

УДК 535.012.2

*A. С. Соломатин*

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

Учебно-научная лаборатория теоретической и прикладной нанотехнологии,  
Московский государственный областной университет, ул. Радио, д. 10а, 105005 Москва, Россия  
E-mail: sotrudnica\_unc@mail.ru

*Рассмотрены нематические жидкокристаллические (ЖК) домены, центральная часть (ядро) которых покрыта ориентирующим покрытием, обеспечивающим гомеотропный угол преднаклона директора, а внешняя сторона домена не оказывает существенного ориентирующего влияния. Исследуются как цилиндрические, так и сферические домены, в том числе и с незначительными размерами центрального тела (ядра). Предложен метод расчета 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. Отмечена применимость предложенных методов к системам полимер–ЖК.*

**Ключевые слова:** нематические жидкие кристаллы, домены, оптическая анизотропия, двулучепреломление, полимер–ЖК системы.

DOI: 10.18083/LCAppl.2016.3.39

*A. S. Solomatin*

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

Education & Research Lab of Theoretical and Applied Nanotechnology,  
Moscow Region State University, 10a Radio St., Moscow, 105004, Russia  
E-mail: sotrudnica\_unc@mail.ru

*Spherical and cylindrical nematic liquid crystals domains with fixed boundary conditions are investigated. The domain core surface orients the LC vertically, while the surrounding surface has no orienting effect. A new method of the domain's phase retardation difference determination is described as well as its optical anisotropy and dimensional characteristics. This new method is also applicable for polymer–LC systems.*

**Key words:** nematic liquid crystal, domains, optical anisotropy, birefringence, polymer–liquid crystal system.

## 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* – далее – 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 дешевых, 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 (радиально) ориентированного нематика с учетом граничных условий для угла наклона директора на подложках (не ориентирующие) в случае приповерхностного домена.

Широко изучаются ориентированные тонкие (10–100 мкм) слои нематических жидких кристаллов (НЖК). Такие тонкие слои заключены между двумя твердыми опорными поверхностями. Поэтому для них существенное значение приобретает формирование приповерхностных и межповерхностных доменов как на внесенных в среду телах, так и на точечных или протяженных дефектах поверхности: порах, царапинах, гребнеобразных выступах, т. е. 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: определение размеров и формы объектов в жидком кристалле или вокруг него или определение показателя двулучепреломления жидкого кристалла стали задачами данной работы. Особенностью исследования является варьирование граничных условий на поверхности раздела ЖК и микро- или нанообъекта. На первом этапе моделирования была выбрана гомеотропная ориентация ЖК на границе раздела как реализующаяся во множестве практических случаев.

### 1. Осесимметричные оптически анизотропные нематические ЖК-структуры в оптически изотропном объеме

#### *Компьютерное моделирование*

Как и в [11–14], ячейка ЖК помещалась между скрещенными 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 цилиндрического оптически анизотропного нематического ЖК-домена (образующегося вокруг цилиндрического тела, введенного в изотропную ЖК-среду) были приняты (рис. 1) следующие условия.

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 цилиндрическом домене ориентирован радиально). Цилиндрическое 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.

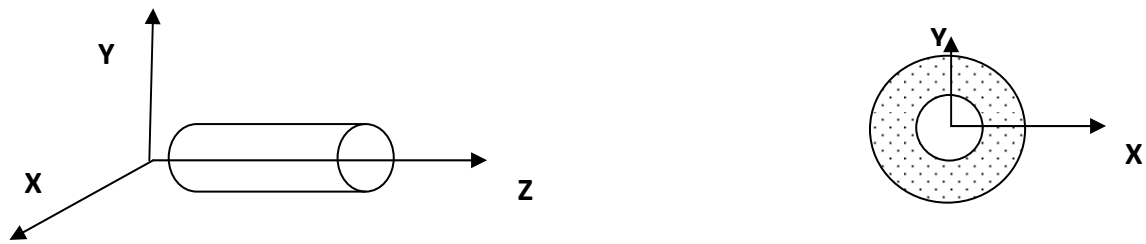


Рис. 1. Цилиндрический домен: центр системы координат в центре домена, оси OX и OZ лежат в плоскости слоя ЖК в ячейке

