

УДК 535.012.2

DOI: 10.18384/2310-7251-2016-4-32-42

ОРИЕНТАЦИОННЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СФЕРИЧЕСКИХ ДОМЕНОВ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА С ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОРИЕНТИРУЮЩЕЙ И ВНЕШНЕЙ НЕОРИЕНТИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Соломатин А.С., Беляев В.В.

Московский государственный областной университет

105005, г. Москва, ул. Радио, д. 10А, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены нематические ЖК домены, центральная часть (ядро) которых покрыта ориентирующим покрытием, обеспечивающим заданный угол преднаклона директора, а внешняя сторона домена не оказывает существенного ориентирующего влияния. Предложен метод расчёта и выполнена теоретическая и компьютерная модель зависимости разности фазовой задержки $\Delta\Phi$ от координат места прохода луча света сквозь домен. Предложены методы определения геометрических параметров домена и его двулучепреломления по наблюдаемой оптической картине.

Ключевые слова: нематические жидкие кристаллы, домены, оптическая анизотропия, двулучепреломление.

ORIENTATIONAL AND OPTICAL PROPERTIES OF LIQUID-CRYSTAL DOMAINS BOUNDED BY CENTRAL ORIENTING AND SURROUNDING NONORIENTING SURFACES

A. Solomatin, V. Belyaev

Moscow Region State University

ul. Radio 10a, 105005 Moscow, Russia

Abstract. We consider nematic liquid-crystal (LC) domains, the central part (core) of which has an orienting coating providing a predetermined angle of the director pretilt and the outer side of the domain does not exert any significant orienting influence. We propose a calculation method and construct a theoretical and computational model of the dependence of the phase delay difference $\Delta\Phi$ on the coordinates of the light beam propagation through the domain. The methods are proposed for determining the geometric parameters of the domain and its birefringence in the observed optical pattern.

Keywords: nematic liquid crystal, domains, optical anisotropy, birefringence.

ВВЕДЕНИЕ

Жидкие кристаллы (ЖК) используются при создании индикаторных устройств, модуляторов, дефлекторов, индикаторов температуры и акустических полей, плоских телевизионных экранов (дисплеев).

Получение и исследование композитных материалов, объединяющих электрооптические свойства жидких кристаллов и механические свойства полимеров (полимер-диспергированные жидкие кристаллы, *polymer dispersed liquid crystal* – в дальнейшем ПДЖК [1–6]), является одним из перспективных направлений развития современной оптоэлектроники.

Одним из перспективных направлений развития является применение в оптических устройствах мультидоменных структур. ЖК-ячейки с такими структурами в отсутствие управляющего напряжения содержат несколько областей с однородной ориентацией молекул нематика. В связи с этим поиск более дешёвых, доступных и технологических подходов к формированию мультидоменных структур, а также исследование их физических характеристик является актуальной технической задачей. На примере ряда ЖК материалов, структурированных микро- и нанообъектами рассмотрено влияние их на свойства ЖК систем. Исследуются вопросы улучшения оптических характеристик. Установлено, что введение микро- и наночастиц, например, кремнезема, фуллеренов, нанотрубок в материалы вызывает изменение параметров среды вне зависимости от вида вводимого нанообъекта [2; 4; 5].

Для прогнозирования зависимости [6–9] оптических свойств от конфигурации домена в ЖК-ячейке необходимо разработать методы расчета для однородно ориентированного нематика с учётом граничных условий для угла наклона директора на подложках, то есть микро- и нанорельефе поверхности, в том числе молекулярном [10].

Целью работы является моделирование пространственно неоднородных структур ЖК и их оптических свойств в зависимости от размеров и формы объектов в жидком кристалле или вокруг него. На основании этого моделирования возможно и решение обратных задач, как определение размеров и формы объектов в жидком кристалле или вокруг него или определение показателя двулучепреломления жидкого кристалла стало задачами данной работы. Особенностью исследования является варьирование граничных условий на поверхности раздела ЖК и микро- или нанообъекта. На первом этапе моделирования были выбраны чисто гомеотропная и чисто планарная ориентация ЖК на границе раздела, как реализующиеся во множестве практических случаев.

