characteristics and sizes of LC domains, can have practical importance in the design of LC indicators, for example, microresonators and electro-optical sensors.

Key words: liquid crystal optically anisotropic composite, borosiloxane, LC domains, simulation of optical properties.

Введение

ЖК-композиты, где в качестве функционального элемента оптического или электрооптического устройства используются капли ЖК, известны достаточно давно [1; 3]. В последнее время в связи с миниатюризацией электронных устройств развитие получили подходы, где рабочим элементом устройства является единичная микрокапля ЖК, заключённая в поддерживающую матрицу. В качестве такой матрицы часто используются силиконовые материалы [7] благодаря их оптической прозрачности, доступности и технологичности. К новым материалам, где в качестве работающего элемента используется единичная капля, относятся микрорезонаторы, работающие на эффекте шепчущей галереи (Whispering-gallery mode (WGM)) [10]. Волны шепчущей галереи – физический эффект (рис. 1; 2), состоящий в распространении волн вблизи изогнутых границ раздела двух сред [2].

Рис. 1. Ход лучей WGM резонанса в малых (диаметр 11,7 мкм) ЖК каплях-резонаторах и ориентация молекул ЖК в них. 1 – падающий по касательной луч; 2 – выходящий (тоже по касательной) луч; 3 – луч, претерпевающий многократное полное внутреннее преломление в ЖК капле и обходящий её вокруг; 4 – диаметральной плоскости капли (в неё входит луч 1 и выходит луч 2), содержащая луч 3; 5 – капля ЖК; 6 – гомеотропно (радиально) ориентированная молекула ЖК; 7 – поляризация луча перпендикулярна оси ЖК молекул; 8 – поляризация луча в плоскости осей ЖК молекул

Как показано на рис. 2, зависимость резонанса WGM в нематической ЖК капле от направления поляризации входящего и исходящего пучков демонстрирует изменение интенсивности света, излучённого модами шепчущей галереи резонанса, в зависимости от направления поляризации входящего и исходящего пучка света. Горизонтальное направление соответствует ТМ модам шепчущей галереи.

Возможные волны в диэлектрическом шаре подразделяются на два класса. Один из этих классов не имеет составляющих (проекций) электрического поля по направлению радиуса шара. Такой класс волн получил название поперечно-электрического и обозначается символом ТЕ. Другой класс волн не имеет ради-

альной составляющей магнитного поля. Он называется поперечно-магнитным и обозначается символом ТМ.

Если диэлектрический шар будет подвержен воздействию внешней электромагнитной волны, то в шаре возникнет (возбудится) тот тип волны, для которого частота воздействующего поля является резонансной, то есть близкой к его собственной частоте. Это, конечно, не означает, что другие типы волн совсем не возбуждаются, но их амплитуды будут значительно меньше амплитуды резонансного типа. Именно это и показано на рис. 2.

Рис. 2. Поляризационные свойства WGM резонанса в малых (диаметр 11,7 мкм) ЖК капля-резонаторах. 1 – поляризация падающего луча (лазер); 2 – плоскость анализатора

Длина волны видимого электромагнитного излучения (света) меньше микрона. Поэтому в диэлектрическом шаре, радиус которого порядка десятка микрон, уже может существовать электромагнитная (световая) волна шепчущей галереи.

Полупроводниковые лазеры генерируют сравнительно широкий спектр частот. Это обстоятельство ограничивает возможность их применений для точных частотных измерений. Поэтому исследователи и инженеры разрабатывают методы сужения спектра генерации полупроводниковых лазеров с помощью внешних резонансных устройств. Моды шепчущей галереи в диэлектрических микрошарах являются одним из лучших кандидатов для решения проблемы частотной стабилизации полупроводникового лазера.

Важным параметром для использования микрокапли ЖК в качестве элемента электронно-оптического устройства является ориентация молекул ЖК на поверхности и в объёме капли.

Целью данной работы является экспериментальное исследование микроструктуры жидкокристаллических композитов на основе боросилоксана и сравнение полученных данных с результатами моделирования оптических свойств.

крофиламент ЖК распадался во времени на капли в соответствии с явлениями, описываемыми в рамках концепции неустойчивости Рэлея–Тейлора.

Методом оптической поляризационной микроскопии охарактеризовали микроструктуру образцов ЖК-композиов (рис. 4).