На рис. 2 приведены расчетные 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. Цилиндрический ЖК-домен не искажает свою

радиально ориентированную структуру там, где он прилегает к поверхности. По формуле линзы 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:

$$\frac{n_0}{f} = (n - n_0) \left\{ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n - n_0)d}{nR_1R_2} \right\}.$$

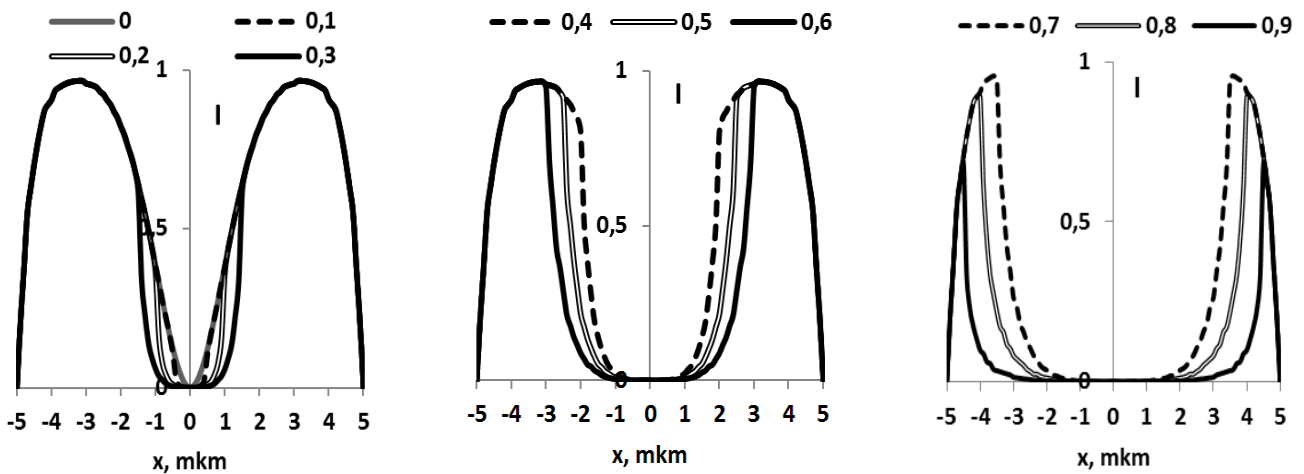


Рис. 2. Интенсивность света, прошедшего через цилиндрический домен, в зависимости от относительного диаметра центрального тела.  $L = 10$  микрон,  $n_o = 1,5$ ,  $n_e = 1,55$

## 2. Цилиндрические приповерхностные оптически анизотропные нематические ЖК-структуры в оптически изотропном объеме

### Компьютерное моделирование

Для модели приповерхностного цилиндрического ЖК-домена (рис. 3) принятые условия аналогичны изложенным выше для осесимметричного случая. Отличие в том, что цилиндри-

ческое тело полагаем находящимся на одной из поверхностей ячейки. В таком случае при малом относительном радиусе центрального тела домен близок к полуцилиндру. При большом относительном радиусе центрального тела домен близок к цилиндрическому. Интенсивность света, прошедшего через приповерхностный цилиндрический домен, в зависимости от относительного диаметра центрального тела приведена на рис. 4.

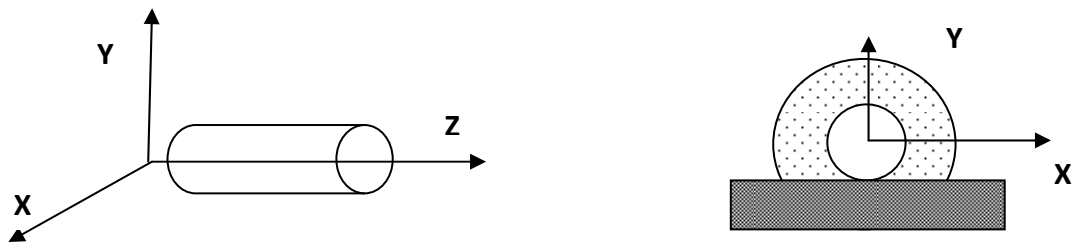


Рис. 3. Цилиндрический домен: центр системы координат в центре домена, оси OX и OZ лежат в плоскости слоя ЖК в ячейке