§1. Сферические гомеотропные нематические ЖК структуры в оптически изотропном объеме

1.1. Компьютерное моделирование.

Как и в [11–14], ячейка ЖК помещалась между скрещёнными поляризатором и анализатором. Характеристики жидких кристаллов в значительной мере определяются ориентацией молекул мезогенов на поверхности раздела фаз. В [11–14] рассматривалась зависимость интенсивности и разности фаз луча света, прошедшего через ЖК среду с неоднородным распределением директора ЖК, и приводились методики расчета и экспериментальных измерений. Для компьютерной модели сферического оптически анизотропного нематического ЖК домена (образующегося вокруг сферического тела, введенного в изотропную ЖК среду) были приняты (рис. 1) следующие условия.

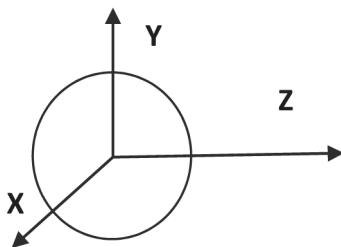


Рис. 1. Сферический домен: оси OX и OZ лежат в плоскости слоя ЖК в ячейке.

Оси OX и OZ лежат в плоскости ячейки ЖК, ось OY перпендикулярна двум другим осям и плоскости ячейки. Луч света падает нормально (вдоль оси OY). Поверхность тела ориентирует прилегающий слой ЖК гомеотропно (директор ЖК в сферическом домене ориентирован радиально). Сферическое тело с осью, совпадающей с OZ, находится посередине между поверхностями ячейки и оптически аналогично изотропной среде (имеет такой же показатель преломления). Изотропная и анизотропная среда полностью прозрачна. На рисунке 2 приведены расчётные данные интенсивности для света, прошедшего через анизотропный ЖК домен (приведены нормированные величины интенсивности света). Толщина слоя ЖК $L = 10$ микрон. Радиус нематического ЖК домена $L/2$ (домен во всю толщину слоя ЖК в ячейке). Показатели преломления нематического ЖК: обыкновенный $n_o = 1,5$, необыкновенный $n_e = 1,55$. Длина волны $\lambda = 630$ нанометров. Сферический ЖК домен не искажает свою радиально ориентированную структуру там, где он прилегает к поверхности.

По формуле линзы (1.1) $\frac{n_o}{f} = (n - n_o) \left\{ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n - n_o)d}{nR_1R_2} \right\}$ фокусное расстояние

составляет для рассмотренных в данной работе параметров преломляющих систем около 80 мкм для $n_o = 1,5$, $n_e = 1,55$. Поэтому пренебрегаем нелинейностью распространения света.

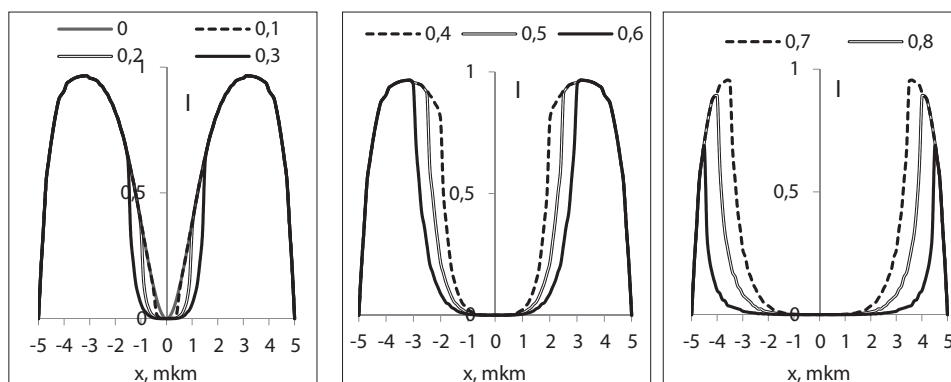


Рис. 2. Интенсивность света, прошедшего через сферический гомеотропный домен, в зависимости от относительного диаметра центрального тела.

