



УДК 620.1.72:532.783

**ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА ИНДУЦИРУЕМАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ
P-N ПЕРЕХОДОВ В НЕМАТИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ****DIFFRACTION GRATING INDUCED WITH ELECTRIC FIELD OF P-N JUNCTION
IN NEMATIC CELL****С.И. Богданов, В.А. Гудкова, Д.А. Колесников, С.И. Кучеев, А.А. Плесканёв
S.I. Bogdanov, V.A. Gudkova, D.A. Kolesnikov, S.I. Kucheev, A.A. Pleskaney**Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, Россия 308015, ул. Победы, д. 85;National Research University "Belgorod State University" (NRU "BelSU"), Pobedy 85
Belgorod, Russia, 308015

E-mail: kucheev@bsu.edu.ru

Аннотация

Экспериментально продемонстрирована принципиальная возможность формирования в слое гомеотропно ориентированного нематика дифракционной решетки электрическим полем группы близко расположенных p-n переходов при возбуждении последних переменным напряжением, при этом появление решетки носит пороговый характер. Дифрагирующими элементами решетки являются области переориентации нематика, по две на каждый p-n переход, разделенные участком гомеотропной ориентации, которые появляются под действием электрического поля, проникающим в слой жидкого кристалла из области объемного заряда p-n перехода. Установлено, что постоянное смещение, частота переменного напряжения, уровень интенсивности освещения могут быть использованы в качестве параметров управления порогом переориентации нематика электрическим полем в окрестности p-n перехода. Варьирование ширины области объемного заряда, и, следовательно, проникающим в слой жидкого кристалла электрическим полем, уровнем внешней засветки, может быть положено в принцип функционирования оптически адресуемого модулятора света. Наблюдаемое изменение (увеличение) периода решетки с увеличением напряжения связывается с изменением числа дифрагирующих элементов вследствие их перекрывания, а также обеднения и возможной инверсии типа проводимости карманов в подложке другого типа проводимости.

Abstract

The principal possibility of forming in a layer of a homeotropically oriented nematic diffraction grating by an electric field of a group of closely spaced p-n junctions is experimentally demonstrated when the latter is excited by an alternating voltage, and the appearance of a grating is of a threshold nature. The diffractive elements of the grating are the regions of reorientation of the nematic, two for each p-n junction separated by a area of the homeotropic orientation that appear under the action of the electric field penetrating into the layer of the liquid crystal from the space-charge region of the p-n junction. It is established that the constant bias, the frequency of the alternating voltage, the intensity level of the illumination can be used as parameters for controlling the nematic reorientation threshold by an electric field in the vicinity of the p-n junction. Varying the width of the space charge region, and, consequently, penetrating into the liquid crystal layer of an electric field, by the level of external illumination, can be placed in the principle of functioning of an optically addressed light modulator. The observed change (increase) in the grating period with increasing voltage is associated with a change in the number of diffracting elements due to their overlapping, as well as depletion and possible inversion of the conductivity type of the pockets in a substrate of a different type of conductivity.

Ключевые слова: дифракционная решетка, жидкие кристаллы, p-n переход.**Keywords:** diffraction grating, liquid crystals, p-n junction.



Введение

Для обработки волнового фронта световой волны требуются разнообразные оптические приборы, среди которых особое место занимают дифракционные решетки. Подавляющее большинство дифракционных решеток, из-за относительной простоты их изготовления, представляют собой оптические изделия с постоянным периодом в расположении рассеивающих (дифрагирующих) элементов соизмеримым с длиной волны света. Отсутствие возможности варьировать период решетки становится существенным недостатком в сложных оптических устройствах, например монохроматорах, что требует значительных усложнений, например, механические приводы. Очевидно, что для перспективных оптических устройств необходимы более функциональные дифракционные решетки, как минимум, имеющих порог появления (исчезновения), а также с управляемым периодом. Удовлетворение таких требований в общем случае реализуется с большими трудностями, что обусловлено ограниченным кругом оптических материалов обладающих управляемыми оптическими свойствами.