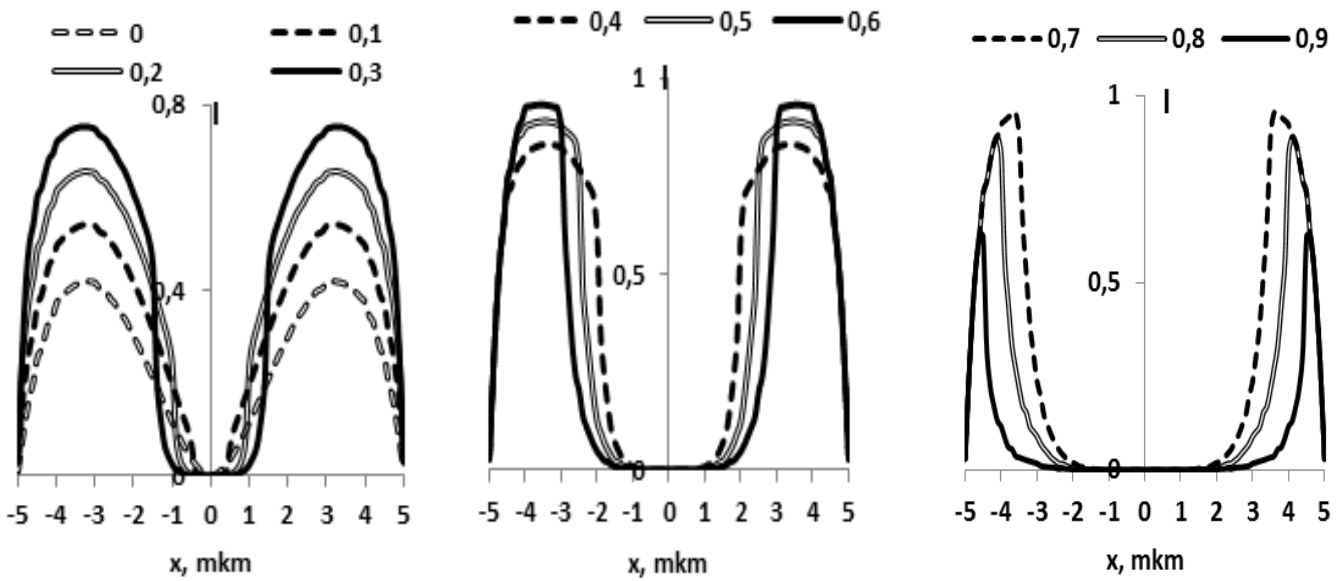


Рис. 4. Интенсивность света, прошедшего через приповерхностный цилиндрический домен, в зависимости от относительного диаметра центрального тела.  $L = 10$  микрон,  $n_o = 1,5$ ,  $n_e = 1,55$

### 3. Цилиндрические межповерхностные оптически анизотропные нематические ЖК-структуры в оптически изотропном объеме

#### Компьютерное моделирование

Для модели межповерхностного цилиндрического ЖК-домена (рис. 5) принятые условия аналогичны изложенным выше. Отличие в том, что цилиндрическое тело полагаем прилегающим к

обеим поверхностям ячейки. В таком случае при малом относительном радиусе центрального тела домен близок к плоскому (параллелепипеду). При большом относительном радиусе центрального тела домен близок к цилиндрическому. Интенсивность света, прошедшего через межповерхностный цилиндрический домен, в зависимости от относительного диаметра центрального тела показана на рис. 6.

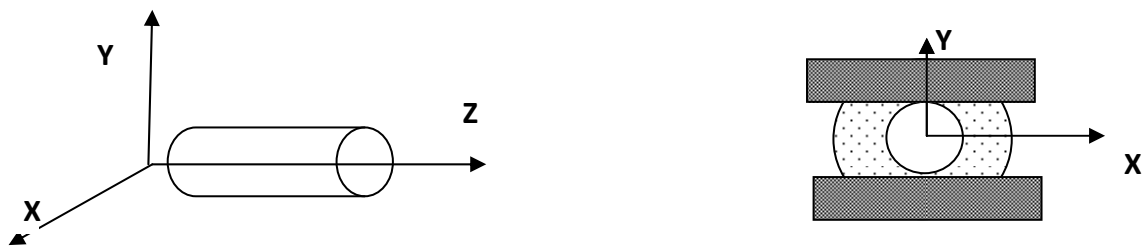


Рис. 5. Цилиндрический домен: центр системы координат в центре домена, оси OX и OZ лежат в плоскости слоя ЖК в ячейке