$L = 10$ микрон, $n_o = 1,5$, $n_e = 1,55$.

Интенсивность света, прошедшего через сферический домен показана на рис. 3. Толщина слоя ЖК на рис. 3 $L = 10$ (слева) или 20 (справа) микрон, $n_o = 1,5$, $n_e = 1,65$.

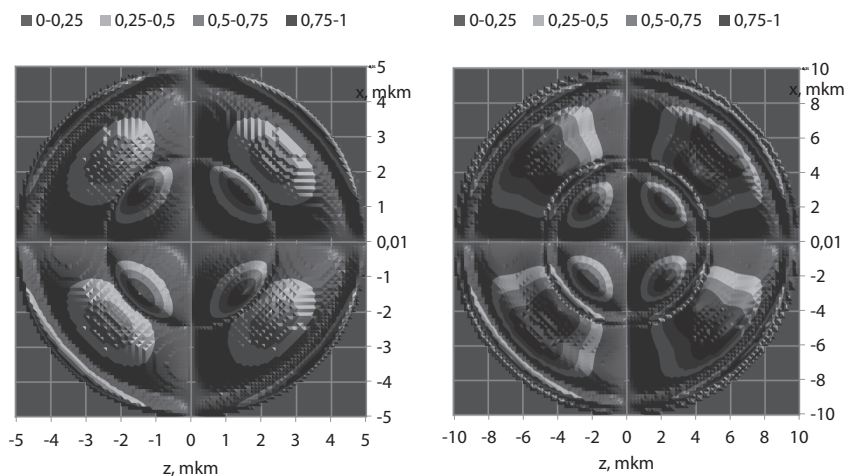


Рис. 3. Интенсивность света, прошедшего через сферический домен, диаметр центрального тела 0,5 от диаметра домена.

1.2. Обсуждение результатов компьютерного моделирования

Как видно из результатов компьютерного моделирования, изменение относительного размера центрального тела и изменение радиуса сферического ЖК домена влияют на формирование оптической картины существенно различным образом. В выше рассмотренных случаях, как правило, достаточно отчётливо видно резкое изменение яркости вблизи границ проекции центрального тела. По этому признаку (кольцевая область с очень высокой контрастностью) можно оценить радиус центрального тела, хотя и не вполне точно. Важно не только наличие кольцевой высококонтрастной области, но и характерное распределение экстремумов, позволяющих, сравнивая с данными моделирования (если известно двулучепреломление Δn), отождествить картину с конкретными геометрическими характеристиками домена и центрального тела.

В случае, если размеры помещённых в среду (на поверхность ячейки) тел, вокруг которых образуются домены сферической формы, известны заранее, и если удалось определить размеры сферического домена, то можно по оптической картине, сравнивая с данными моделирования, определить двулучепреломление Δn .

§2. Сферические планарные нематические ЖК структуры в оптически изотропном объёме

2.1. Компьютерное моделирование

Луч света падает нормально (вдоль оси OY). Ось OX лежит в плоскости поляризации падающего луча света. Ось OZ перпендикулярна плоскости поляризации

падающего луча света. Директор ЖК в сферическом домене ориентирован тангенциально. Каждый тонкий сферический слой содержит пару точек (полюсов), лежащих на оси ОУ. В полюсах сходятся линии тангенциально ориентированного директора ЖК в данном сферическом тонком слое. От полюса к полюсу линии директора ЖК образуют дугу окружности, лежащую в тонком сферическом слое.

