

УДК 532.783:535.4

УПРАВЛЯЕМЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ БИНАРНОЙ ОРИЕНТАЦИИ НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

© 2022 г. К. Г. Комяк¹ *, О. С. Кабанова¹, И. И. Рушнова¹, Е. А. Мельникова¹, А. Л. Толстик¹

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

*E-mail: fiz.komyak@bsu.by

Поступила в редакцию 10.06.2021 г.

После доработки 21.07.2021 г.

Принята к публикации 22.09.2021 г.

Для создания одномерных дифракционных решеток использована технология текстурированной фотоориентации нематического жидкого кристалла. Установлено влияние ориентации молекул в смежных жидкокристаллических доменах на дифракционные свойства изготовленных бинарных структур. Дифракционные решетки на основе бинарной ориентации нематического жидкого кристалла характеризуются электрически переключаемыми оптическими свойствами и реализуют эффективное управление пространственными и поляризационными характеристиками световых пучков.

DOI: 10.31857/S036767652201015X

ВВЕДЕНИЕ

Жидкие кристаллы (ЖК) представляют собой уникальный класс мягких органических материалов, сочетающих свойства жидкостей с определенной степенью ориентационной упорядоченности молекул. Являясь двулучепреломляющими оптическими средами, ЖК позволяют выполнять ряд важнейших операций, связанных с генерацией, детектированием и преобразованием состояний поляризации света. Способность самоорганизовываться в сложные структуры наряду с высокой чувствительностью к воздействию внешних полей (электрических, тепловых, оптических) обуславливают востребованность ЖК-материалов в области создания конкурентоспособных фотонных компонент, таких как оптические фильтры, переключатели, дифракционные решетки, массивы линз, вортекс ретардеры, пространственные модуляторы света и другие устройства [1–7].

В качестве оптических элементов, реализующих пространственное управление, мультиплексирование, а также преобразование состояния поляризации световых пучков успешно применяются переключаемые дифракционные ЖК-решетки [8–11]. Принцип создания структур данного типа основан на формировании локально-неоднородного (многодоменного) распределения ЖК на токопроводящей поверхности. Для управления ориентацией ЖК-материалов используются электроды специальной конфигурации, микронатирание ориен-

тирующих пленок, а также метод текстурированной фотоориентации светочувствительных азокрасителей.

Технология текстурированной фотоориентации ЖК-материалов [12, 13] продемонстрировала большие успехи в последние десятилетия, став оптимальным решением для создания периодически упорядоченных одно-, дву- и трехмерных оптических структур, реализующих управление пространственными, фазовыми и поляризационными характеристиками световых полей [14–16]. Бесконтактный метод фотоориентации обеспечивает возможность локального управления распределением директора ЖК на поверхности с высоким пространственным разрешением (порядка единиц микрон). Среди фотоориентируемых материалов, применяемых для задания граничных условий распределения директора ЖК, лидирующие позиции занимают азокрасители. Светочувствительные азокрасители представляют собой универсальную платформу материалов для развития современных технологий микро- и наноструктурирования в фотонике. Преимуществами фотоориентируемых азокрасителей является высокая азимутальная энергия сцепления с ЖК-материалами (порядка 10^{-4} Дж · м⁻²), фото- и термостабильность ориентирующих свойств, высокая фоточувствительность в видимой области спектра. В этой связи изучение возможностей применения фотоориентируемых азокрасителей для создания