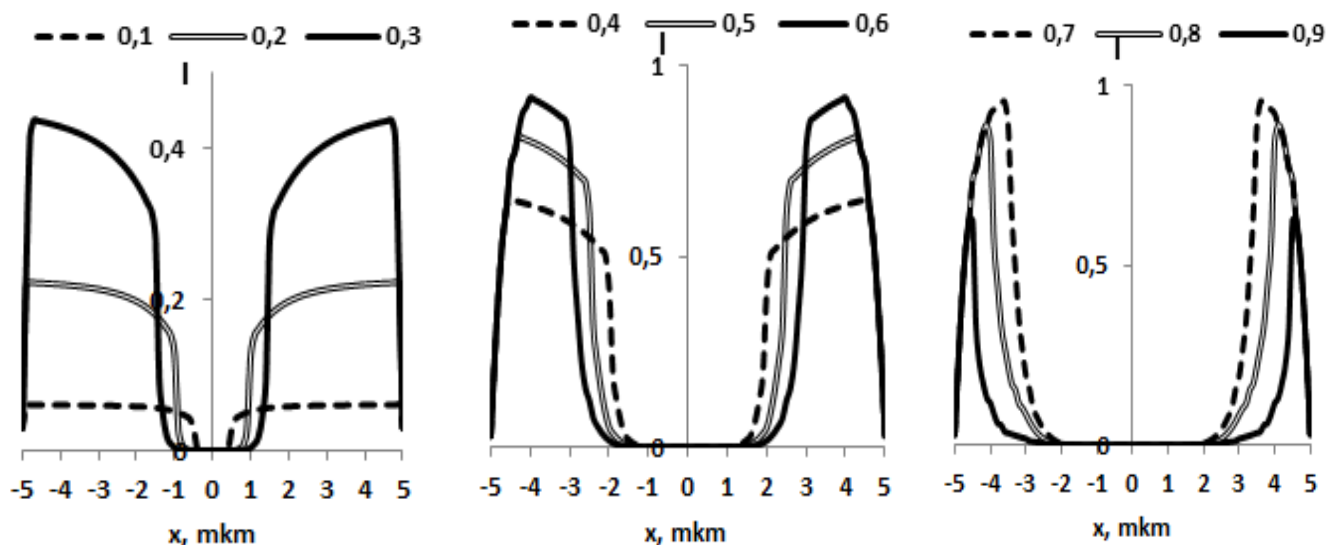


Рис. 6. Интенсивность света, прошедшего через межповерхностный цилиндрический домен, в зависимости от относительного диаметра центрального тела.  $L = 10$  микрон,  $n_o = 1,5$ ,  $n_e = 1,55$

*Обсуждение результатов компьютерного моделирования*

Как видно из результатов компьютерного моделирования, изменение относительного размера центрального тела и изменение радиуса межповерхностного ЖК-домена влияют на формирование оптической картины существенно различным образом. Оптическая картина позволяет при сравнении с данными моделирования (если известно двулучепреломление  $\Delta n$ ) отождествить картину с конкретными геометрическими характеристиками домена и центрального тела. В случае, если размеры помещенных в среду тел, вокруг которых образуются межповерхностные домены цилиндрической формы, известны заранее и если удалось определить размеры цилиндрического домена, то можно по оптической картине, сравнивая с данными моделирования, определить двулучепреломление  $\Delta n$ .