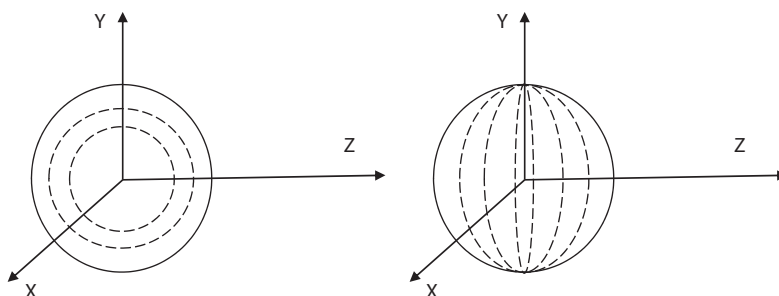


Рис. 4. Сферический домен: оси ОХ и ОZ лежат в плоскости слоя ЖК в ячейке. Слева тангенциальная ориентация с полюсами для каждого сферического слоя, расположенными на оси ОУ в этих сферических слоях. Справа полюсов два.

Диаметр D нематического ЖК домена 10 микрон. ЖК оптически аналогичный изотропной среде (имеющим такой же показатель преломления). Показатели преломления ЖК: $n_o = 1,5$, $n_e = 1,55$. Длина волны $\lambda = 630$ нанометров. Изотропную среду и анизотропную среду считаем полностью прозрачной. На рис. 5 и 6 приведены данные для интенсивности света, прошедшего через анизотропный ЖК домен. На остальных участках (на которые падает свет, не прошедший через анизотропный домен) предполагается интенсивность прошедшего света, равная падающему свету. Интенсивность падающего света принята за единицу (то есть приведены нормированные величины интенсивности света).

Также рассмотрен вариант, приведенный на рис. 4 справа, с парой полюсов (бужумов). Смоделированные результаты для такого случая незначительно отличаются от чисто сферического тангенциального распределения. Результаты для случая с парой полюсов приведены на рис. 5 справа.

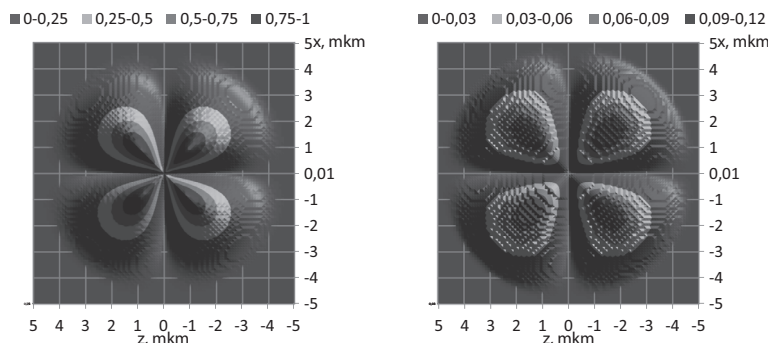
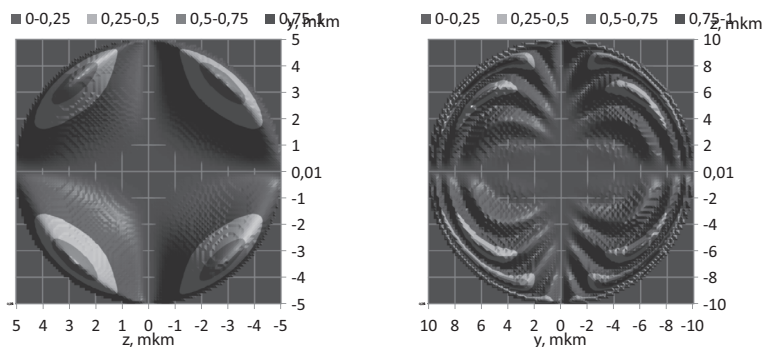


Рис. 5. Вид вдоль оси ЖК капли (с полюса)

Ниже слева на рис. 6а рассмотрен случай прохождения поляризованного света, плоскость поляризации которого параллельна оси ОУ капли, полюса капли на рисунке 6а находятся сверху и снизу. Справа на рис. 6б показан случай прохождения поляризованного света, плоскость поляризации которого перпендикулярна оси ОУ, на которой лежат полюса. Полюса на рис. 6б справа и слева.