Рис. 4. Микрофотографии хронологии последовательного формирования цилиндрических и сферических структур образцов ЖК-композиов на основе БС и ЖК-1282. Сверху вниз виден процесс превращения во времени цилиндра с ЖК в микрокапли: 1 минута; 10 минут; 3 часа

Рис. 5. Микрофотография сферических капель в ЖК-композиатах на основе БС и ЖК-1282

Рис. 6. Гистограмма статистического распределения диаметра сферических капель

На рис. 6 показано статистическое распределение сферических капель по величине, которое можно увидеть на рис. 5.

Моделирование оптических свойств ЖК-композитов

Как было показано выше, получены экспериментальные данные (оптические) о пропускании поляризованного света через вышеописанную пространственно неоднородную оптически анизотропную среду при скрещённых поляризаторах.

В работах [6; 8; 9] были получены результаты моделирования оптических свойств для различных пространственно-ориентированных ЖК структур как осесимметричных (цилиндрических), так и сферических.

Смоделированы домены нематического ЖК, внешняя сторона которых не оказывает заметного ориентирующего влияния, а центральная часть (ядро) доменов покрыта гомеотропно ориентирующим покрытием. Ячейка ЖК помещалась между скрещёнными поляризатором и анализатором. Были приняты (рис. 7) следующие условия для компьютерной модели оптически анизотропного цилиндрического нематического ЖК домена (образующегося вокруг цилиндрического тела, введённого в изотропную среду).

Рис. 7. Цилиндрический домен: центр системы координат в центре домена, оси OX и OZ лежат в плоскости слоя ЖК в ячейке

Ось OY перпендикулярна двум другим осям и плоскости ячейки, оси OX и OZ лежат в плоскости ячейки ЖК. Луч света падает нормально (вдоль оси OY). Директор ЖК в цилиндрическом домене ориентирован радиально, так как поверхность центрального тела ориентирует гомеотропно прилегающий слой ЖК. Посередине между поверхностями ячейки находится цилиндрическое тело с осью, совпадающей с OZ, и оптически оно аналогично изотропной среде (имеет такой же показатель преломления). Изотропная и анизотропная среда полностью прозрачна. Расчётные данные интенсивности для света, прошедшего через анизотропный ЖК домен, приведены на рис. 8 (приведены нормированные величины интенсивности света). Толщина слоя ЖК $L = 1$ мкм. Нематический ЖК домен во всю толщину слоя ЖК в ячейке, радиус домена $L/2$. Обыкновенный показатель преломления нематического ЖК $n_o = 1,5$, необыкновенный $n_e = 1,55$. Длина волны $\lambda = 630$ нм. Домен ЖК не искажает свою радиально ориентированную структуру там, где он прилегает к поверхности ячейки.

Для рассмотренных в данной работе параметров преломляющих систем по формуле линзы

$$\frac{n_o}{f} = (n - n_o) \left\{ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n - n_o)d}{nR_1R_2} \right\}$$

фокусное расстояние составляет около 80 мкм для $n_o = 1,5$, $n_e = 1,55$. Поэтому пренебрегаем нелинейностью распространения света.

Рис. 8. Интенсивность света, прошедшего через цилиндрический домен, в зависимости от относительного диаметра центрального тела. $L = 10$ мкм, $n_o = 1,5$, $n_e = 1,55$.

Те же результаты были получены и для $n_o = 1,5$, $n_e = 1,45$

Условия для модели образующегося вокруг сферического тела, введённого в изотропную среду, оптически анизотропного нематического ЖК домена (рис. 9) аналогичны рассмотренным выше случаям. Центр сферического тела находится посередине слоя ЖК в ячейке, на расстоянии $L/2$ от каждой из сторон ячейки. В областях, где сферический ЖК домен прилегает к поверхности, он не искажает свою радиально ориентированную структуру.

Рис. 9. Сферический домен: оси OX и OZ лежат в плоскости слоя ЖК в ячейке

На рис. 10 показана интенсивность света, прошедшего через сферический домен.

Толщина слоя ЖК на рис. 10 $L = 10$ мкм (слева) или 20 мкм (справа), $n_o = 1,5$, $n_e = 1,65$. Те же результаты получаются и для $n_o = 1,5$, $n_e = 1,35$.

Если вышеописанные сферические и цилиндрические домены рассматривать при радиусе центрального тела, равном нулю (рис. 11), то пропускание ими луча света в скрещённых поляроидах будет такое же, как в доменах ЖК в полимерной изотропной матрице, при гомеотропно ориентирующей поверхности домена, состоящей из полимерного материала (при радиально ориентированном директоре ЖК), и при показателе преломления полимерного материала, равном обыкновенному показателю преломления ЖК материала.