**4. Сферические оптически анизотропные нематические ЖК-структуры в оптически изотропном объеме**

*Компьютерное моделирование*

Для модели оптически анизотропного нематического ЖК-домена, образующегося вокруг

сферического тела, введенного в изотропную ЖК-среду (рис. 7), условия аналогичны рассмотренным выше случаям. Отличие в том, что сферическое тело находится (центр тела) на расстоянии  $L/2$  от каждой из сторон ячейки, т. е. посередине слоя ЖК в ячейке. Сферический ЖК-домен не искажает свою радиально ориентированную структуру в областях, где он прилегает к поверхности. Интенсивность света, прошедшего через сферический домен, показана на рис. 8. Толщина слоя ЖК на рис. 8  $L = 10$  (слева) или  $20$  (справа) микрон,  $n_o = 1,5$ ,  $n_e = 1,65$ .

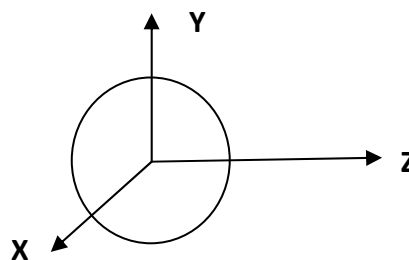


Рис. 7. Сферический домен: оси OX и OZ лежат в плоскости слоя ЖК в ячейке

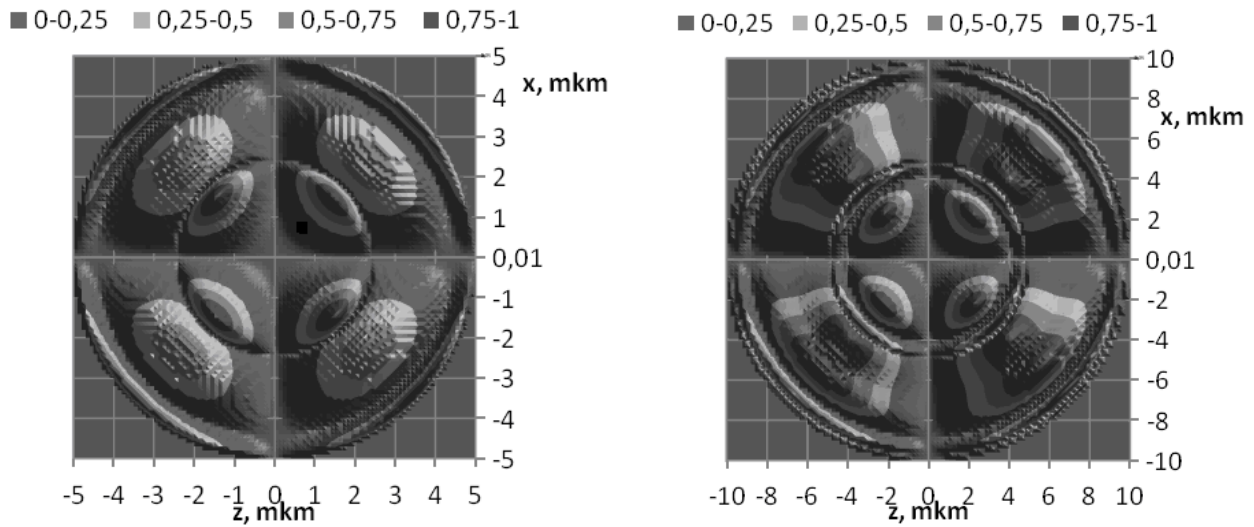


Рис. 8. Интенсивность света, прошедшего через сферический домен, диаметр центрального тела 0,5 от диаметра домена

### 5. Сферические приповерхностные оптически анизотропные нематические ЖК-структуры в оптически изотропном объеме

#### Компьютерное моделирование

Для модели сферического приповерхностного домена (рис. 9) принятые условия аналогичны изложенным выше. Отличие заключается в том, что сферическое тело находится на поверхности одной из сторон ячейки, т. е. сферический ЖК-

домен при незначительном относительном радиусе центрального тела становится полусферическим, а при относительно тонком слое ЖК на поверхности центрального тела, т. е. при большом относительном радиусе центрального тела, становится сферическим. Интенсивность света, прошедшего через сферический приповерхностный домен, показана на рис. 10. Толщина слоя ЖК на рис. 10  $L=10$  (слева) или  $20$  (справа) микрон,  $n_o=1.5$ ,  $n_e=1.65$ .