А) $D = 10$ мкм, $n_o = 1,5$, $n_e = 1,55$

Б) $D = 20$ мкм, $n_o = 1,5$, $n_e = 1,65$

Рис. 6. Вид перпендикулярно оси ЖК капли

Как показано на рис. 5, в случае наблюдения с полюса видимый диаметр капли меньше истинного, то есть кольцевая область, ориентированная по отношению к лучу света (и наблюдателю) параллельно, выглядит чёрной. Кольцевая зона с интенсивностью сигнала ниже 0,05 от полной имеет ширину кольца около 0,1 от радиуса капли. Ниже на рис. 7, рис. 8 приведена схема тангенциальной ориентации ЖК в капле и схемы наблюдаемых оптических эффектов.

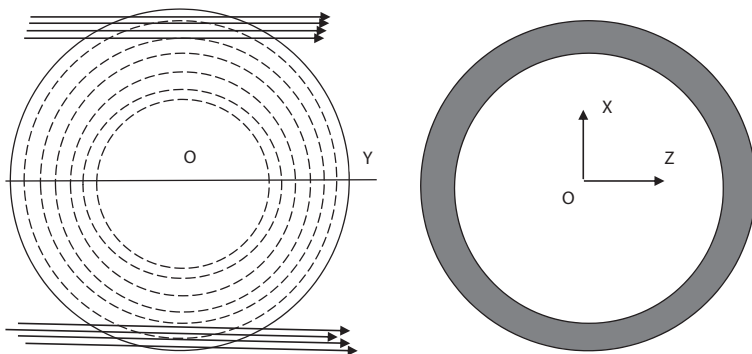


Рис. 7. Показана слева капля ЖК, на которой заштрихованы стрелками, изображающими лучи света, области капли с углами директора ЖК к лучам света, близкими к параллельным. Справа показана затемненная кольцевая зона в оптической картине, сформированной каплей, ширина которой около 0,1 радиуса капли.

Если луч света проходит под некоторым углом к продольной оси капли, то затемнённая зона будет иметь другую форму. В плоскости, содержащей луч света

и ось капли, ширина затемнённой полосы не изменится. А в перпендикулярной к ней плоскости ширина затемнённой полосы будет меньше и, по мере роста угла, станет равна нулю. При дальнейшем росте угла начнётся уменьшение ширины затемнённой зоны и в плоскости, содержащей ось капли и луч света. Постепенно, по мере приближения угла к прямому, сформируется картина, показанная на рис. 6 для наблюдения под прямым углом к оси капли. Это обусловлено тем, что при наличии угла между осью капли и лучом света, для тех молекул нематического ЖК, которые лежат в плоскости, содержащей луч и ось, ситуация не изменится и они будут приблизительно параллельны лучу света. А для молекул ЖК, лежащих в плоскости, образующей угол к плоскости, содержащей луч и ось, будет играть заметную роль угол между плоскостями. И их вклад в оптическую картину, формируемую каплей, будет отличаться от вклада параллельных к лучу молекул ЖК. Это схематически показано на рис. 8. Необходимо учитывать, что обычно нематические ЖК не ориентируются тангенциально к поверхности, а под малым углом к ней. В таком случае значительная ширина переходного слоя (длина когерентности) приводит к значительному увеличению ширины затемненной зоны в оптической картине, сформированной каплей. Это схематически показано на рис. 9.

Как было показано выше, если луч света проходит не от полюса к полюсу, а под некоторым углом к продольной оси капли, то затемненная зона будет иметь другую форму (рис. 8). По оптической картине возможно определение зависимости ориентационных углов оси капли в зависимости от приложенного поля. Также по оптической картине возможно определение приповерхностного угла ориентации директора нематического ЖК в каплях, а также толщина переходного слоя и диаметр капли. В свою очередь, по диаметру капли и параметрам переходного слоя (углу у поверхности, толщине) можно определить упругие характеристики ЖК материала.