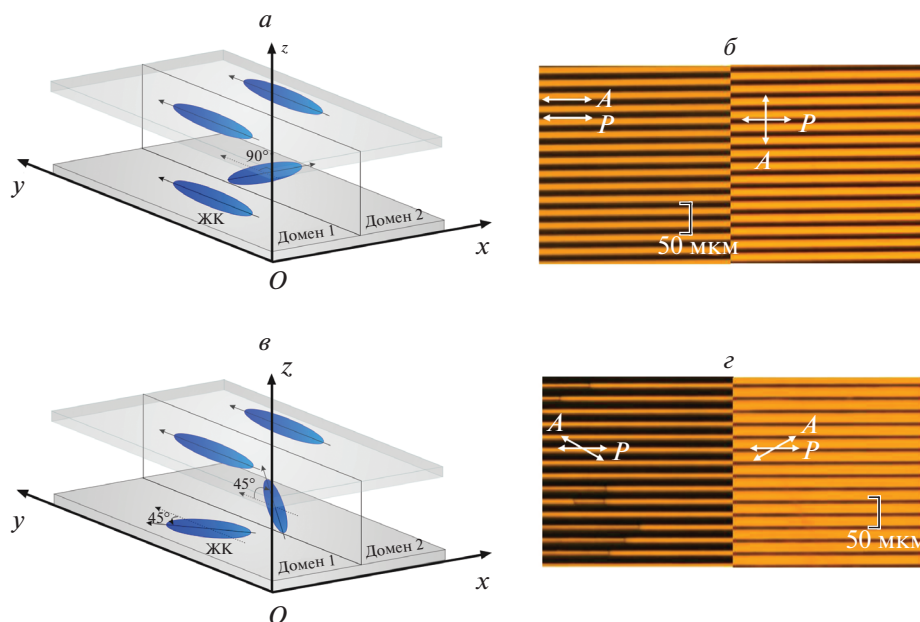


Рис. 1. Схема (а, в) и соответствующие поляризационные микрофотографии (б, з) бинарных дифракционных структур с твист/планарной (а, б) ориентацией ЖК и с твист/твист ориентацией (в, з), характеризующейся противоположным направлением закрутки ЖК в смежных доменах, при напряжении $U = 0$.

локально-неоднородных ЖК-структур, реализующих пространственно-поляризационное управление светом, безусловно, является актуальной задачей.

В работе продемонстрированы переключаемые одномерные решетки с бинарной ориентацией нематического ЖК, изготовленные методом текстурированной фотоориентации пленок азокрасителя AtA-2. Интенсивность и состояние поляризации излучения, дифрагированного в 0-ой и 1-ый порядки, контролировались при помощи внешнего переменного электрического поля, вызывающего переориентацию директора ЖК в объеме слоя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Функциональную основу электрически переключаемых дифракционных решеток составляли тонкие слои нематического ЖК, характеризующиеся локально-неоднородной (бинарной) ориентацией молекул. В работе рассмотрены две разновидности бинарных структур, отличающиеся вариантами ориентации молекул в смежных ЖК-доменах (рис. 1). Первая исследуемая структура основана на периодическом чередовании ЖК-доменов с твист/планарной ориентацией молекул (рис. 1а). Характерной особенностью второй исследуемой структуры являлась твист/твист ориентация с противоположным направлением закрутки ЖК в смежных доменах (рис. 1в).

Для изготовления ЖК-ячеек типа сэндвича использовались стеклянные подложки, равномерно покрытые токопроводящим слоем оксида индия-олова (ITO) с сопротивлением 50 Ом/Г. В качестве фотоориентируемого материала был выбран светочувствительный азокраситель AtA-2 [17], синтезированный в лаборатории “Материалы и технологии ЖК-устройств” Института химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси. Тонкие пленки азокрасителя AtA-2 наносились на тщательно очищенную поверхность подложек методом род коутинга с использованием автоматизированной лабораторной установки [18]. Формирование ориентирующих свойств азокрасителя AtA-2 реализовывалось при облучении последнего линейно поляризованным светом с длиной волны 465 нм, причем направление наведенной поверхностной ориентации было перпендикулярно направлению поляризации активирующего излучения. Для изготовления ячеек с бинарной ориентацией ЖК предварительно подготавливалось два вида подложек: А – подложки с однородной планарной ориентацией азокрасителя и В – подложки с бинарной (твист/планарной либо твист/твист) ориентацией азокрасителя. Для формирования бинарных поверхностно-ориентирующих структур реализовывался одномасочный процесс, включающий двухэтапное облучение подложек вида В линейно поляризованным излучением светодиодной матрицы ($\lambda = 465$ нм,

