

**Эффективность дифракционных решеток  
на основе жидких кристаллов***Д. Д. Барма, А. Р. Гейвандов, Д. Г. Денисов*

*Методом голографии на тонком слое дихроичного ориентирующего красителя были записаны дифракционные решетки, собраны и исследованы жидкокристаллические ячейки для получения электрически-управляемой дифракции в видимом диапазоне. При помощи программного обеспечения для моделирования электрооптических эффектов была рассчитана дифракционная эффективность (ДЭ) фазовой решетки на основе жидкого кристалла (ЖК) в зависимости от амплитуды напряжения на электродах и оценено изменение ДЭ в зависимости от толщины ячейки, двулучепреломления ЖК-материала и длины волны излучения. Экспериментальные результаты качественно совпали с результатами расчета. В случае фазовой решетки, сформированной в объеме ЖК-ячейки ДЭ в 1-м порядке достигала ~16 % на длине волны 532 нм. Установлено, что ДЭ уменьшается с увеличением длины волны.*

*Ключевые слова:* дифракция, жидкий кристалл, дифракционная решетка, дифракционная эффективность, фазовая решетка.

**DOI:** 10.51368/2307-4469-2021-9-2-144-152

**Введение**

Классическая дифракционная решетка – это оптический элемент, действие которого основано на явлении интерференции, приводящей к отклонению направления распространения света от нормали. Решеткой

может быть набор дифрагирующих элементов, таких как узор из прозрачных щелей или отверстий в непрозрачном экране, или набор отражающих канавок на подложке. Дифракция на решетке является в свою очередь многолучевой интерференцией согласно принципу Гюйгенса-Френеля [1], по которому в каждой точке пространства поле волны можно рассматривать как источник вторичных волн, распространяющихся, в том числе, и в области геометрической тени препятствия. Таким образом, дифракционная картина, возникающая, например, на экране, определяется как результат процесса интерференции электромагнитных волн, приходящих от всех щелей. Поскольку щели разделены одинаковым расстоянием, то разности хода лучей, поступающих из двух соседних щелей, будут для выделенного направления идентичны по всей решетке.

**Барма Дарья Денисовна**<sup>1</sup>, студент.

E-mail: dashabarma@mail.ru

**Гейвандов Артур Рубенович**<sup>2</sup>, с.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: ageivandov@yandex.ru

**Денисов Дмитрий Геннадьевич**<sup>1</sup>, доцент, к.т.н.

E-mail: denisov\_dg@mail.ru

<sup>1</sup> МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

<sup>2</sup> Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова

ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Россия, 119333, Москва, Ленинский просп., 59.

*Статья поступила в редакцию 26 марта 2021 г.*

© Барма Д. Д., Гейвандов А. Р., Денисов Д. Г.,  
2021

Независимо от того, является ли решетка отражающей или пропускающей, принцип ее действия основан на пространственной модуляции ее оптических параметров. Периодическое изменение показателя преломления решетки позволяет получить предсказуемое изменение амплитуды или фазы проходящего света. Дифракционные решетки (ДР) находят свое применение в спектрометрах оптического и инфракрасного диапазонов [2], а также в качестве оптических датчиков линейных и угловых перемещений [3].

Жидкокристаллическая технология позволяет расширить возможности применения дифракционных решеток. За счет периодического изменения ориентации директора жидкого кристалла (ЖК) достигается необходимая модуляция показателя преломления. В нашем случае направление ориентации задается с помощью лазерной записи интерференционной картины (голограммы) в тонком слое дихроичного красителя на подложке, который используется в качестве ориентирующего слоя ЖК [4]. Период голографической решетки определяется углом между двумя интерферирующими пучками. ДР на основе ЖК применяются в устройствах управления и формирования лазерного пучка [5, 6], лидарах [7], а также в ЖК-линзах с перестраиваемым фокусным расстоянием [8–11].

Целью данной работы была разработка и исследование электрически-управляемых фазовых дифракционных решеток на основе нематического ЖК.