В качестве перспективных оптических материалов для формирования управляемых дифракционных решеток, как амплитудных, так и поляризационных, могут выступать жидкие кристаллы (жк) [1]. Например, в холестерических жидких кристаллах одна из электрически индуцированных текстур, а именно, текстура «отпечатки пальцев», характеризуется пространственной периодичностью и может непосредственно выполнять роль дифракционной решетки [2]. Для нематиков, которым также присуще электрически управляемое двулучепреломление, однако, внутренняя периодичность распределения директора отсутствует. Поэтому для этого типа жк на сегодняшний день периодичность оптических свойств, соизмеримой с длиной волны света (включая ИК диапазон) задаётся (1) пространственно периодическими электрическими полями, (2) исходной ориентацией директора на поверхности, (3) внедрением в жк светочувствительных примесей [3], которые в соответствии с записывающим светом изменяют ориентацию директора. В первом случае период организуется с помощью придания одному (обоим) из электродов в плоскопараллельной ячейке вида серии близкорасположенных микрополосок. Варьирование периода осуществляется прикладыванием потенциалов на соответствующие группы электродов. В отсутствие управляющего напряжения такие дифракционные решетки в слое жк отсутствуют (не сформированы), тогда как, формирование решетки происходит по мере увеличения напряжения. Такой принцип управления решеткой в конечном итоге привел к появлению сложных технологий LCoS, когда одна из подложек фактически становится микросхемой [4]. При формировании решетки в слое жк за счет начальной ориентации директора, решетка существует в отсутствие управляющего напряжения, а исчезновение дифракционных порядков происходит с увеличением управляющего напряжения. Предпочтительны бесконтактные методы получения периодичности директора на поверхности, позволяющие в отличие от механических, достигнуть высокого разрешения. К таким методам можно отнести фотоориентацию [5], нанесение электронным лучем наноразмерной углеродной пленки [6], причём модуляция периодичности угла преднаклона директора может осуществляться не только по принципу есть углеродная пленка или нет, но и достигается периодическим изменением толщины углеродной пленки [7] (см. рис. 1). Периодичность ориентации директора на поверхности может быть задана периодической модификацией поверхности, например внедрением атомов алюминия при термодиффузии в пленку окиси кремния [8].

Характерное время реакции нематиков на управляющие электрические поля лежит в миллисекундном диапазоне [1], что недостаточно для простого мультиплексирования, и требуется использование активной матрицы пороговых элементов. Одним из способов уменьшения полного времени реакции (цикл включение – выключение) является увеличение амплитуды управляющего напряжения с одновременным уменьшением толщины жк слоя. Например, для полей порядка 900В/10мкм получены рекордные времена включения

нематического пиксела порядка нескольких десятков наносекунд [9]. Однако в классическом типе жк ячеек, представляющем собой конденсатор с зазором в несколько микрометров, в котором находится жк, прикладывание высокого напряжения увеличивает вероятность электрического пробоя жк слоя и требует методов предосторожности, например переохладения жк материала [9].

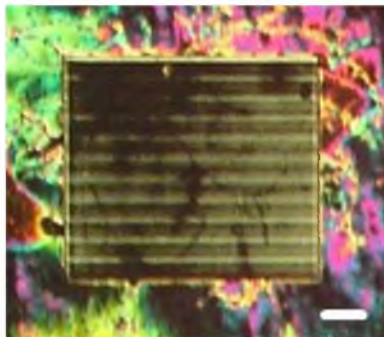


Рис. 1. Дифракционная решетка в слое нематика (5СВ) индуцированная наноразмерной углеродной пленкой на SiO_2 с наноразмерным рельефом (сформирована электронным лучем в электронном микроскопе Quanta 200). Метка 50 мкм

Fig. 1. A diffraction grating in a nematic layer (5СВ) induced by a nanoscale carbon film on SiO_2 with a nanoscale relief (formed by an electron beam in an electron microscope Quanta 200). Label is 50 microns