$P = 60 \text{ мВ} \cdot \text{см}^{-2}$). После первого этапа равномерного облучения поверхности пленки (доза облучения $D_1 = 2.0 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$) производилось повторное облучение ($D_2 = 9.0 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$) последней через амплитудную фотомаску с периодом $\Lambda = 20 \text{ мкм}$, что позволило изменить направление ориентирующих структур в немаскированных областях путем поворота плоскости поляризации активирующего излучения на заданный угол. Подложка вида А экспонировалась линейно-поляризованным излучением равномерно. Применение одномасочного процесса экспонирования пленок азокрасителя позволило изготовить бинарные дифракционные ЖК-структуры с: 1) чередующимися твист ($\beta = 90^\circ$) и планарными доменами и с 2) чередующимися противоположно закрученными твист доменами ($\beta_1 = 45^\circ$ и $\beta_2 = -45^\circ$), где β – угол закрутки ЖК. Толщина воздушного зазора в ячейках контролировалась при помощи волоконных спейсеров толщиной $d = 20 \text{ мкм}$. Заполнение ячеек нематическим ЖК-материалом – ЖК 1282 ($n_e = 1.678$, $n_o = 1.509$), НИОПИК, Россия – реализовывалось капиллярным способом в условиях изотропной фазы. Методом поляризационной микроскопии установлено, что изготовленные решетки характеризуются бездефектной ориентацией нематического ЖК (рис. 1б, 1в), а величина периода дифракционных структур составляет $\Lambda = 20 \text{ мкм}$, что совпадает с периодом амплитудной фотомаски, использованной в процессе текстурированной фотоориентации пленок азокрасителя.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для изучения дифракционных и поляризационных свойств изготовленных бинарных ЖК-структур использовалась экспериментальная установка, включающая He–Ne-лазер, генерирующий узконаправленный луч линейно поляризованного (вдоль оси OY) света с длиной волны 632.8 нм , ирисовую диафрагму, генератор переменных сигналов прямоугольной формы (частота 1 кГц), анализатор и фотодетектор, регистрирующий интенсивность дифрагированного в m -ый порядок излучения. Значения дифракционной эффективности η_m , характеризующей распределение энергии прошедшего света по порядкам дифракции m , рассчитывались по формуле:

$$\eta_m = \frac{I_m}{I_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где I_m – интенсивность света в m -ом порядке дифракции, I_0 – интенсивность светового пучка, падающего на решетку. На рис. 2 приведены зависимости дифракционной эффективности 0-го

и 1-го порядков от напряжения для двух вариантов бинарных ЖК-решеток.

Характерной особенностью дифракционной картины бинарной структуры с твист/планарной ориентацией ЖК являлось значительное уменьшение интенсивности четных дифракционных максимумов в условиях отсутствия напряжения на ячейке (рис. 2в), что указывает на прямоугольный профиль штриха решетки. При напряжениях на ячейке менее 1.5 В величины дифракционной эффективности для 0-го и 1-го порядка оставались неизменными на уровне $\eta_0 = 49\%$ и $\eta_1 = 16\%$ соответственно (рис. 2а). При напряжении $U = 1.5 \text{ В}$, что соответствует пороговому напряжению твист-эффекта для используемого нематического ЖК, начинался процесс переориентации ЖК-молекул, сопровождаемый изменением оптической анизотропии. В диапазоне управляющих напряжений $1.5\text{--}3.0 \text{ В}$ наблюдался значительный рост дифракционной эффективности 1-го порядка с 16 до 29% , вместе с тем дифракционная эффективность 0-го порядка уменьшалась с 49 до 19% (рис. 2а). При дальнейшем увеличении внешнего электрического поля имело место изменение ориентации ЖК-молекул с периодической бинарной на однородную гомеотропную, что сопровождалось увеличением интенсивности прошедшего светового пучка наряду со значительным уменьшением интенсивности световых пучков, дифрагированных в 1-ый порядок.

Бинарная структура с противоположно закрученной твист/твист ориентацией ЖК характеризовалась относительно меньшими значениями дифракционных эффективностей в выключенном состоянии: $\eta_0 = 61\%$ и $\eta_1 = 8\%$ (рис. 2б). При напряжениях на ячейке $U_1 = 1.35 \text{ В}$ и $U_2 = 2.70 \text{ В}$ наблюдалось одновременное уменьшение дифракционной эффективности 0-го порядка и увеличение дифракционной эффективности 1-го порядка. В случае достаточно больших напряжений ($U > 8.0 \text{ В}$) величина фазового набега $\varphi = 2\pi\Delta n d/\lambda$, где Δn и d двулучепреломление ЖК и толщина ячейки соответственно, стремилась к нулю, что привело к исчезновению дифракционных свойств.