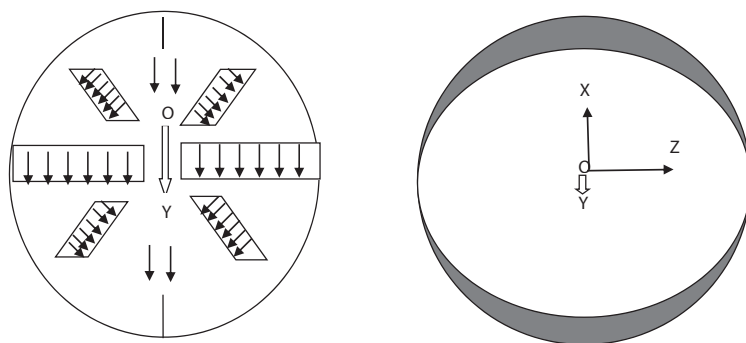


Рис. 8. Слева капля ЖК, на которой заштрихованы стрелками, изображающими директор ЖК, области капли с углами директора ЖК к лучам света, отличными от параллельных. Светлой стрелкой показана ось капли ОУ на наблюдателя (то есть по отношению к лучу света) и под углом вниз. Плоскость поляризации света на рисунке вертикальная. Справа показана затемненная некольцевая зона в оптической картине, сформированной лучом света под углом к оси ОУ капли, ширина затемнённой зоны от нуля до 0,1 радиуса капли. Плоскость поляризации света на рисунке вертикальная, вдоль оси ОХ.

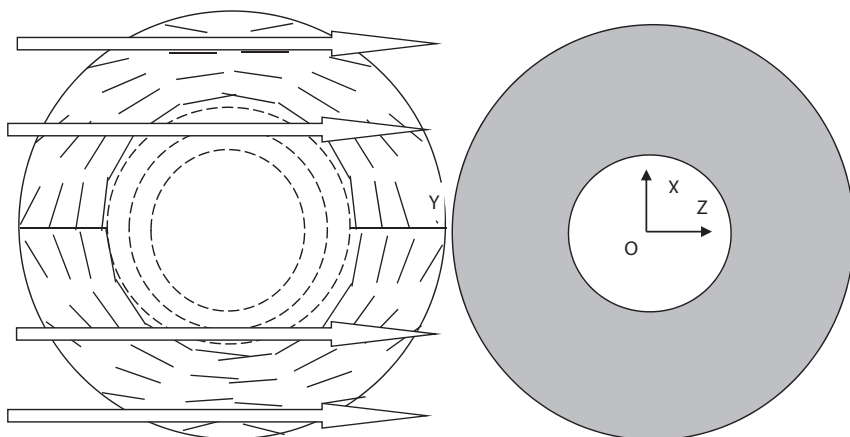


Рис. 9. Слева капля ЖК, на которой светлые стрелки, изображающие лучи света, проходят параллельно оси капли ОУ сквозь области капли с углами директора ЖК к лучам света, близкими к параллельным. Справа затемнённая кольцевая зона в оптической картине, сформированной каплей при прохождении поляризованного света параллельно оси капли ОУ, ширина которой около 0,7 радиуса капли.

§3. Выводы по сферическим доменам.

Смоделированы оптические свойства, в зависимости от размеров и оптических характеристик, сферических анизотропных нематических ЖК доменов в изотропной фазе, в том числе как планарных, так и гомеотропных. При моделировании рассмотрены как домены с центральным телом незначительного радиуса, так и сформировавшиеся вокруг крупного сферического центрального тела.

Предложено по наблюдаемой оптической картине определять размеры ЖК доменов и радиус центрального тела в них для ЖК с известными оптическими характеристиками (показателями преломления).

Предложено, при предварительно известном размере ЖК доменов и помещённых в среду доменообразующих (центральных) тел, по наблюдаемой оптической картине определять двулучепреломление ($\Delta n = n_e - n_o$) и, при известном обыкновенном показателе преломления, определять необыкновенный (n_e).

Предложенные методы определения оптических характеристик и размеров сферических ЖК доменов могут иметь прикладное значение при проектировании ЖК индикаторных средств.