### Экспериментальное исследование дифракционной эффективности

Для проведения эксперимента была изготовлена ЖК-ячейка. Для этого на одну из стеклянных подложек с прозрачным

электродом методом центрифугирования был нанесен дихроичный азокраситель ПЧЖ («протравной чисто-желтый» [12]). Затем, используя установку, схема которой показана на рис. 1, а, на пленку красителя была спроецирована голографическая решетка (длина волны лазера 457 нм), возникающая в результате интерференции двух пучков с левой и правой круговыми поляризациями, в соответствии со схемой на рис. 1, б. Период записанной решетки  $\Lambda = 5,2$  мкм. На вторую подложку для ЖК-ячейки наносили полиимид с последующим натиранием для получения планарной ориентации ЖК. Далее на подложку напыляли калиброванные сферические пластиковые спейсеры Micropearl (Sekisui) диаметром 4 мкм, задающие величину зазора в собранной ячейке. После сборки было проведено измерение зазора пустой ячейки ( $d = 4,3$  мкм) интерференционным методом.

Ячейка заполнялась капиллярным методом нематической ЖК-смесью E7 (Merck). На рис. 1, в показана фотография заполненной ЖК-ячейки расположенной между скрещенными поляризаторами.

С помощью лабораторной установки (рис. 2, а) и измерителя мощности лазерного излучения LP1 (Sanwa) было проведено измерение интенсивности и углов дифракции для разных дифракционных максимумов (рис. 2, б) на длине волны 532 нм (падающий пучок имеет линейную поляризацию). Дифракционная эффективность (ДЭ) была вычислена по формуле:

$$\eta = \frac{I_i}{I_{\text{пад}}},$$

где  $I_i$  – интенсивность  $i$ -го максимума;  $I_{\text{пад}}$  – интенсивность света, падающего на ячейку.

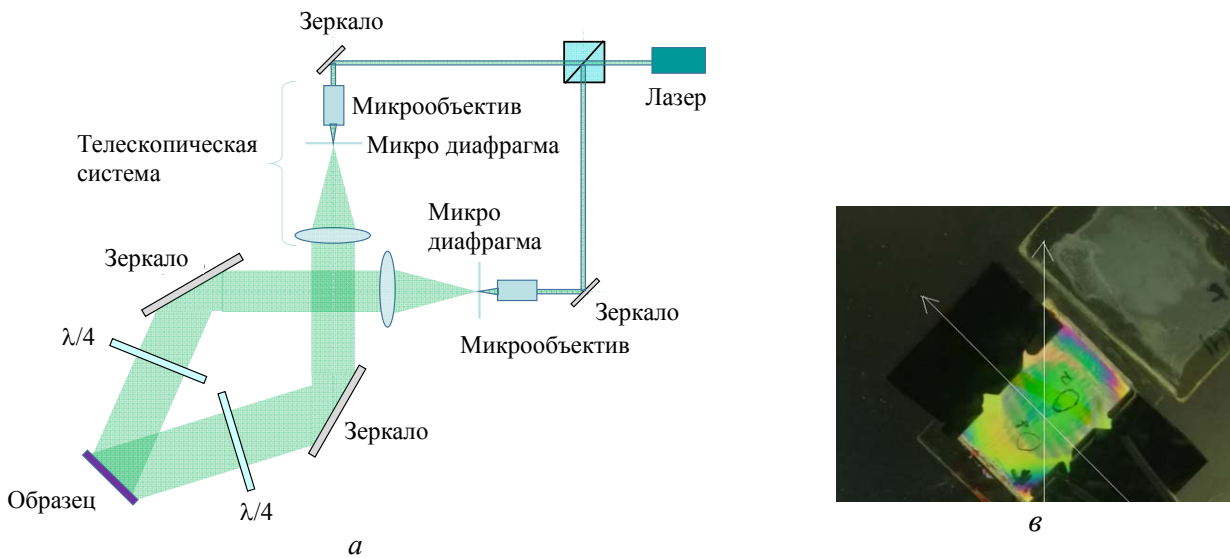


Рис. 1. Установка для записи голограммы (а), схема экспонирования (б), фотография ЖК-ячейки (вид в скрещенных поляризаторах) (в).