На рис. 3 приведены полярные поляризационные диаграммы прошедших и дифрагированных в 1-ый порядок световых пучков при напряжениях на ячейках $U = 0$ и $U = 3.0 \text{ В}$. Падающее излучение было линейно поляризовано вдоль оси OY (рис. 3а, 3г). В выключенном состоянии направления поляризации прошедших пучков поворачивались на угол 45° и 90° в случае твист/планарной (рис. 3б) и противоположно закрученной твист/твист (рис. 3в) решетки соответственно. Вместе с этим, направление поляризации пучка, дифрагированного в 1-ый порядок, поворачива-

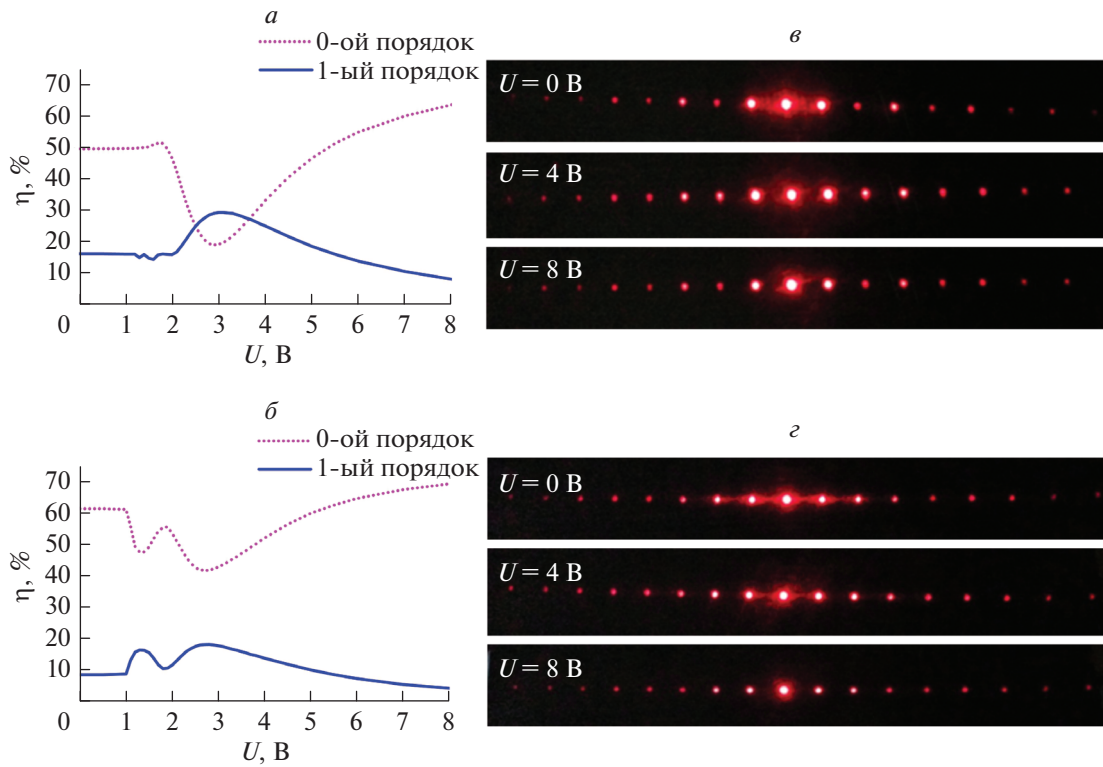


Рис. 2. Зависимости картин дифракции (*в, г*) и дифракционных эффективностей 0-го и 1-го порядков (*а, б*) от напряжения U для бинарных решеток с твист-планарной ориентацией ЖК (*а, в*) и с противоположно закрученной твист-твист ориентацией ЖК (*б, г*).

