

УДК 535.012.2, 771.36  
DOI: 10.18384/2310-7251-2016-4-56-67

## ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ С НЕОДНОРОДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ДИРЕКТОРА

**Соломатин А.С., Беляев В.В.**

Московский государственный областной университет  
105005, г. Москва, ул. Радио, д. 10А, Российская Федерация

**Аннотация.** Получены расчетные данные о влиянии пространственного распределения директора ЖК на оптические свойства элемента регулярного микрорельефа. Предложены ориентационные распределения, пригодные к использованию в составе дифракционных решеток.

**Ключевые слова:** дифракция, линза ЖК, оптическая анизотропия, двупреломление, пространственно неоднородные структуры, оптические свойства.

## LIQUID-CRYSTAL DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS WITH AN INHOMOGENEOUS DISTRIBUTION OF THE DIRECTOR

**A. Solomatin, V. Belyaev**

Moscow Region State University  
ul. Radio 10a, 105005 Moscow, Russia

**Abstract.** We have obtained calculation data on the effect of the spatial distribution of the liquid-crystal director on the optical properties of a regular microrelief element. We have proposed orientation distributions suitable for use in the composition of diffraction gratings.

**Keywords:** diffraction, liquid-crystal lens, optical anisotropy, birefringence, spatially nonuniform structures, optical properties.

### ВВЕДЕНИЕ

Принципы и основы теории построения дифракционных оптических элементов (ДОЭ) рассмотрены в [1]. Важные тенденции их развития: возрастание требований к точному соответствию их физической геометрии теоретически рассчитанной и высокая стоимость прецизионных технологий.

Высокая стоимость, а также угроза снижения эксплуатационных характеристик (что может иметь принципиальное значение) сверхточно изготовленных ДОЭ под воздействием пыли, микро и даже наноцарапин и дефектов разного происхождения обусловили актуальность исследований в области ДОЭ с управляемыми (например, электроуправляемыми) формами оптически анизотропного микро- и

нанорельефа, способными значительно корректировать свои характеристики по отдельным микро- и наноэлементам (в дальнейшем будем их называть микроэлементами), из совокупности которых состоит ДОЭ. При этом способы управления микроэлементами ДОЭ могут быть аналогичны управлению пикселями дисплея (для наноэлементов способы управления могут быть подобны присвоению заданных значений элементам оперативной памяти компьютера).

Дифракционные решётки с прямоугольным микрорельефом предлагается в данной работе изготавливать в виде совокупности микро- (nano-) элементов с индивидуально адресованными управляющими воздействиями (например, амплитуда электрического поля), обеспечивающими изменение свойств оптически анизотропного микро и нанорельефа ДОЭ.

Свойства микроэлемента ДОЭ изменяются с изменением фазовой задержки слоя ЖК, а она в свою очередь меняется при изменении пространственного распределения директора ЖК, зависящего от приложенного поля.

Если толщина слоя ЖК одинакова по всему полю микроэлемента, то от зависимости фазовой задержки от горизонтальной координаты вдоль решётки (по-перёк борозд) перейдём к зависимости необыкновенного показателя преломления от той же координаты.

Если зависимость необыкновенного показателя преломления от координаты является константой, то тогда ЖК микроэлемент соответствует прямоугольному элементу микрорельефа

## **2. Неоднородные ЖК структуры, формирующие микроэлемент дифракционного оптического элемента (ДОЭ)**

Нематические жидкокристаллические структуры с неоднородным распределением директора рассмотрены в [3–7].

ЖК микроэлемент ДОЭ, то есть бороздка, заполненная ЖК, эквивалентен элементу микрорельефа с геометрическим профилем, соответствующим форме кривой зависимости необыкновенного показателя преломления от координаты. Показатель преломления  $n$  вычисляется [2] по формуле:

$$n = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}},$$

где угол  $\theta$  зависит от горизонтальной координаты.