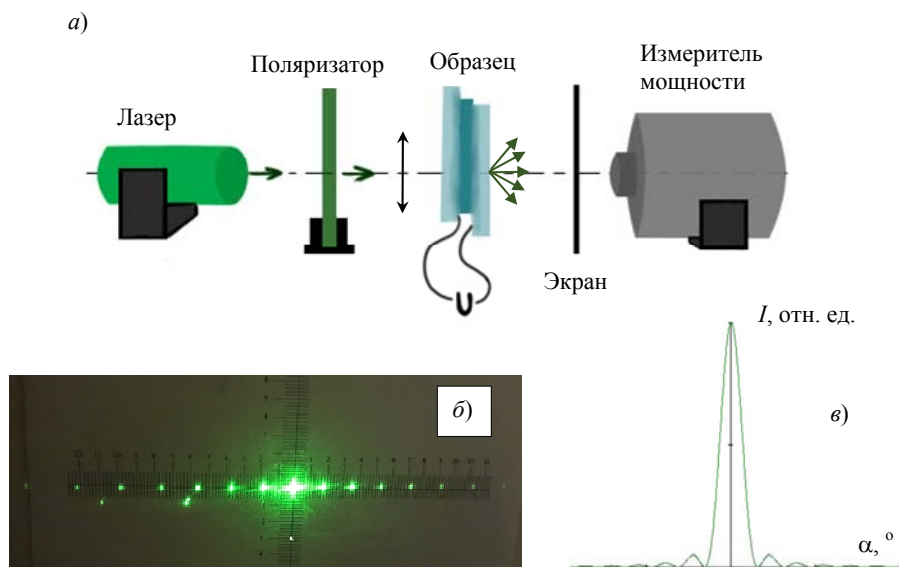
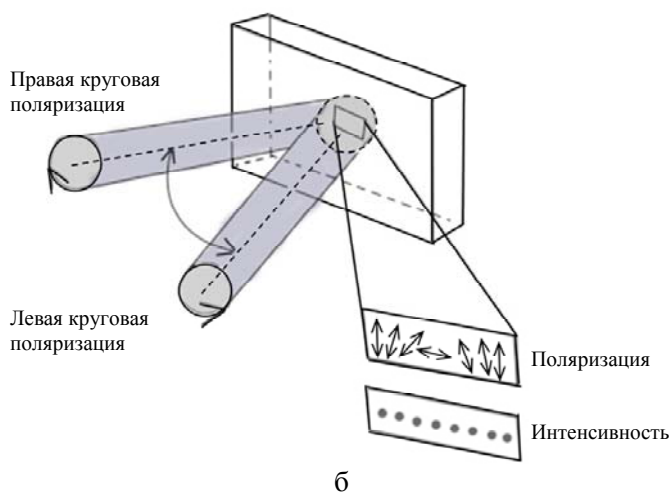


Рис. 2. Установка для измерения интенсивности (а), дифракционная картина на экране (б), относительное угловое распределение интенсивности на экране (в).

Экспериментально измеренное распределение ДЭ 1-го порядка имеет вид, показанный на рис. 3, *а*, *б* соответственно для зависимости от угла и от напряжения.

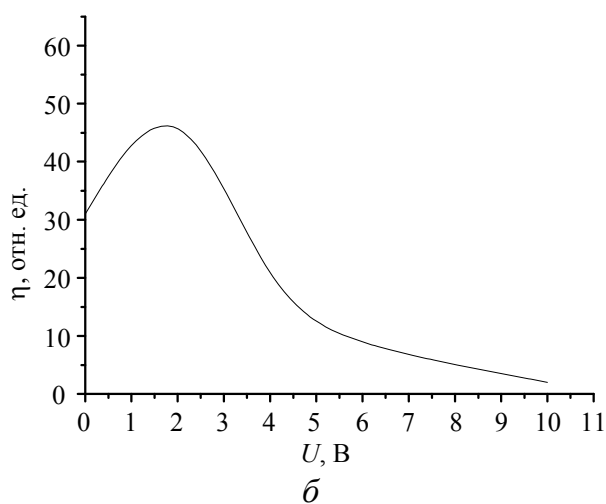
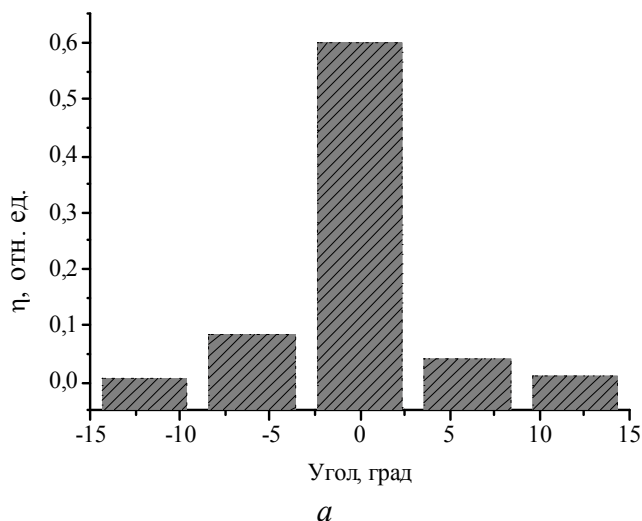


Рис. 3. Измеренная зависимость ДЭ 1-го порядка от угла (*а*) и от приложенного напряжения (*б*).