Полимер-ЖК

Если анизотропные ЖК домены заключены в полимерную изотропную матрицу и показатель преломления полимерного материала равен обыкновенному показателю преломления ЖК материала, то можно рассматривать по аналогии с вышеописанными сферическими доменами при радиусе внутреннего тела, равном нулю. Результаты будут одинаковые.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А.А., Касасент Д., Компанец И.Н., Парфенов А.В. Пространственные модуляторы света. М.: Радио и связь. 1987. 320 с.
2. Каманина Н.В., Капорский Л.Н. Влияние фуллеренов на динамические характеристики жидкокристаллических систем // Письма в журнал технической физики. 2000. Т. 26. № 19. С. 30–38.
3. Жаркова Г.М., Сонин А.С. Жидкокристаллические композиты. Новосибирск: ВО «Наука». 1994. 214 с.
4. Каманина Н.В. Ракчеева Л.П. Перспективы использования фуллеренов для ориентации жидкокристаллических композиций // Письма в журнал технической физики. 2002. Т. 28. № 11. С. 28–36.
5. Каманина Н.В. Фуллеренсодержащие диспергированные нематические жидкокристаллические структуры: динамические характеристики и процессы самоорганизации // Успехи физических наук. 2005. Т. 175. № 4. С. 445–454.
6. Машин А.И. Коробков А.В. Электрооптический эффект в плёнках полимера, диспергированного нематическим жидким кристаллом: учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет. 2010. 11 с.
7. Томилин М.Г. Взаимодействие жидких кристаллов с поверхностью. СПб.: Политехника. 2001. 325 с.: ил.
8. Sonin A.A. The surface physics of LCs. Amsterdam: Gordon and Breach Publisher. 1995. pp. 118–122.
9. Коньяр Ж. Ориентация НЖК и их смесей. Минск: БГУ. 1986. 104 с.
10. Беляев В.В., Мазаева В.Г., Минько А.А., Тимофеев С.Н., Кремнийорганические пленки с молекулярным микрорельефом для ориентации жидких кристаллов // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2010. № 1. С. 52–56.
11. Belyaev V., Solomatin A., Chausov D., Phase retardation vs. pretilt angle in liquid crystal cells with homogeneous and inhomogeneous LC director configuration // Optics Express. 2013. Vol. 21. pp. 4244–4249.
12. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Kurilov A.D., Chausov D.N., Mazaeva V.G., Optical Properties of Hybrid Aligned Nematic (HAN) Cells with Different Pretilt Angles // Applied Optics. 2014. Vol. 53. Issue 29. pp. H51–H57.
13. Беляев В.В., Соломатин А.С. Оптические свойства гибридных жидкокристаллических ячеек при различных углах падения света // Оптический Журнал. 2015. Т. 82. № 1. С. 41–48.
14. Беляев В.В., Соломатин А.С., Чаусов Д.Н. Оптические свойства ЖК ячеек с произвольным краевым углом наклона директора // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2013. № 1. С. 32–41.

REFERENCES

1. Prostranstvennyye modulyatory sveta [Spatial light modulators]. Vasil'ev A.A., Kasasent D., Kompanets I.N., Parfenov A.V. M., Radio i svyaz', 1987. 320 p.
2. Kamanina N.V., Kaporskii L.N. Vliyanie fullerenov na dinamicheskie kharakteristiki zhidkokristallicheskih sistem [The influence of fullerenes on the dynamic characteristics of liquid-crystal systems] // Pis'ma Zh. Tekh. Fiz. [Tech. Phys. Lett.]. 2000. Vol. 26. no. 19. pp. 30–38.
3. Zharkova G.M., Sonin A.S. Zhidkokristallicheskie kompozity [Liquid-crystal composites]. Novosibirsk, VO "Nauka", 1994. 214 p.