На рис. 1 сверху показан ступенчатый микрорельеф (прямоугольный), бороздки которого заполнены нематическим ЖК, и на рис. 1 снизу показан оптически эквивалентный ему рельеф, в предположении, что показатели преломления ЖК и твёрдого материала совпадают. Это можно реализовать на практике, если на дне канавок находятся электроды и, например, естественная ориентация ЖК материала планарная (параллельная дну канавок), боковые стенки не оказывают существенного ориентирующего влияния (верхняя часть рельефа из другого материала, чем нижняя, или при формировании канавок рельефа было оказано соответствующее воздействие на дно и стенки). Тогда при включении поля в некоторых канавках, как показано на рис. 1, ориентация изменится на гомеотропную.

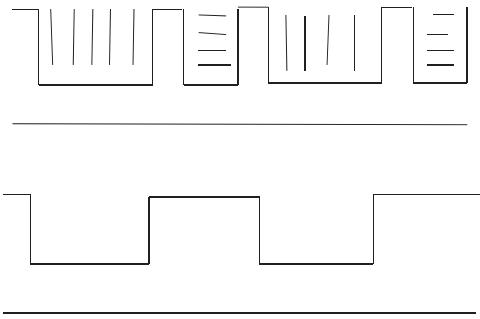


Рис. 1. Сверху: микрорельеф, бороздки заполнены ЖК. Снизу: оптически эквивалентный ему рельеф, если показатели преломления ЖК и твердого материала совпадают.

Если включить наоборот, то будет как на рис. 2.

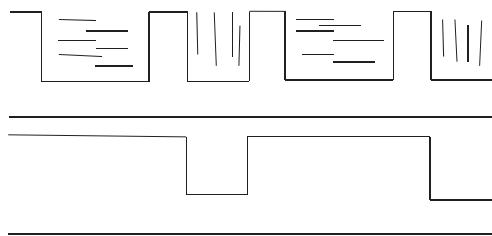


Рис. 2. Сверху: микрорельеф, бороздки заполнены ЖК. Снизу: оптически эквивалентный ему рельеф, если показатели преломления ЖК и твердого материала совпадают.

Как показано на рис. 1 и рис. 2 для нормально падающего света, можно сформировать микроэлемент ДОЭ, эквивалентный прямоугольному с произвольным профилем, зависящим от переключения электроуправляемых элементов.

На рис. 3 показано для случая наклонной естественной ориентации нематического ЖК на дне бороздок рельефа и при неодинаковых оптических характеристиках ЖК и твёрдого материала. Получается ступенчатый рельеф.

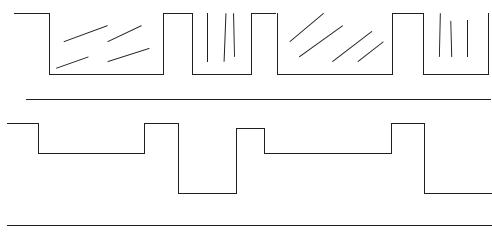


Рис. 3. Сверху: микрорельеф, бороздки заполнены ЖК. Снизу: оптически эквивалентный ему рельеф, если показатели преломления ЖК и твёрдого материала не совпадают.

Таким образом, возможности управления ориентацией ЖК и оптическими свойствами микроэлемента ДОЭ достаточно обширные. Дифракционные решетки с различной микроструктурой описаны в [8–24].

В [22; 24] приведены результаты компьютерного моделирования дифракционных свойств для рельефа, показанного на рис. 1 и рис. 2 и проанализированы зависимости свойств от параметров рельефа.

### 3. Синусоидальный профиль

Свойства микроэлемента ДОЭ изменяются с изменением фазовой задержки слоя ЖК, а она, в свою очередь, меняется при изменении пространственного распределения директора ЖК, зависящего от приложенного поля.

Если толщина слоя ЖК одинакова по всему полю микроэлемента, то от зависимости фазовой задержки от горизонтальной координаты вдоль решётки (по перек борозд) перейдём к зависимости необыкновенного показателя преломления от той же координаты.

Тогда, если зависимость необыкновенного показателя преломления от координаты квадратична (парабола), то ЖК микроэлемент соответствует синусоидальному элементу микрорельефа.