Отметим, что интенсивность отрицательных и положительных максимумов (отмеченных слева знаком (–) и справа (+) от центрального максимума) не одинакова. Это может быть связано как с локальной неоднородностью ЖК-ячейки, так и с наличием доменов, которые задают неодинаковые величины фазовой задержки

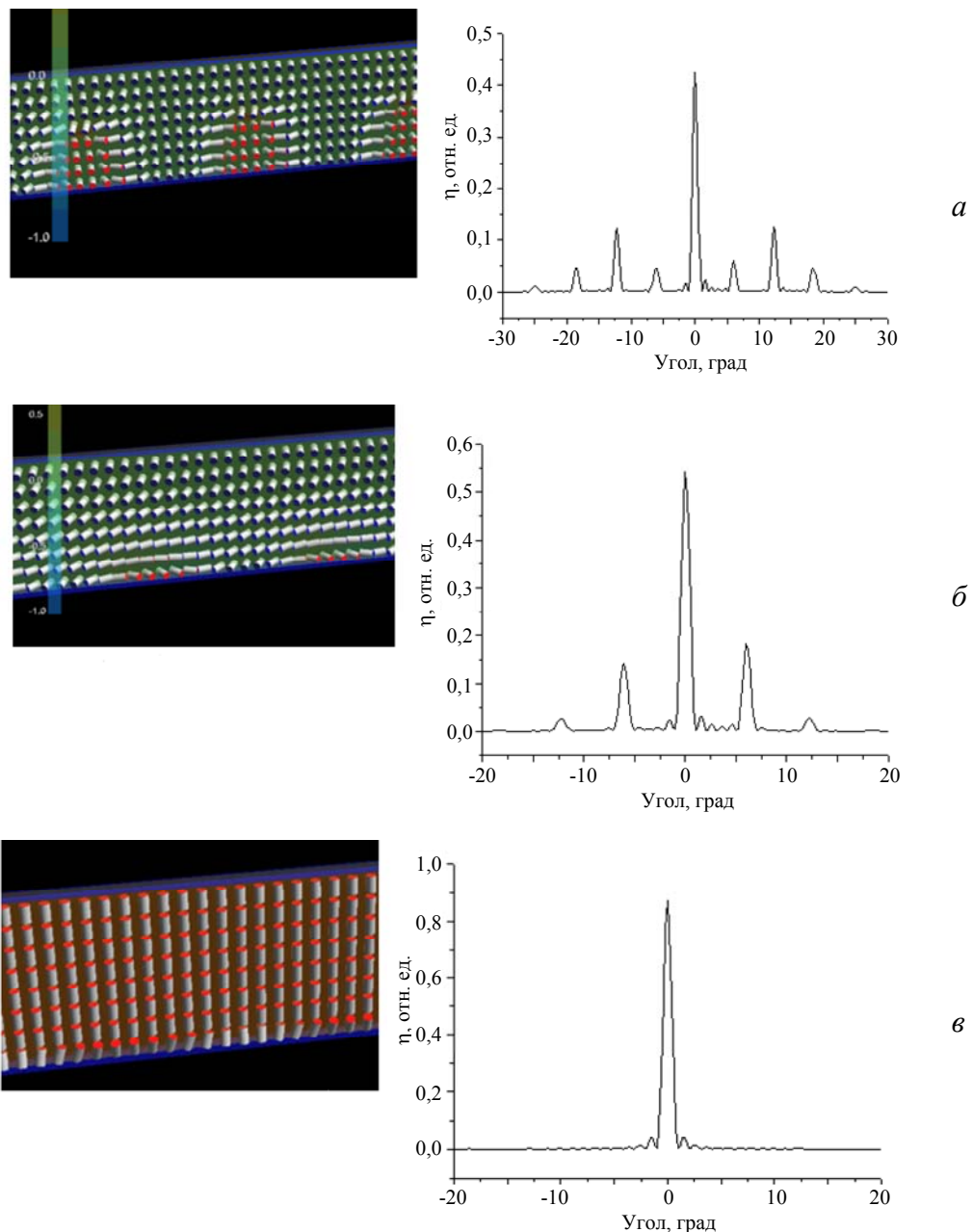
для ортогональных круговых поляризаций. Мы исследовали зависимость дифракционной эффективности 1-го порядка от напряжения на электродах ЖК-ячейки (рис. 3). Легко заметить, что при повышении напряжения ячейка перестает проявлять свои дифракционные свойства, так как под действием высокого (~10 В) напряжения происходит переориентация директора жидкого кристалла вдоль нормали и фазовая решетка в объеме слоя ЖК исчезает.