Рис. 9. Сферический домен: слева – центр системы координат в центре домена, оси  $Ox$  и  $Oz$  лежат в плоскости слоя ЖК в ячейке; справа – центральное тело прилегает к поверхности ячейки, нематический ЖК-домен не строго сферической формы

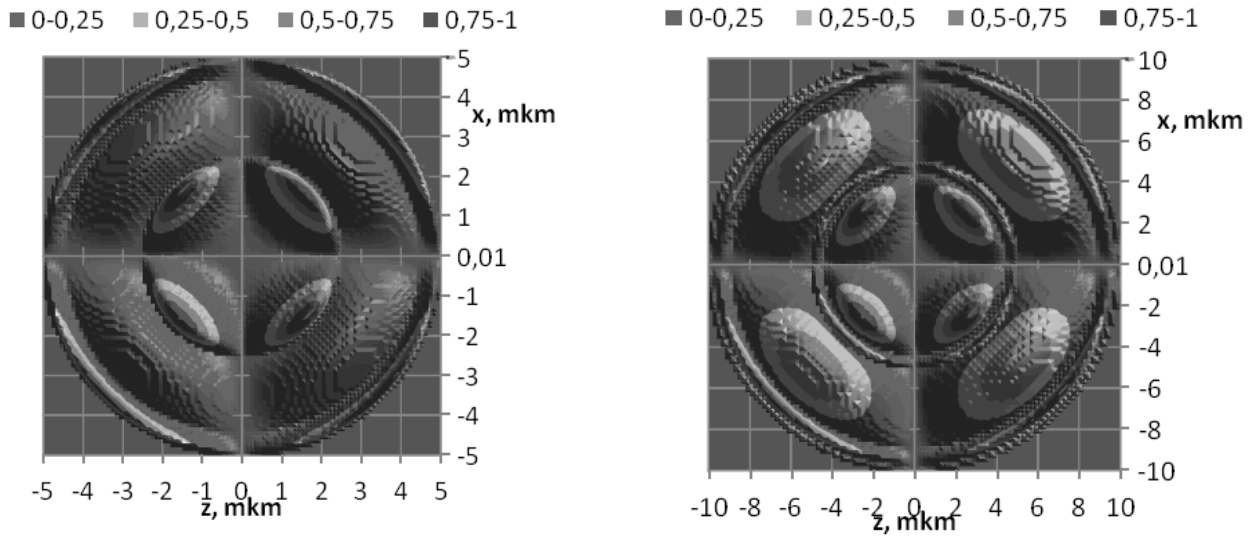


Рис. 10. Интенсивность света, прошедшего через приповерхностный сферический домен, радиус центрального тела 0,5 от радиуса домена

### 6. Сферические межповерхностные оптически анизотропные нематические ЖК-структуры в оптически изотропном объеме

#### Компьютерное моделирование

Для модели сферического межповерхностного домена (рис. 11) условия аналогичны рассмотренным выше. Отличие состоит в том, что сферическое тело соприкасается с обеими поверхностями ячейки, т. е. межповерхностный

сферический ЖК-домен при незначительном относительном радиусе центрального тела становится цилиндрическим, а при относительно тонком слое ЖК на поверхности центрального тела, т. е. при большом относительном радиусе центрального тела, становится сферическим. Интенсивность света, прошедшего через межповерхностный сферический домен, показана на рис. 12.

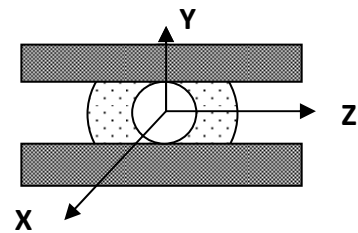
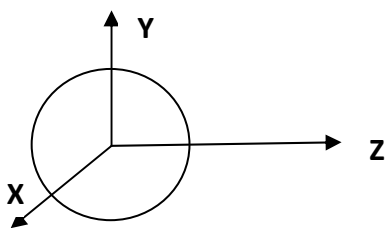


Рис. 11. Сферический домен: слева – центр системы координат в центре домена, оси OX и OZ лежат в плоскости слоя ЖК в ячейке; справа – центральное тело прилегает к обеим поверхностям ячейки, нематический ЖК-домен не строго сферической формы