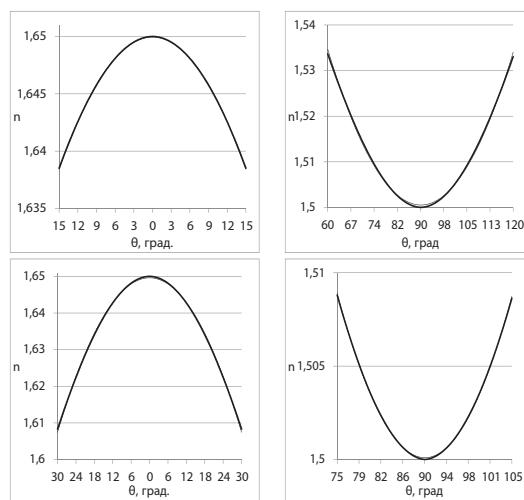


Рис. 4. Зависимость показателя преломления от координаты и, соответственно, от углового диапазона (сверху вниз). Слева для S распределения директора ЖК, справа для B распределения.  $K_{33}/K_{11}=0,5$ .

Угол наклона директора ЖК при  $K_{33}/K_{11}$  отличном от единицы распределён по координате нелинейно. В связи с этим на рис. 4 и по горизонтальной оси указаны углы наклона директора. Они распределены вдоль горизонтальной оси неравномерно, в соответствии с нелинейностью их зависимости от горизонтальной координаты, для которой по горизонтальной оси выбран линейный масштаб. Для зависимости показателя преломления от координаты вдоль решётки (по-

перёк борозд) показано сравнение с квадратичной функцией. Сама координата на горизонтальной оси не подписана во избежание загромождения графика. Очевидно, начало отсчёта координаты находится при угле, равном нулю для  $S$  распределения, и равном  $90^\circ$  для  $B$  распределения. Показатели преломления  $n_o = 1,5$ ,  $n_e = 1,65$ . Распределение директора ЖК зависит от коэффициентов упругости  $K_{33}$  и  $K_{11}$  и, следовательно, от их отношения  $K_{33}/K_{11}$ . В данной работе оно рассмотрено при  $K_{33}/K_{11} = 0,5$ .

Как показано на рис. 4 для нормально падающего луча света, как для  $S$  распределения, так и для  $B$  распределения, можно сформировать микроэлемент ДОЭ, эквивалентный криволинейному с произвольным профилем (в том числе синусоидальному), зависящим от выбора углового диапазона. Как показано на рис. 5, можно сформировать микроэлемент ДОЭ, эквивалентный синусоидальному, при различных диапазонах краевых углов. Принципиально от изменения величины отношения  $K_{33}/K_{11}$  ситуация не изменится. Как видно из рис. 4, квадратична зависимость показателя преломления от координаты при небольших угловых диапазонах. В то же время отношение  $K_{33}/K_{11}$  играет важную роль, определяя угловые диапазоны.

На рис. 5 показан рельеф (микро- или нанорельеф), который, как было показано на рис. 4, оптически аналогичен синусоидальному. Он сформирован как жёстким рельефом твёрдой подложки, так и пространственным распределением директора ЖК. На поверхности боковых сторон рельефа (материал, обладающий значительным ориентирующим действием) приповерхностный угол ЖК-ориентант обозначен  $\theta_0$ . На нижней поверхности рельефа другой материал, не обладающий значительным ориентирующим действием.

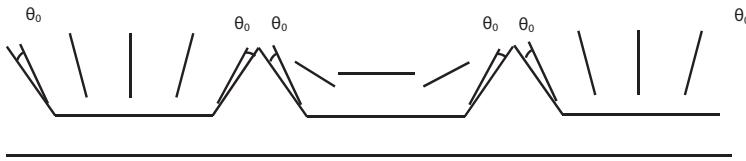


Рис. 5. Рельеф, оптически аналогичный синусоидальному, сформирован как жёстким рельефом твёрдой подложки, так и пространственным распределением директора ЖК.

Если изготавливать жёсткий рельеф целиком из одного материала, то в процессе формирования (удаления материала из выемок или наращивания материала на выступах) верхняя часть может приобрести ориентирующие свойства или же можно внести необходимые для этого этапы технологического процесса.