### Моделирование в программном обеспечении LCDTDK

Для моделирования использовалось программное обеспечение LCDTDK 4.0 (автор С. П. Палто). В основе оптических расчетов лежит нахождение распределения директора ЖК в слое путем решения уравнений континуальной теории ЖК с последующим решением уравнений Максвелла [13]. Для решения уравнений Максвелла и, соответственно, оптической задачи используется матричный метод Берремана [14].

В программе использовались следующие параметры ЖК E7 [15]: двулучепреломление  $\Delta n = 0,224$  (при  $\lambda = 589$  нм), диэлектрическая анизотропия  $\Delta \epsilon = +13,8$  ( $\epsilon_{par} = 19,0$ ), вязкость 0,19 (Па·с), коэффициенты упругости  $K_{11} = 11,1$  пН,  $K_{22} = 6,5$  пН,  $K_{33} = 17,1$  пН [16]. На первой поверхности ЖК-слоя задавалось распределение директора по циклоиде с периодом, соответствующим экспериментальному значению.

Ниже приведены рассчитанные графики распределения директора ЖК для решетки с периодом  $\Lambda = 5,2$  мкм (толщина ячейки  $d = 4,3$  мкм) и рассчитанная для данного распределения дифракционная эффективность на длине волны 550 нм (рис. 4).



**Рис. 4.** Распределение директора ЖК и зависимость ДЭ от угла: *а* – начальный момент времени при  $U = 0$  В; *б* –  $t = 20$  мс при  $U = 0$  В; *в* –  $t = 80$  мс при напряжении  $U = 10$  В.

Отметим, что при включении внешнего поля в объеме ЖК в середине слоя начинает устанавливаться гомеотропная ориентация. При напряженностях поля, превышающих пороговые, большая часть ЖК-слоя превращается в квази-одноосный кристалл, в котором свет распространяется вдоль оптической оси. Таким образом, эффект внесения фазовой задержки между ортогональными поляризациями подавляется. При этом заметно, что при напряжении 10 В планарно-ориентированным остается, только близкий к поверх-

ности пленки красителя подслоя ЖК. Это объясняется сцеплением ЖК с поверхностью.

Для сравнительной оценки результатов моделирования, полученных в программном обеспечении, с данными эксперимента, был построен график зависимости дифракционной эффективности от прикладываемого напряжения (рис. 5).

График на рис. 5 наглядно демонстрирует сходимость характеров распределения ДЭ, полученных численными методами и в результате эксперимента.

Путем моделирования мы оценили как изменяется ДЭ в первом порядке в зависимости от параметров ячейки, а именно, таких как толщина ЖК-ячейки, двулучепреломление ЖК. Соответствующие данные приведены на рис. 6 и 7. Моделирование

показало, что ДЭ в первом порядке уменьшается с увеличением длины волны света, а угол отклонения линейно увеличивается от  $4,3^\circ$  на 400 нм до  $8,8^\circ$  на 800 нм (рис. 7), что соответствует известному закону Брэгга в случае малых углов.