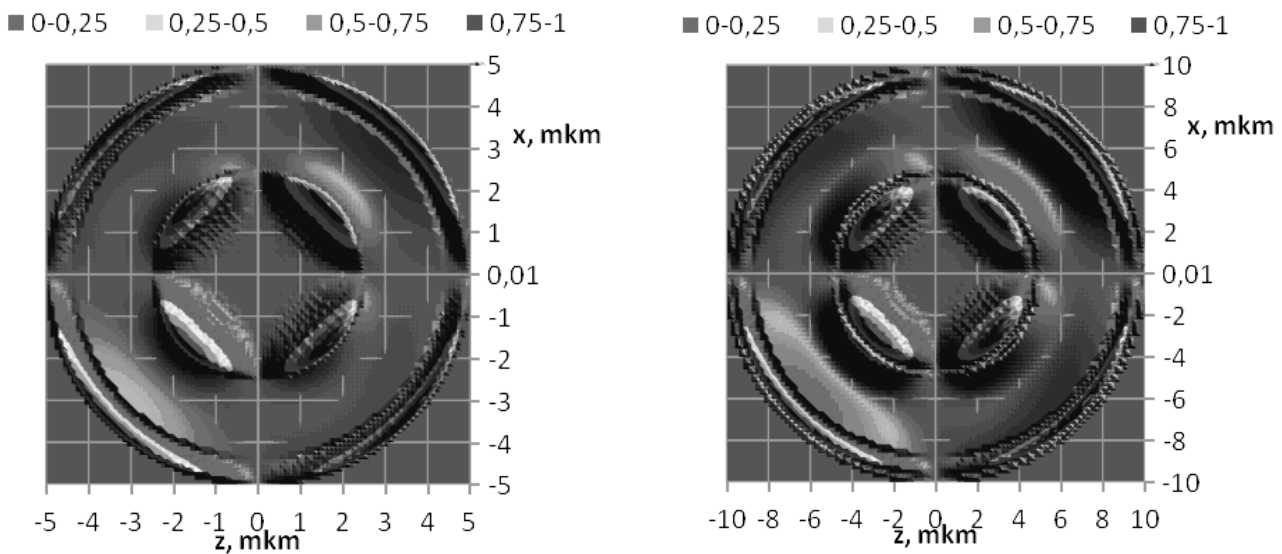


Рис. 12. Интенсивность света, прошедшего через межповерхностный сферический домен, радиус центрального тела 0,5 от радиуса домена

#### Обсуждение результатов компьютерного моделирования

Как видно из результатов компьютерного моделирования, изменение относительного размера центрального тела и изменение радиуса сферического (центрально-симметричного, приповерхностного, межповерхностного) ЖК-домена влияют на формирование оптической картины существенно различным образом. В рассмотренных выше случаях, как правило, достаточно отчетливо 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 при сравнении с данными моделирования (если известно двулучепреломление  $\Delta n$ ) отождествить картину с конкретными геометрическими характеристиками домена и центрального тела.

В случае, если размеры помещенных 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  $\Delta n$ .

#### Выводы по сферическим и цилиндрическим доменам

Смоделированы оптические свойства в зависимости от размеров и оптических характеристик, сферических и цилиндрических анизотропных нематических ЖК-доменов в изотропной фазе, в том числе как деформированных поверхностью, ограничивающей жидкий слой, так и недеформированных. При моделировании рассмотрены как домены с центральным телом незначительного радиуса, так и сформировавшиеся вокруг крупного сферического или цилиндрического 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 помещенных в среду доменобразующих (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.

### Неполяризованный монохромный луч света (подсветка микроскопа с светофильтром), падающий нормально

В трехмерных координатах в случае нормально падающего луча неполяризованного света будет осесимметричная (относительно оси, совпадающей с падающим лучом света) зависимость интенсивности пропускания от координат. Зависимость интенсивности пропускания от радиальной координаты будет аналогична соответствующим (осесимметричным, приповерхностным, межповерхностным) цилиндрическим доменам, рассмотренным выше.

### Полимер-ЖК

Если анизотропные ЖК-домены заключены в полимерную изотропную матрицу и показатель преломления полимерного материала равен обыкновенному показателю преломления ЖК-материала, то при радиально ориентированном директоре ЖК (при гомеотропно ориентирующей поверхности домена, состоящей из полимерного материала) можно рассматривать по аналогии с вышеописанными сферическим и цилиндрическим доменами при радиусе внутреннего тела, равном нулю. Результаты будут одинаковые.