Приповерхностный угол ЖК-ориентант в сочетании с углом элемента твёрдого рельефа к направлению освещения задаёт угол между директором ЖК в приповерхностном слое и лучом света (при нормальном падении сверху вниз на рис. 5). Эти краевые углы (пары краевых углов) и соответствующее пространственное распределение директора ЖК при  $K_{33}/K_{11} = 0,5$  определяют оптические

свойства ЖК слоев, как показано на рис. 4, соответствующие синусоидальному рельефу.

Если расположить в системе на рис. 5 электроды, то можно дополнительно регулировать конфигурацию директора ЖК и, следовательно, оптически эквивалентный профиль рельефа.

Изменение оптических свойств микроэлемента осуществляется [2] изменением параметров электрического поля (амплитуда, частота). Электрическое поле может прилагаться с помощью электродов [3–7] при различных вариантах их размещения [2]. Таким образом, возможности управления ориентацией ЖК и оптическими свойствами микроэлемента ДОЭ достаточно обширные. Дифракционные решетки с различной микроструктурой описаны в [8–24].

В [22; 24] приведены результаты компьютерного моделирования дифракционных свойств для синусоидального рельефа, показанного на рис. 4 и рис. 5, проанализированы зависимости свойств от параметров рельефа и в сравнении с прямоугольным рельефом.

#### 4. Трапециевидный профиль

Если зависимость необыкновенного показателя преломления от координаты линейна, то тогда ЖК микроэлемент соответствует трапециевидному элементу микрорельефа.

ЖК микроэлемент ДОЭ, то есть бороздка, заполненная ЖК, изображена на рис. 6а для случая *S* распределения, на рис. 6б для случая *B* распределения и на рис. 6в для случая *H* распределения [3–7], он эквивалентен элементу микрорельефа с геометрическим профилем, соответствующим форме кривой зависимости необыкновенного показателя преломления от координаты.

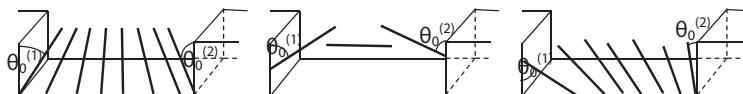


Рис. 6. Слева направо: *S*, *B*, *H* распределения директора по горизонтальной координате

Как показано на рис. 6, как для *S* распределения, так и для *B* распределения, можно сформировать микроэлемент ДОЭ, эквивалентный криволинейному с произвольным профилем, зависящим от выбора углового диапазона. Как показано на рис. 7, для *H* распределения можно сформировать микроэлемент ДОЭ, эквивалентный трапециевидному, при различных диапазонах краевых углов. Показатели преломления  $n_o = 1,5$ ,  $n_e = 1,65$ . Распределение директора ЖК зависит от коэффициентов упругости  $K_{33}$  и  $K_{11}$  и, следовательно, от их отношения  $K_{33}/K_{11}$ . в данной работе оно рассмотрено при  $K_{33}/K_{11} = 0,5$ . Принципиально от изменения величины отношения  $K_{33}/K_{11}$  ситуация не изменится. Приведён параметр  $R^2$ , показывающий расхождение с линейной функцией.

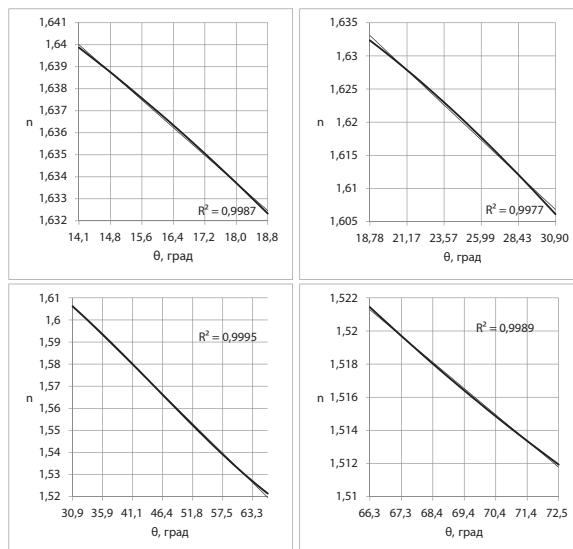


Рис. 7. Зависимости показателя преломления от горизонтальной координаты при  $K_{33}/K_{11}=0,5$ . Показано сравнение с линейной функцией. Выбранные угловые диапазоны, обеспечивают соответствие трапециевидному рельефу.