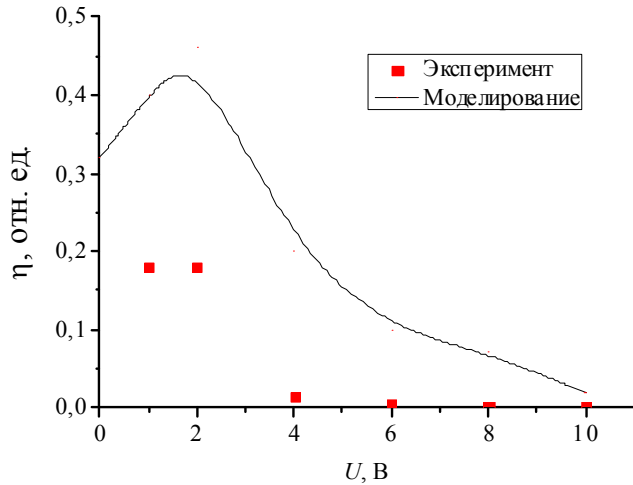


Рис. 5. Зависимость дифракционной эффективности от прикладываемого напряжения.

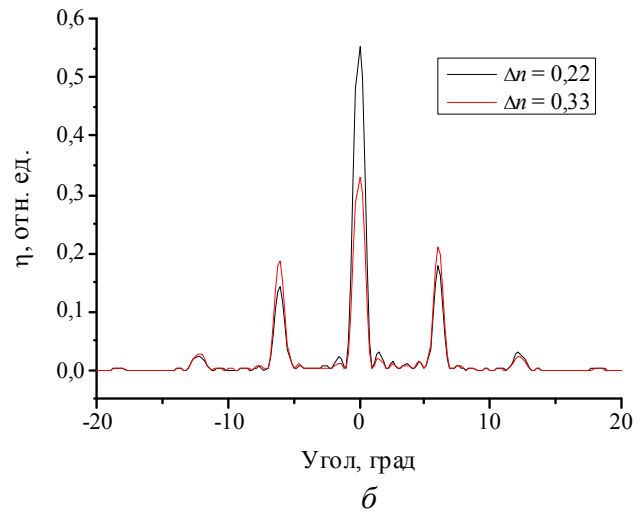
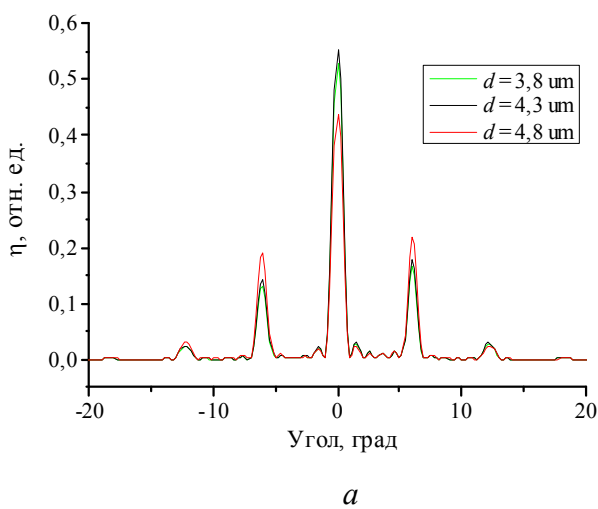


Рис. 6. Рассчитанная ДЭ в первом порядке от толщины ячейки (а) и двулучепреломления ЖК (б).

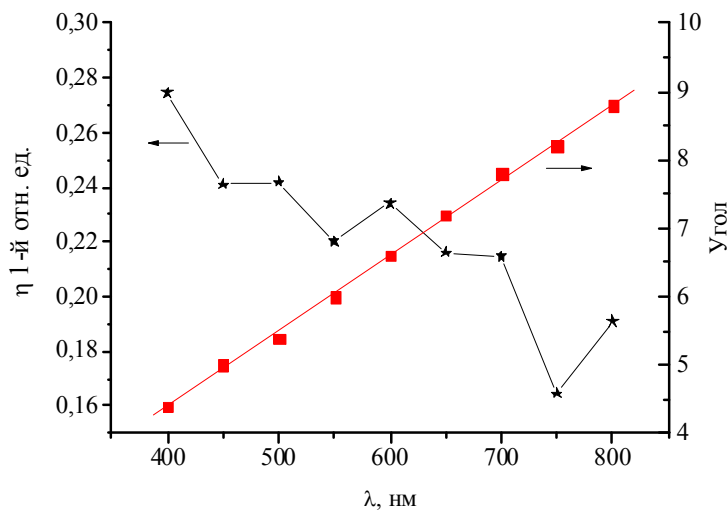
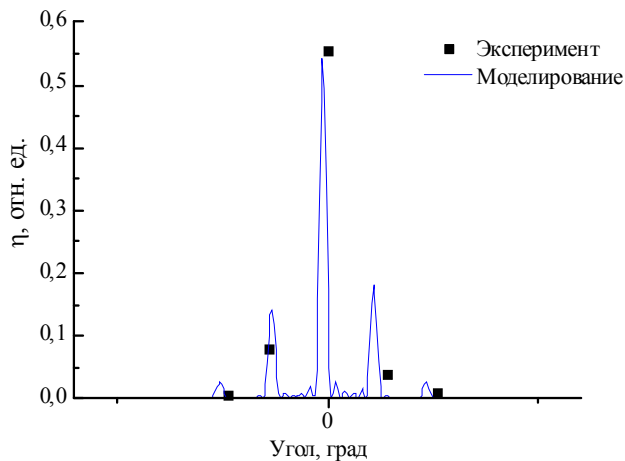