В предлагаемой работе, принципиально показано, что возможно формировать дифракционную решетку в жк слое за счет электрического поля группы близко расположенных р-п переходов, выполненных на одной из поверхностей, причем данная геометрия жк ячейки позволяет решать проблему времени релаксации жк материала за счет возможности значительного уменьшения толщины слоя жк. Переориентация молекул жк в предлагаемой геометрии ячейки осуществляется электрическим полем, которое проникает в слой жк из области объемного заряда обратно смещенного р-п перехода. Ширина области объемного заряда в окрестности металлургической границы р-п перехода может управляться как приложенным напряжением, так и уровнем легирования р - и п - областей перехода, и, соответственно, может быть подогнана к диапазону длин волн видимого (ИК) света. Напряжение пробоя р-п перехода может составлять несколько сотен вольт [10]. Это позволяет достигать значительных электрических полей в области пространственного заряда, и, следовательно, в слое жк. Прикладывание сильного электрического поля в данной геометрии ячейки позволяет уменьшить время реакции жк на включение поля, например, для напряжения порядка 30 в/10мкм – 70в/10мкм получены времена реакции жк порядка 200-500 микросекунд [11].

Эксперимент

В качестве одной из подложек жк ячейки, в которой управляемым образом формируется дифракционная решетка с помощью поля р-п переходов, использована подложка монокристаллического кремния n- типа проводимости с удельным сопротивлением 4,5 Ом*см, в которой методами фотолитографии и легирования изготовлены высоколегированные карманы р - типа проводимости шириной около 10 мкм. На поверхности кремния был выращен термический слой окиси кремния толщиной около 0,35 мкм. Роль последнего заключалась в электрической изоляции слоя жк от проводящих поверхностей р- и n- типов проводимости образца кремния. Без изолирующего слоя наблюдается электрооптический эффект связанный с появлением «плавающего» р-п перехода, и проявляющийся появлением локальной области переориентации нематика, которая перемещается от границы р-п перехода, [12].

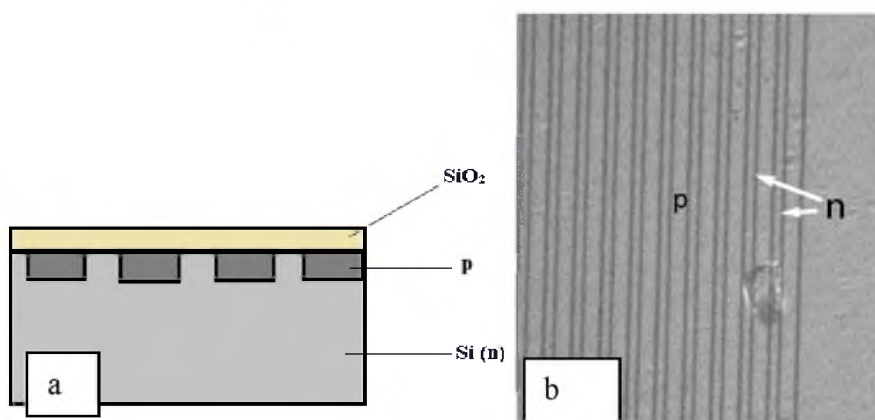


Рис. 2. Кремниевая подложка. а – Схематическое сечение подложки с p-n переходами. б – Микроскопическое изображение фрагмента поверхности подложки с p-n переходами. Расстояние между карманами p - типа проводимости 10 мкм

Fig. 2. Silicon substrate. a - Schematic section of the substrate with p-n junctions. b - Microscopic image of a fragment of the substrate surface with p-n junctions. The distance between the pockets of the p-type conductivity is 10 μm