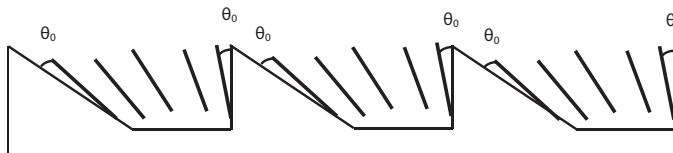
Такие приповерхностные углы, как на рис. 7 для  $H$  распределения вполне реализуемы на практике [3–7].

На рис. 8 показан рельеф (микро- или нанорельеф), который, как было показано на рис. 7, оптически аналогичен трапециевидному. Он сформирован как жёстким рельефом твёрдой подложки, так и пространственным распределением директора ЖК. На поверхности боковых сторон рельефа (материал, обладающий значительным ориентирующим действием) приповерхностный угол ЖК-ориентант обозначен  $\theta_0$ . На нижней поверхности рельефа другой материал, не обладающий значительным ориентирующим действием.

Если изготавливать жёстким рельеф целиком из одного материала, то в процессе формирования (удаления материала из выемок или наращивания материала на выступах) верхняя часть может приобрести ориентирующие свойства или же можно внести необходимые для этого этапы технологического процесса.

Приповерхностный угол ЖК-ориентант в сочетании с углом элемента твёрдого рельефа к направлению освещения задает угол между директором ЖК в приповерхностном слое и лучом света (при нормальном падении сверху вниз на рис. 8). Эти краевые углы (пары краевых углов) и соответствующее пространственное распределение директора ЖК при  $K_{33}/K_{11}=0,5$  определяют оптические свойства ЖК слоёв, как показано на рис. 7, соответствующие трапециевидному рельефу.

Если расположить в системе на рис. 8 электроды, то можно дополнительно регулировать конфигурацию директора ЖК и, следовательно, оптически эквивалентный профиль рельефа.



**Рис. 8.** Рельеф, оптически аналогичный трапециевидному, сформирован как жёстким рельефом твёрдой подложки, так и пространственным распределением директора ЖК.

## 5. Выводы

В данной работе впервые предложены ЖК микроэлементы ДОЭ *S*, *B* и *H* типов. Впервые предложены оптически эквивалентные прямоугольному, ступенчатому, синусоидальному и трапециевидному типы дифракционного рельефа на основе ЖК.

Были смоделированы зависимости показателя преломления от горизонтальной координаты для различных ЖК микроэлементов.

Показано, что возможности управления ориентацией ЖК и оптическими свойствами микроэлемента ДОЭ достаточно обширные.

Показано, что и без приложения поля можно получить микроэлемент, аналогичный заранее выбранному профилю. Указаны диапазоны углов и оценено влияние упругих свойств ЖК.

## ЛИТЕРАТУРА

- Сойфер В.А., Котляр В.В., Досковович Л.Л.. Дифракционные оптические элементы в устройствах нанофотоники // Компьютерная оптика. 2009. Т. 33. № 4. С. 352–368.
- Невская Г.Е., Томилин М.Г.. Адаптивные линзы на основе жидкких кристаллов // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 9. С. 35–48.
- Belyaev V., Solomatin A., and 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.
- 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.
- 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.
- Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N., Phase retardation difference of liquid crystal cells with symmetric and asymmetric boundary conditions // Molecular Crystals & Liquid Crystals. 2014. Vol. 596. pp. 22–29.
- Беляев В.В., Соломатин А.С., Часов 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.
- Беляев В.В. Применение подложек с различными микрорельефами поверхности в оптоэлектронике и устройствах отображения информации // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 9. С. 79.
- Васильев А.А., Касасент Д., Компанец И.П., Парfenov А.В. Пространственные моду-