Рис. 10. Интенсивность света, прошедшего через сферический домен, диаметр центрального тела 0,5 от диаметра домена

Рис. 11. Интенсивность света, прошедшего через сферический домен, диаметр 10 мкм, $n_0=1,5$, $n_c=1,55$ (слева) или 1,65 (справа). Нет центрального тела

Анализ экспериментальных и смоделированных оптических свойств ЖК-композитов

Таким образом, луч лазера, превосходя по диаметру капли ЖК, будет как проходить их насквозь на большей части площади их сечения (большой частью своей энергии), так и формировать WGM-спектр (рис. 1, рис. 2) меньшей частью своей энергии.

Луч лазера будет формировать при анализаторе, скрещённом с плоскостью поляризации входящего луча, как изображенные на рис. 5–6, рис. 7, рис. 10, рис. 11 зависимости интенсивности прошедшего луча, так и изображенные на рис. 2 спектры WGM-резонансных лучей для скрещённых плоскостей поляризации луча и анализатора. Будет формироваться многополосный спектр с неравномерной интенсивностью полос.

При достаточной концентрации капель (рис. 5) в достаточно толстом слое композита прошедший одну каплю луч будет снова трансформироваться на следующей капле, WGM-спектр которой зависит от её диаметра и не совпадает (в общем случае) с WGM-спектром предыдущей капли.

Таким образом, в толстых ПДЖК плёнках будет формироваться широкополосный спектр прошедшего света. По мере роста толщины ПДЖК, свет будет

распределяться всё более равномерно в пределах полосы частот ниже частоты исходного луча лазера.

Однако если обеспечить равномерность капель ЖК, то, наоборот, луч лазера постепенно трансформируется в узкий (по полосе частот) луч WGM-резонансного максимума.

Если обеспечить несколько фиксированных диаметров капель ЖК, то получим соответствующие несколько лучей WGM-резонансных максимумов для капель с заранее predetermined пропорцией их интенсивностей.

Выводы

Впервые предложен на основе ЖК-композита оптический трансформатор (преобразователь) луча лазера в заранее predetermined совокупность поляризованных лучей с заданными узкими частотными полосами, плоскостями поляризации и интенсивностями.

Предложен метод формирования ЖК-композита.

* * *

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-57-00089Бел_а и гранта Президента № МК-7359.2016.9.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев В.В. Дисплеи 90-х годов. М.: Российское отделение общества информационных дисплеев, 2000. 92 с.
2. Виноградов А.В., Ораевский А.Н. Волны шепчущей галереи // Соросовский образовательный журнал. Т. 7. 2001. № 2. С. 96–102.
3. Жаркова Г.М., Сонин А.С. Жидкокристаллические композиты / отв. ред. В.П. Шибаев; Рос. АН, Сиб. отд-ние, Ин-т теорет. и прикл. механики. Новосибирск: Наука: Сиб. изд. фирма, 1994. 211 с.
4. Машенко В.И., Алексеев А.Н., Картавенко Т.В., Оленин А.В. Способ получения масс для лепки с биоцидными свойствами. Патент РФ №2473216. Дата публикации патента: 27 января 2013 г.
5. Митрофанов Л.А., Сидорович Е.А., Карлин А.В., Марей А.И. К вопросу о межмолекулярном взаимодействии в полибордиметилсилоксанах // Высокомолекулярные соединения. Т. (А) 11. 1969. № 4. С. 782–788.
6. Соломатин А.С. Ориентационные и оптические свойства доменов жидкого кристалла с центральной ориентирующей и внешней неориентирующей поверхностью // Жидкие кристаллы и их практическое применение. Т. 16. 2016. № 3. С. 39–48.
7. Bedjaoui L., Benmouna M., Maschke U. Thermophysical analysis of polysiloxane and nematic liquid crystal mixture // Physical Chemical News. Vol. 49. 2009. P. 121–124.
8. Belyaev V.V., Gorbunov A., Solomatin A.S., Suarez D. Light propagation through composite heterophase objects with liquid crystal material // Procedia Computer Science. Vol. 103. 2017. P. 556–561. DOI: 10.1016/j.procs.2017.01.060
9. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Suarez D., Molina F., Smirnov A. Light Propagation through Composite Heterophase Objects with Liquid Crystal Material // SID'16 Digest. 2016. P. 1632–1635. DOI: 10.1002/sdtp.11045.
10. Humar M., Ravnik M., Pajk S., Muševič I. Electrically tunable liquid crystal optical microresonators // Nat. Photonics. Vol. 3. 2009. P. 595–600.