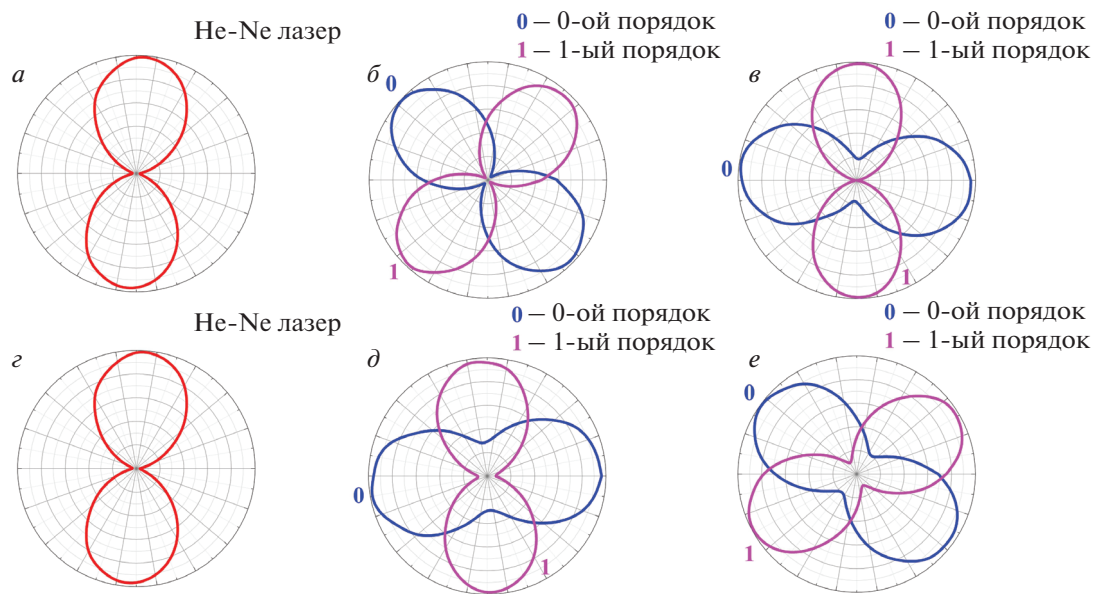


Рис. 3. Полярные поляризационные диаграммы прошедших и дифрагированных в 1-ый порядок световых пучков для бинарных решеток с твист-планарной (*б, д*) ориентацией ЖК и с противоположно закрученной твист-твист ориентацией ЖК (*в, е*) при напряжениях $U = 0$ (*б, в*) и 3.0 В (*д, е*). Падающее излучение линейно поляризовано вдоль оси OY (*а, г*).

лось на угол -45° для твист/планарной ЖК-структуры и оставалось неизменным для противоположно закрученной твист/твист ЖК-структуры. Прошедший и дифрагированный в 1-ый порядок световые пучки характеризовались ортогональными направлениями поляризациями для обоих видов бинарных ЖК-решеток (рис. 3б, 3в).

При увеличении напряжения до $U = 3.0$ В большие полуоси эллипсов поляризации прошедших световых пучков поворачивались на угол 90° и 45° соответственно (рис. 3д, 3е). Что касается пучков, дифрагированных в 1-ый порядок, поворот большей полуоси эллипса поляризации на угол -45° имел место только в случае бинарной твист/твист ЖК-структуры (рис. 3е). Вместе с этим эллиптичность состояния поляризации световых пучков была отлична от 0 (рис. 3д, 3е), что определяется величиной фазового набегания в слое ЖК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрированы возможности технологии текстурированной фотоориентации азокрасителя AtA-2 для создания дифракционных оптических структур на основе бинарной ориентации нематического ЖК. Изучены дифракционные и поляризационные свойства переключаемых ЖК-решеток с твист/планарной и противоположно закрученной твист/твист ориентациями молекул в смежных доменах. Управление дифракционной эффективностью 1-го порядка реализовано с помощью внешнего переменного электрического поля, что позволило достигнуть максимальных значений $\eta_1 = 29\%$ для твист/планарной и $\eta_1 = 19\%$ для твист/твист ориентаций ЖК при оптимальных управляющих напряжениях на ячейках 3.0 и 2.7 В соответственно.