- ляторы света. М.: Радио и связь. 1987. 320 с.
10. Бакеев Н.Ф., Беляев В.В., Волынский А.Л., Иванов С.А., Коновалов В.А., Муравский А.А., Минько А.А., Чистовская Л.В., Яковенко С.Е. Изготовление полимерных подложек с периодическим микрорельефом и исследование их оптических свойств // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 9. С. 8995–9001.
  11. Belyaev V., Tsoy V., Tarasishin A. Modeling Optical Properties of Birefringent Substrates with Periodical Surface Microrelief for Application in Display Devices // Conf. Proc. of The 22nd Int. Display Research Conf. Nice, France. 2002. pp. 413–416.
  12. Tsoy V.I., Belyaev V.V., Tarasishin A.V., Litovchenko D.T., Misnik V.P. Simulation of light propagation through birefringent substrates with periodical surface microrelief // Optics Communications. 2005. Vol. 246. pp. 57–66.
  13. Tsoy V.I., Belyaev V.V., Tarasishin A.V., Trofimov S.M. Modelling the diffraction of light by structures with spatial periodicity of the optical parameters of the substance and of the surface relief // J. Optical Technology. 2003. V.70. pp. 465–470.
  14. Merkulov A.Y., Belyaev V.V., Belyaev A.A., Gorbunov A.A. Diffraction on anisotropic substrates with sinusoidal surface microrelief // Molecular Crystals & Liquid Crystals. 2014. Vol. 596. pp. 122–127.
  15. Belyaev V.V., Tsoy V.I., Kushnir E.M., Klyckov A.V., Kalashnikov A.Y. Polarized light diffraction on anisotropic substrates with rectangular and sine microrelief // Journal of the SID. 2005. Vol. 13. pp. 305–308.
  16. Belyaev V.V., Novikovich V.M., Denisenko P.L. Diffraction on birefringent elements with sine surface microrelief // Journal of the SID. 2008. Vol. 16. pp. 961–967.
  17. Belyaev V.V., Chistovskaya L., Konovalov V., Muravsky A., Tarasishin A., Trofimov S., Tsoy V., Volynsky A., Yakovenko S. Physical properties of stretched polymeric substrates with periodic microrelief for optical diffraction elements and liquid crystals alignment. // Journal of the SID. 2003. Vol. 11. pp. 3–13.
  18. Belyaev V.V. Using substrates with various surface microreliefs in optoelectronics and information-display devices // J. Optical Technology. 2005. Vol. 72. pp. 719–724.
  19. Belyaev V.V., Mazaeva V.G., Solomatin A.S., Muravskii A.A., Gorbunov A.A., Muravskii A.A., New organosilicon oligomer films for NLC alignment, Proc. Int. Conf. 2011 China display/Asia display, Kunshan, China, 6–9 November 2011.
  20. Оганесян Д.Л., Маргарян А.Л., Акопян Н.Г., Арутюнян В.М., Беляев В.В., Соломатин А.С. Управление излучением в среднем инфракрасном диапазоне длин волн с помощью жидкокристаллической фазовой решётки // Известия НАН Армении. 2015. Физика. Т. 50. № 1. С. 74–84.
  21. Belyaev V.V., Merkulov A.Y., Belyaev A.A., Solomatin A.S., Gorbunov A.A. Diffraction on Anisotropic Substrates with Surface Microrelief. // Proc. EuroDisplay'11 Arcachon, France. 2011. pp. 121–124.
  22. Соломатин А.С., Физические свойства конденсированных систем с неоднородной структурой в микро- и нанометровом диапазоне // Международная конференция «Физические свойства материалов и дисперсных сред для элементов информационных систем,nanoэлектронных приборов и экологичных технологий». Москва, 21–24 апреля 2015 г. М.: ИИУ МГОУ, 2015. С. 17.
  23. Беляев В.В., Соломатин А.С., Маргарян А.Л., Абрамян В.К., Оганесян Д.Л., Акопян Н.Г., Арутюнян В.М. Дифракция света на решётках с периодическим микрорельефом при отрицательном знаке оптической анизотропии материала // Международная конференция «Физические свойства материалов и дисперсных сред для элементов информационных систем, nanoэлектронных приборов и экологичных технологий».