4. Kamanina N.V., Rakcheeva L.P. Perspektivy ispol'zovaniya fullerenov dlya orientatsii zhidkokristallicheskih kompozitsii [Prospects for the use of fullerenes for the orientation of liquid crystal compositions] // *Pis'ma Zh. Tekh. Fiz.* [Tech. Phys. Lett.]. 2002. Vol. 28. no. 11. pp. 28–36.
5. Kamanina N.V. Fullerenosoderzhashchie dispergirovannye nematicheskie zhidkokristallicheskie struktury: dinamicheskie kharakteristiki i protsessy samoorganizatsii [Fullerene-like dispersed nematic liquid-crystal structures: dynamic characteristics and processes of self-organization] // *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Phys. Usp.]. 2005. Vol. 175. no. 4. pp. 445–454.
6. Mashin A.I., Korobkov A.V. Elektroopticheskiy effekt v plenkakh polimera, dispergirovannogo nematicheskim zhidkim kristallom: uchebno-metodicheskoe posobie [Electro-optical effect in polymer films dispersed by a nematic liquid crystal: a tutorial]. Nizhny Novgorod, Nizhegorodskii gosuniversitet, 2010. 11 p.
7. Tomilin M.G. Vzaimodeistvie zhidkikh kristallov s poverkhnost'yu [Interaction of liquid crystals with surface]. SPb., Politehnika, 2001. 325 p.
8. Sonin A.A. The surface physics of LCs. Amsterdam: Gordon and Breach Publisher. 1995. pp. 118–122.
9. Konyar Zh. Orientatsiya NZHK i ikh smesei [Orientation of neumatic liquid crystals and their mixtures]. Minsk, BGU, 1986. 104 p.
10. Kremniorganicheskie plenki s molekulyarnym mikrorel'efom dlya orientatsii zhidkikh kristallov [Organosilicon films with a molecular microrelief for orientation of liquid crystals], Belyaev V.V., Mazaeva V.G., Min'ko A.A., Timofeev S.N. // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika* [Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics]. 2010. no. 1. pp. 52–56.
11. Belyaev V., Solomatin A., Chausov D. Phase retardation vs. pretilt angle in liquid crystal cells with homogeneous and inhomogeneous LC director configuration // *Optics Express*. 2013. Vol. 21. pp. 4244–4249.
12. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Kurilov A.D., Chausov D.N., Mazaeva V.G., Optical Properties of Hybrid Aligned Nematic (HAN) Cells with Different Pretilt Angles // *Applied Optics*. 2014. Vol. 53. Issue 29. pp. H51–H57.
13. Belyaev V.V., Solomatin A.S. Opticheskie svoystva gibridnykh zhidkokristallicheskih yacheek pri razlichnykh uglakh padeniya sveta [Optical properties of hybrid liquid crystal cells at various angles of incidence of light] // *Opticheskii Zhurnal* [Journal of Optics]. 2015. Vol. 82. no. 1. pp. 41–48.
14. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N. Opticheskie svoystva ZHK yacheek s proizvol'nym kraevym uglom naklona direktora [Optical properties of the LCD cell with an arbitrary boundary angle of the director] // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika* [Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics]. 2013. no. 1. pp. 32–41.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соломатин Алексей Сергеевич – кандидат физико-математических наук, инженер учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии, Московский государственный областной университет;
e-mail: Sotrudnica_UNC@mail.ru

Беляев Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики, Московский государственный областной университет;
e-mail: vic_belyaev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksei Solomatin – candidate of physical and mathematical sciences, engineer of the Education & Science Lab for Theoretical and Applied Nanotechnology at the Moscow Region State University;
e-mail: Sotrudnica_UNC@mail.ru

Victor Belyaev – doctor of technical sciences, professor, head of the department of theoretical physics at the Moscow Region State University;
e-mail: vic_belyaev@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Соломатин А.С., Беляев В.В. Ориентационные и оптические свойства сферических доменов жидкого кристалла с центральной ориентирующей и внешней неориентирующей поверхностью // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2016. № 4. С. 32–42.
DOI: 10.18384/2310-7251-2016-4-32-42.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCE

A. Solomatin, V. Belyaev. Orientational and optical properties of liquid-crystal domains bounded by central orienting and surrounding non-orienting surfaces // Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics. 2016. № 4. no. 32–42.
DOI: 10.18384/2310-7251-2016-4-32-42.