Рис. 7. Рассчитанные зависимости ДЭ и угла дифракции в первом порядке от длины волны.



В приведенных на рис. 8 угловых зависимостях ДЭ, полученных экспериментальным путем и при моделировании ЖК-ячейки, наблюдается некоторое расхождение. Дело в том, что в экспериментальном модулированном слое ЖК присутствуют домены, отличающиеся углом преднаклона, которые снижают ДЭ.



**Рис. 8.** Модельная и экспериментальная угловые зависимости ДЭ ЖК-ячейки с решеткой с периодом 5,2 мкм.

### Заключение

В ходе работы на полученных решетках были проведены экспериментальные исследования, посвященные вычислению дифракционной эффективности в зависимости от порядка дифракции и приложенного напряжения. С целью сравнения экспериментальных и теоретических результатов было проведено численное моделирование в программном пакете LCDTDK. Рассчитав распределение директора ЖК, была вычислена дифракционная картина и получен график зависимости ДЭ от угла дифракции, который согласуется с результатами эксперимента.

Экспериментально исследована дифракционная эффективность ЖК-ячейки. Достигнута ДЭ в первом порядке 14 % (длина волны 532 нм). Собрана установка для измерения интенсивности дифрагированного света. Для исследуемой системы

смоделирована ДЭ в зависимости от приложенного напряжения, угла, двулучепреломления ЖК-материала, толщины ячейки. Моделирование показало, что угол отклонения дифракции первого порядка линейно возрастает с увеличением длины волны, а ДЭ — уменьшается.

*Авторы благодарят Н. Муравьева за помощь в записи голограмм.*

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / Пер. с англ. — М.: Изд. «Наука», 1973.
2. Соколова Е. А. «Дифракционные решетки нового поколения. Их теория, изготовление и применение в спектральных приборах», диссертация на соискание степени д.т.н. — С.-Петербург, 2000.
3. Знаменский М. Ю., Лукашевич Я. К., Скочилов А. Ф., Федулова Н. А. // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 3. С. 51.
4. Crawford G. P., Eakin J. N., Radcliffe M. D., Callan-Jones A., Pelcovits R. A. // J. of Appl. Phys. 2005. Vol. 98. P. 123102.
5. Gao K., McGinty C., Payson H., Berry S., Vornehm J., Finnemeyer V., Roberts B., Bos P. // Optics Express. 2017. Vol. 25. № 6. P. 6283.
6. Tien C.-L., Lin R.-J., Su S.-H., Horng C.-T. // Advances in Condensed Matter Phys. 2018. Article ID 7849529. DOI: 10.1155/2018/7849529.
7. Seldomridge N. L., Shaw J. A., Repasky K. S. // Optical Engineering. 2006. Vol. 45. P. 106202. DOI: 10.1117/1.2358636
8. Соломатин А. С. // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2016. № 3. С. 37.
9. Ye M., Wang B., Takahashi T., Sato S. // Optical Review. 2007. Vol. 14. P. 173. DOI: 10.1007/s10043-007-0173-3.
10. Gao K., Cheng H.-H., Bhowmik A. K., Bos P. J. // Opt. Express. 2015. Vol. 23. P. 26086. DOI: 10.1364/OE.23.026086

11. Lee Y. H., Tan G., Weng Y., Wu S.-T. // SID Symp. Digest of Technical Papers. 2017. P. 1061. DOI: 10.1002/sdtp.11822
12. Петрова С. С., Шавердова В. Г. // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. Вып. 5. С. 65.
13. Palto S. P. // Crystallography Rep. 2004. Vol. 48. P. 124.
14. Палто С. П. // ЖЭТФ. 2001. Т. 119. Вып. 4. С. 638.
15. Li J., Wen C. H., Gauza S., Lu R., Wu S.-T. // J. Disp. Technol. 2005. Vol. 1. P. 51.
16. Pestov S., Vill V. Liquid Crystals in Springer Handbook of Materials Data 2018. P. 959–991.