Москва, 21–24 апреля 2015 г. М.: ИИУ МГОУ, 2015. С. 100.

24. Соломатин А.С. Влияние профиля микрорельефа периодических анизотропных структур на их дифракционные свойства // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2016. № 1. С. 74–87.

## REFERENCES

- Soifer V.A., Kotlyar V.V., Doskolovich L.L. Difraktsionnye opticheskie elementy v ustroistvakh nanofotoniki [Diffractive optical elements in nanophotonic devices] // Komp'yuternaya optika [Computer optics]. 2009. Vol. 33. no. 4. pp. 352–368.
- Nevskaya G.E., Tomilin M.G. Adaptivnye linzy na osnove zhidkikh kristallov [Adaptive lenses based on liquid crystals] // Opticheskii zhurnal [Journal of Optics]. 2008. Vol. 75. no. 9. pp. 35–48.
- Belyaev V., Solomatin A., and 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.
- 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.
- Belyaev V.V., Solomatin A.S. Opticheskie svoistva gibriddnykh zhidkokristallicheskikh yacheek pri razlichnykh ugakh 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.
- Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N. Phase retardation difference of liquid-crystal cells with symmetric and asymmetric boundary conditions // Molecular Crystals & Liquid Crystals. 2014. Vol. 596. pp. 22–29.
- Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N. Opticheskie svoistva ZhK yacheek s proizvol'nym kraevym uglom naklona direktora [Optical properties of liquid-crystal cells with an arbitrary boundary angle of the director pretilt] // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-Matematika [Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics]. 2013. no. 1. pp. 32–41.
- Belyaev B.B. Primenenie podlozhek s razlichnymi mikrorel'efami poverkhnosti v optoelektronike i ustroistvakh otobrazheniya informatsii [The use of substrates with different surface microreliefs in optoelectronics and display devices] // Opticheskii zhurnal [Journal of Optics]. 2005. Vol. 72. no. 9. P. 79.
- Prostranstvennye modulyatory sveta [Spatial light modulators]. Vasil'ev A.A., Kasasent D., Kompanets I.P., Parfenov A.V. M., Radio i svyaz', 1987. 320 p.
- Izgotovlenie polimernykh podlozhek s periodicheskim mikrorel'efom i issledovanie ikh opticheskikh svoistv [Fabrication of polymeric substrates with a periodic microrelief and study of their optical properties] / Bakeev N.F., Belyaev V.V., Volynskii A.L., Ivanov S.A., Konovalov V.A., Muravskii A.A., Min'ko A.A., Chistovskaya L.V., Yakovenko S.E. // Opticheskii zhurnal [Journal of Optics]. 2001. Vol. 68. no. 9. pp. 8995–9001.
- Belyaev V., Tsoy V., Tarashishin A. Modeling Optical Properties of Birefringent Substrates with Periodical Surface Microrelief for Application in Display Devices // Conf. Proc. of The 22nd Int. Display Research Conf. Nice, France. 2002. pp. 413–416.
- Tsyz V.I., Belyaev V.V., Tarashishin A.V., Litovchenko D.T., Misnik V.P. Simulation of light propagation through birefringent substrates with periodical surface microrelief // Optics Communications. 2005. Vol. 246. pp. 57–66.
- Tsyz V.I., Belyaev V.V., Tarashishin A.V., Trofimov S.M. Modelling the diffraction of light