Жидкий кристалл 5СВ с положительной анизотропией диэлектрической проницаемости заправлялся в изотропной фазе в капилляр между кремниевой подложкой с p-n переходами и поверхностью стекла, причем последняя в данной серии экспериментов использовалась без прозрачного электропроводящего покрытия. Исходная ориентация нематика была гомеотропная и достигалась предварительной обработкой поверхностей окиси кремния и стекла раствором лецитина в толуоле. Толщина жк слоя поддерживалась фторопластовыми прокладками толщиной 5 мкм. Из-за конструктивных особенностей на данном этапе экспериментов переменное напряжение с соответствующим постоянным смещением прикладывалось только к 5 соседним электрически соединенным между собой p-карманам, что соответствует десяти p-n переходам. Наблюдение переориентации нематика в электрическом поле p-n переходов наблюдалось в поляризационный микроскоп в режиме на отражение. Тестирование жк слоя на предмет формирования в нем дифракционной решетки осуществлялось He-Ne лазером (0,63 мкм) при угле падения на ячейку не фокусированного луча около 45 град, также на отражение.

Рассмотрим процесс переориентации нематика в окрестности единичного p-n перехода при увеличении управляющего напряжения. До некоторого порогового значения напряжения нематик находится в исходном гомеотропном состоянии, рис. 3ab. При превышении этого значения, вдоль границы p-n перехода происходит локальная переориентация нематика, которая проявляется в виде двух светлых тонких полосок, отделенных друг от друга темной полоской, рис. 3cd. Поворотом ячейки вокруг оси перпендикулярной плоскости ячейки можно удостовериться, что директор (его проекция) в переориентированных областях (светлые полоски) лежит перпендикулярно металлургической границе p-n перехода, а темная полоска соответствует гомеотропной ориентации, рис. 3b. При повышении напряжения выше порога все три области, а именно, две светлые и темная, изменяют свою ширину. Ширина последней становится тоньше, тогда как первые две увеличиваются и приобретают интерференционные окраски, что указывает на дальнейший наклон (отклонение) директора от вертикального положения, причем отклонение осуществляется в сторону границы p-n перехода, рис. 3e, как над p- так и над n- областями p-n перехода. Как будет показано ниже эти области переориентации могут выполнять роль дифрагирующих элементов в дифракционной решетке.