Проанализированы поляризационные диаграммы прошедших и дифрагированных в 1-ый порядок световых пучков в выключенном состоянии и при напряжении $U = 3.0$ В. Установлено, что дифракция в 0-ой и 1-ый порядки характеризуется ортогональными состояниями поляризации для обоих вариантов исследуемых бинарных ЖК-структур. В зависимости от величины управляющего напряжения реализован поворот плоскости поляризации прошедшего излучения на угол 45° и 90° , а также поворот плоскости поляризации дифрагированного в 1-ый порядок излучения на угол -45° .

Таким образом, предлагаемые бинарные ЖК-решетки характеризуются электрически управляемыми оптическими свойствами и позволяют реализовать эффективное пространственно-поляризационное управление световыми пучками. Полученные результаты могут использоваться в области разработки конкурентоспособных фо-

тонных устройств и систем управления оптическим излучением.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы научных исследований Республики Беларусь на 2021–2025 годы “Конвергенция-2025” (задание 3.02.5.1 “Разработка 3-D фотонных структур на основе жидкокристаллических и полимерных материалов для приложений биофотоники”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee D., Lee H., Migara L.K. et al. // Adv. Opt. Mater. 2020. V. 9. Art. No. 2001604.
2. Nieborek M., Rutkowska K., Woliński T.R. et al. // Crystals. 2020. V. 10. No. 9. P. 768.
3. Rushnova I.I., Kabanova O.S., Melnikova E.A. et al. // Nonlin. Phenom. Complex Syst. 2018. V. 21. No. 3. P. 206.
4. Rushnova I.I., Melnikova E.A., Tolstik A.L. et al. // Opt. Commun. 2018. V. 413. P. 179.
5. He Z., Gou F., Chen R. et al. // Crystals. 2019. V. 9. No. 6. Art. № 292.
6. Nys I., Beeckman J., Neyts K. // Liq. Cryst. 2021. P. 1.
7. Huang B.Y., Lin T.H., Jhuang T.Y. et al. // Polymers. 2019. V. 11. No. 9. Art. No. 1448.
8. Węglowski R., Kozanecka-Szmigiel A., Pieccket W. et al. // Opt. Commun. 2017. V. 400. P. 144.
9. Tien C.L., Lin R.J., Su S.H. et al. // Adv. Cond. Matt. Phys. 2018. Art. No. 7849529.
10. Amano R., Salamon P., Yokokawa S. et al. // RSC Adv. 2018. V. 8. No. 72. Art. No. 41472.
11. Huang S.-Y., Huang B.-Y., Kang C.-C., Kuo C.-T. // Polymers. 2020. V. 12. No. 9. Art. No. 1929.
12. Chigrinov V., Kudreyko A., Guo Q. // Crystals. 2021. V. 11. No. 2. Art. No. 84.
13. Chigrinov V., Sun J., Wang X. // Crystals. 2020. V. 10. No. 4. Art. No. 323.
14. Кabanova O.C., Рушнова И.И., Мельникова Е.А. и др. // Журн. БГУ. Физ. 2019. № 3. С. 4.
15. Nys I. // Liq. Cryst. Today. 2020. V. 29. No. 4. P. 65.
16. Chen H., Tan G., Huang Y. et al. // Sci. Rep. 2017. V. 7. No. 1. Art. No. 39923.
17. Mikulich V.S., Murawski A.A., Muravsky A.A. et al. // J. Appl. Spectrosc. 2016. V. 83. No. 1. P. 115.
18. Муравский А.А., Муравский А.А., Микulich В.С. и др. // Вестн. МГОУ. Сер. Физ. и матем. 2013. № 1. С. 48.

Switchable diffraction gratings based on periodic binary alignment of a nematic liquid crystal

K. G. Kamiak^{a, *}, O. S. Kabanova^a, I. I. Rushnova^a, E. A. Melnikova^a, A. L. Tolstik^a

^a *Belarusian State University, Minsk, 220030 Belarus*

**e-mail: fiz.komyak@bsu.by*

The technique of patterned photoalignment of nematic liquid crystal was used to produce one-dimensional diffraction gratings. The influence of director orientation in adjacent liquid crystal domains on the diffraction properties of the fabricated binary structures was established. Diffraction gratings based on binary nematic liquid crystal alignment are characterized by electrically switchable optical properties and realize efficient light beam steering.