- by structures with spatial periodicity of the optical parameters of the substance and of the surface relief // J. Optical Technology. 2003. Vol. 70. pp. 465–470.
14. Merkulov A.Y., Belyaev V.V., Belyaev A.A., Gorbunov A.A. Diffraction on anisotropic substrates with sinusoidal surface microrelief // Molecular Crystals & Liquid Crystals. 2014. Vol. 596. pp. 122–127.
15. Belyaev V.V., Tsot V.I., Kushnir E.M., Klyckov A.V., Kalashnikov A.Y. Polarized light diffraction on anisotropic substrates with rectangular and sine microrelief // Journal of the SID. 2005. Vol. 13. pp. 305–308.
16. Belyaev V.V., Novikovich V.M., Denisenko P.L. Diffraction on birefringent elements with sine surface microrelief // Journal of the SID. 2008. Vol. 16. pp. 961–967.
17. Belyaev V.V., Chistovskaya L., Konovalov V., Muravsky A., Tarasishin A., Trofimov S., Tsot V., Volynsky A., Yakovenko S. Physical properties of stretched polymeric substrates with periodic microrelief for optical diffraction elements and liquid crystals alignment. // Journal of the SID. 2003. Vol. 11. pp. 3–13.
18. Belyaev V.V. Using substrates with various surface microreliefs in optoelectronics and information-display devices // J. Optical Technology. 2005. Vol. 72. pp. 719–724.
19. Belyaev V.V., Mazaeva V.G., Solomatin A.S., Muravskii A.A., Gorbunov A.A., Muravskii A.A., New organosilicon oligomer films for NLC alignment, Proc. Int. Conf. 2011 China display/Asia display, Kunshan, China, 6–9 November 2011.
20. Управление излучением в среднем инфракрасном диапазоне длин волн с помостью ю зhidkokristallicheskoi fazovoi reshetki [Control of radiation in the middle infrared range of wavelengths using liquid-crystal phase gratings] / Oganesyan D.L., Margaryan A.L., Akopyan N.G., Arutyunyan V.M., Belyaev V.V., Solomatin A.S. // Izvestiya NAN Armenii. Fizika. [Izvestia of Armenia NAS. Physics]. 2015. Vol. 50. no. 1. pp. 74–84.
21. Belyaev V.V., Merkulov A.Y., Belyaev A.A., Solomatin A.S., Gorbunov A.A. Diffraction on Anisotropic Substrates with Surface Microrelief. // Proc. EuroDisplay'11 Arcachon, France. 2011. pp. 121–124.
22. Solomatin A.S. Fizicheskie svoistva kondensirovannykh sistem s neodnorodnoi strukturoi v mikro- i nanometrovom diapazone [The physical properties of condensed systems with non-uniform structure in the micro- and nanometer range] // Mezhdunarodnaya konferentsiya «Fizicheskie svoistva materialov i dispersnykh sred dlya elementov informatsionnykh sistem, nanoelektronnykh priborov i ekologichnykh tekhnologii». Moskva, 21–24 aprelya 2015 g [International conference "Physical properties of materials and disperse media for elements of information systems, nanoelectronic devices and environmentally friendly technologies." Moscow, 21–24 April 2015]. M., IIU MGOU, 2015. P. 17.
23. Difraktsiya sveta na reshetkakh s periodicheskim mikrorel'eform pri otritsatel'nom znake opticheskoi anizotropii materiala [The light diffraction on lattices with periodic microrelief with a negative sign of the optical anisotropy of the material] // Mezhdunarodnaya konferentsiya «Fizicheskie svoistva materialov i dispersnykh sred dlya elementov informatsionnykh sistem, nanoelektronnykh priborov i ekologichnykh tekhnologii». Moskva, 21–24 aprelya 2015 g [International conference "Physical properties of materials and disperse media for elements of information systems, nanoelectronic devices and environmentally friendly technologies." Moscow, 21–24 April 2015] / Belyaev V.V., Solomatin A.S., Margaryan A.L., Abramyan V.K., Oganesyan D.L., Akopyan N.G., Arutyunyan V.M. M., IIU MGOU, 2015. P. 100.
24. Solomatin A.S. Vliyanie profilya mikrorel'efa periodicheskikh anizotropnykh struktur na ikh difraktsionnye svoistva [The influence of the microrelief profile of periodic anisotropic structures on their diffraction properties] // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo

oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-Matematika [Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics]. 2016. no. 1. pp. 74–87.

### 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. Жидкокристаллические дифракционные оптические элементы с неоднородным распределением директора. // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2016. № 4. С. 56–67.  
DOI: 10.18384/2310-7251-2016-4-56-67.

### BIBLIOGRAPHIC REFERENCE

*A. Solomatin, V. Belyaev. Liquid-crystal diffractive optical elements with an inhomogeneous distribution of the director. // Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics. 2016. no. 4. pp. 56–67.*

DOI: 10.18384/2310-7251-2016-4-56-67.