PACS: 61.30.Gd; 78.15.+e; 42.25.Fx; 42.40.Eq

## Efficiency of diffraction gratings based on liquid crystals

*D. D. Barma<sup>1</sup>, A. R. Geivandov<sup>2</sup>, and D. G. Denisov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University  
5 2-nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia  
E-mail: dashabarma@mail.ru

<sup>2</sup> Shubnikov Institute of Crystallography of Federal Scientific Research Centre  
“Crystallography and Photonics” of Russian Academy of Sciences  
59 Leninsky prospect, Moscow, 119333, Russia

*Received March 26, 2021*

***We have recorded geometric-phase diffraction grating using the method of holography on a thin layer of dichroic dye. A transmission liquid crystal cell has been assembled in order to obtain electrically-controlled diffraction in visible range. Also, using software for electrooptical effects modeling we have calculated the diffraction efficiency (DE) of the LC-based phase grating as a function of the voltage amplitude at the electrodes, estimated the DE variation as a function of LC cell thickness, LC material birefringence and the radiation wavelength. The experimental data qualitatively matched with calculation results. 1-st order DE of ~16 % (at 532 nm) has been obtained for single-sided phase grating LC. Furthermore, we have observed the decrease of DE with the increase of radiation wavelength.***

**Keywords:** diffraction, liquid crystal, diffraction grating, diffraction efficiency, geometric-phase grating.

**DOI:** 10.51368/2307-4469-2021-9-2-144-152

### REFERENCES

1. M. Born and E. Wolf, *Principles of optics* (Nauka, Moscow, 1973).
2. E. A. Sokolova. "Diffraction gratings of a new generation. Their theory, production and application



in spectral devices", dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, St. Petersburg, 2000.

3. M. Yu. Znamensky, Ya. K. Lukashevich, A. F. Skochilov, and N. A. Fedulova, *Optical journal* **81** (3), 51 (2014).

4. G. P. Crawford, J. N. Eakin, M. D. Radcliffe, and R. A. Pelcovits, *J. of Appl. Phys.* **98**, 123102 (2005).

5. K. Gao, C. McGinty, H. Payson, S. Berry, J. Vornehm, V. Finnemeyer, B. Roberts, and P. Bos, *Optics Express* **25** (6), 6283 (2017).

6. C.-L. Tien, R.-J. Lin, S.-H. Su, and C.-T. Horng, *Advances in Condensed Matter Phys.* (2018). Article ID 7849529. DOI: 10.1155/2018/7849529.

7. N. L. Seldomridge, J. A. Shaw, and K. S. Repasky, *Optical Engineering* **45**, 106202 (2006). DOI: 10.1117/1.2358636

8. A. S. Solomatin, *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Series: Physics-Mathematics*, No. 3, 37 (2016).

9. M. Ye, B. Wang, T. Takahashi, and S. Sato, *Optical Review* **14**, 173 (2007).

DOI: 10.1007/s10043-007-0173-3.

10. K. Gao, H.-H. Cheng, A. K. Bhowmik, and P. J. Bos, *Opt. Express* **23**, 26086 (2015).

DOI: 10.1364/OE.23.026086

11. Y. H. Lee, G. Tan, Y. Weng, and S.-T. Wu, *SID Symp. Digest of Technical Papers*, p. 1061 (2017).

DOI: 10.1002/sdtp.11822

12. S. S. Petrova and V. G. Shaverdova, *Tech. Phys.* **77** (5), 65 (2007).

13. S. P. Palto, *Crystallography Rep.* **48**, 124 (2004).

14. S. P. Palto, *JETP* **92** (4), 552 (2001).

15. J. Li, C. H. Wen, S. Gauza, and S.-T. Wu, *J. Disp. Technol.* **1**, 51 (2005).

16. S. Pestov and V. Vill, *Liquid Crystals in Springer Handbook of Materials Data 2018*, p. 959–991.