REFERENCES

1. Belyaev V.V. *Displei 90-kh godov* [Displays the 1990s]. Moscow, Russian Branch of the Information Display Society Publ., 2000. 92 p.
2. Vinogradov A.V., Oraevsky A.N. [Whispering gallery waves]. In: *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal* [Soros Educational Journal], vol. 7, 2001, no. 2, pp. 96–102.
3. Zharkova G.M., Sonin A.S. *Zhidkokristallicheskiye kompozity* [Liquid crystal composites]. Novosibirsk, Science: Sib. ed. firm Publ., 1994. 211 p.
4. Mashchenko V.I., Alekseev A.N., Kartavenko T.V., Olenin A.V. [A method for producing masses for modeling with biocidal properties. Patent of the Russian Federation no. 2473216. Patent publication date: January 27, 2013].
5. Mitrofanov L.A., Sidorovich E.A., Karlin A.V., Marei A.I. [The problem of intermolecular interaction in polybordinemethylsiloxane]. In: *Vysokomolekulyarnye soedineniya* [High-molecular weight compounds], vol. (A) 11, 1969, no. 4, pp. 782–788.
6. Solomatin A.S. [Orientational and optical properties of the domains of the liquid crystal with a central orienting and external non-orienting surface]. In: *Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe primeneniye* [Liquid crystals and their practical application], vol. 16, 2016, no. 3, pp. 39–48.
7. Bedjaoui L., Benmouna M., Maschke U. Thermophysical analysis of polysiloxane and nematic liquid crystal mixture. In: *Physical Chemical News*, vol. 49, 2009, pp. 121–124.
8. Belyaev V.V., Gorbunov A., Solomatin A.S., Suarez D. Light propagation through composite heterophase objects with liquid crystal material. In: *Procedia Computer Science*, vol. 103, 2017, pp. 556–561. DOI: 10.1016/j.procs.2017.01.060.
9. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Suarez D., Molina F., Smirnov A. Light Propagation through Composite Heterophase Objects with Liquid Crystal Material. In: *SID'16 Digest*, 2016, pp. 1632–1635. DOI: 10.1002/sdtp.11045.
10. Humar M., Ravnik M., Pajk S., Muševič I. Electrically tunable liquid crystal optical microresonators. In: *Nat. Photonics*, vol. 3, 2009, pp. 595–600.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мащенко Владимир Игоревич – кандидат химических наук, старший научный сотрудник учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии Московского государственного областного университета;
e-mail: mashchenko@genebee.msu.su

Соломатин Алексей Сергеевич – кандидат физико-математических наук, инженер учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии Московского государственного областного университета;
e-mail: Sotrudnica_UNC@mail.ru

Шашкова Юлия Олеговна – инженер учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии Московского государственного областного университета;
e-mail: pirmir123@mail.ru

Беляев Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики Московского государственного областного университета;
e-mail: vic_belyaev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir I. Mashchenko – PhD in Chemistry, senior researcher of the Education & Science Lab for Theoretical and Applied Nanotechnology, Moscow Region State University;
e-mail: mashchenko@genebee.msu.su

Aleksei S. Solomatin – PhD in Physics and Mathematics, engineer of the Education & Science Lab for Theoretical and Applied Nanotechnology, Moscow Region State University;
e-mail: Sotrudnica_UNC@mail.ru

Julia O. Shashkova – engineer of the Education & Science Lab for Theoretical and Applied Nanotechnology, Moscow Region State University;
e-mail: pirmir123@mail.ru

Victor V. Belyaev – Doctor of Engineering, professor, head of the Department of Theoretical Physics, Moscow Region State University;
e-mail: vic_belyaev@mail.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Мащенко В.И., Соломатин А.С., Шашкова Ю.О., Беляев В.В. Микроструктуры жидкокристаллических композитов на основе боросилоксана. Оптические свойства дисперсной жидкокristаллической структуры на их основе // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2017. № 3. С. 97–107.
DOI: 10.18384/2310-7251-2017-3-97-107

CORRECT REFERENCE TO THE ARTICLE

Mashchenko V.I., Solomatin A.S., Shashkova Yu.O., Belyaev V.V. Microstructures of Liquid Crystalline Composites Based on Borosiloxane. Optical Properties of Their Dispersion Liquid Crystalline Structure. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2017, no. 3, pp. 97–107.
DOI: 10.18384/2310-7251-2017-3-97-107