### Список литературы / References

1. Васильев А. А., Касасент Д., Компанец И. Н., Парфенов А. В. Пространственные модуляторы света. М.: Радио и связь, 1987. 320 с. [Vasilyev A.A., Kasasent D., Kompanets I.N., Parfenov A.V. Space light modulators. M.: Radio and communications, 1987, 320 p. (in Russ.)].
2. Kamanina N.V., Vasilyev P.Ya., Studeonov V.I. Orientation of liquid crystalline materials by using carbon nanotubes. *Theoret. Appl. Mech.* Belgrade, 2011, **38** (1), 37–46. DOI:10.2298/TAM1101037K
3. Жаркова Г. М., Сонин А. С. Жидкокристаллические композиты. Новосибирск: Наука, 1994. 214 с. [Zharkova G.M., Sonin A.S. Liquid crystal composites. Novosibirsk: Science, 1994, 214 p. (in Russ.)].
4. Kamanina N.V., Vasilyev P.Ya. On the possibility of a homeotropic alignment in nematic liquid crystal elements using carbon nanotubes. *Technical Physics Letters*, 2009, **35** (6), 501–503. DOI: 10.1134/S1063785009060066
5. Kamanina N.V., Serov S.V., Savinov V.P. Photorefractive properties of nanostructured organic materials doped with fullerenes and carbon nanotubes. *Technical Physics Letters*, 2010, **36** (1), 40–42. DOI: 10.1134/S106378501001013X
6. Машин А. И., Коробков А. В. Электрооптический эффект в пленках полимера, диспергированного нематическим жидким кристаллом: Учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: НГУ, 2010. 11 с. [Mashin A.I., Korobkov A.V. The electro-optical effect in polymer films dispersed nematic liquid crystal. Nizhny Novgorod: NSU, 2010, 11 p. (in Russ.)].
7. Томилиן М. Г. Взаимодействие жидких кристаллов с поверхностью. СПб.: Политехника, 2001. 325 с. [Tomilin M.G. Interaction of liquid crystals with surface. SPb: Polytechnica, 2001, 325 p. (in Russ.)].
8. Sonin A.A. The Surface Physics of Liquid Crystals. Amsterdam: Gordon and Breach Publisher, 1995, 118–122.
9. Коньяр Ж. Ориентация нематических жидких кристаллов и их смесей. Минск: БГУ, 1986. 104 с. [Cognard J. Alignment of nematic liquid crystals and their mixtures. London, New-York, Paris: Gordon and Bridge Science Publishers, 1982, 101 p.]
10. Беляев В. В., Мазаева В. Г., Минько А. А., Тимофеев С. Н. Кремнийорганические пленки с молекулярным микрорельефом для ориентации жидких кристаллов // *Вестник МГОУ. Серия «Физика-Математика»*. 2010. № 1. С. 52–56. [Belyaev V.V., Mazaeva V.G., Min'ko A.A., Timofeev S.N. The organosilicone film with a molecular topographical orientation of liquid crystals. *Bulletin MSRU. Series Physics and Mathematics*, 2010, 1, 52–56 (in Russ.)].
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, **21**, 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, **53** (29), 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. 47–54. [Belyaev V.V., Solomatin A.S. Optical properties of hybrid liquid-crystal cells for various angles of incidence of light. *Journal of Optical Technology*, 2015, **82** (1), 36–42. DOI: 10.1364/JOT.82.000036].

14. Беляев В. В., Соломатин А. С., Чаусов Д. Н. Оптические свойства ЖК-ячеек с произвольным краевым углом наклона директора // *Вестник МГОУ. Серия «Физика-Математика»*. 2013. № 1.

С. 32–40. [Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chaurov D.N. Optical properties of liquid crystal cells with arbitrary LC director pretilt angle. *Bulletin MSRU. Series Physics and Mathematics*. 2013, 1, 32–40 (in Russ.)].

*Поступила в редакцию 15.03.2016 г.*  
*Received 15 March, 2016*