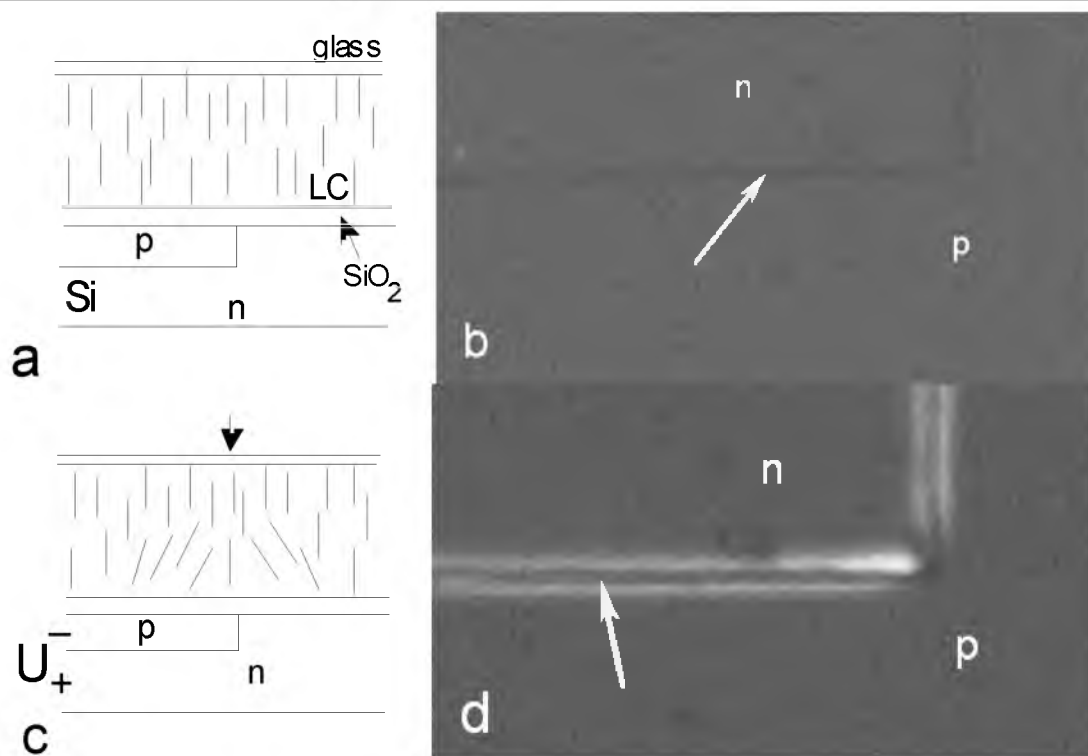


Рис. 3. Переориентации нематика в окрестности p-n перехода. Схематическое (a,c) представление распределения директора и микрофотографии (b,d) фрагмента жк ячейки над границей p-n перехода до порога (a,b) и после порога (c,d) переориентации соответственно. Стрелка на (b) указывает на металлургическую границу p-n перехода. Стрелки на (c,d) указывают на полосу гомеотропной ориентации нематика. $U=3,5$ V. Частота 15 kHz. Смещение 0V

Fig. 3. Reorientations of the nematic in the vicinity of the p-n junction. Schematic (a, c) representation of the distribution of the director and microphotography (b, d) of the cell fragment over the boundary of the p-n junction to the threshold (a, b) and after the threshold (c, d) of the reorientation respectively. The arrow on (b) indicates the metallurgical boundary of the p-n junction. The arrows in (c, d) indicate a band of homeotropic orientation of the nematic. $U = 3.5$ V. Frequency 15 kHz. The bias is 0V

На рис. 4 представлены кривые, показывающие возможность управлять порогом переориентации нематика в окрестности p-n перехода при варьировании постоянного смещения. Видно, что с увеличением отрицательного смещения порог переориентации нематика значительно возрастает. Такое поведение можно объяснить уменьшением, для указанной полярности смещения, ширины области объемного заряда p-n перехода, а также компенсацией части внешнего переменного напряжения при фазе, соответствующей обратному смещению, что в итоге сопровождается уменьшением проникновения электрического поля в слой жк.

Рис. 6 демонстрирует фрагменты дифракционных картин, которые соответствуют разным напряжениям, приложенным к ячейке, в 3D представлении при тестировании жк ячейки когерентным излучением. При отсутствии напряжения ($U=0V$) видна дифракционная картина соответствующая дифракции на рельефе кремниевой подложки, который образуется при изготовлении p-n переходов.

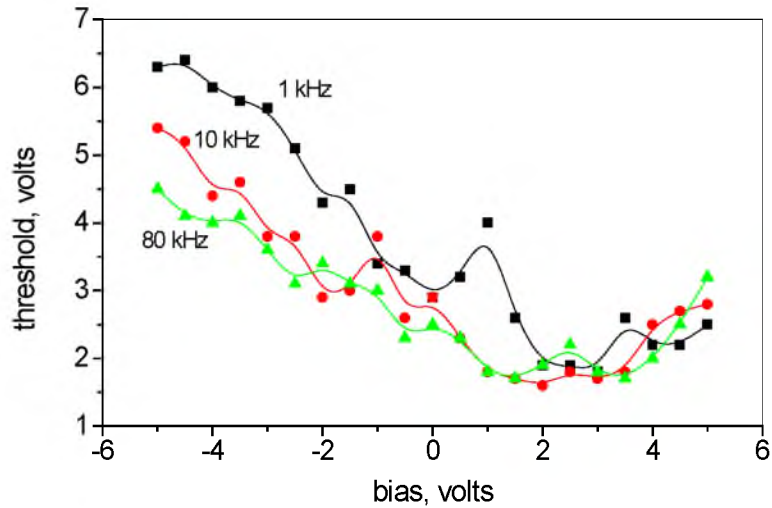


Рис. 4. Зависимость порога переориентации нематика в окрестности уединенного p-n перехода от смещения. Полярность смещения отмечена относительно n области

Fig. 4. Dependence of the reorientation threshold of a nematic in the vicinity of a single p-n junction on bias. The polarity of the bias is marked with respect to n region

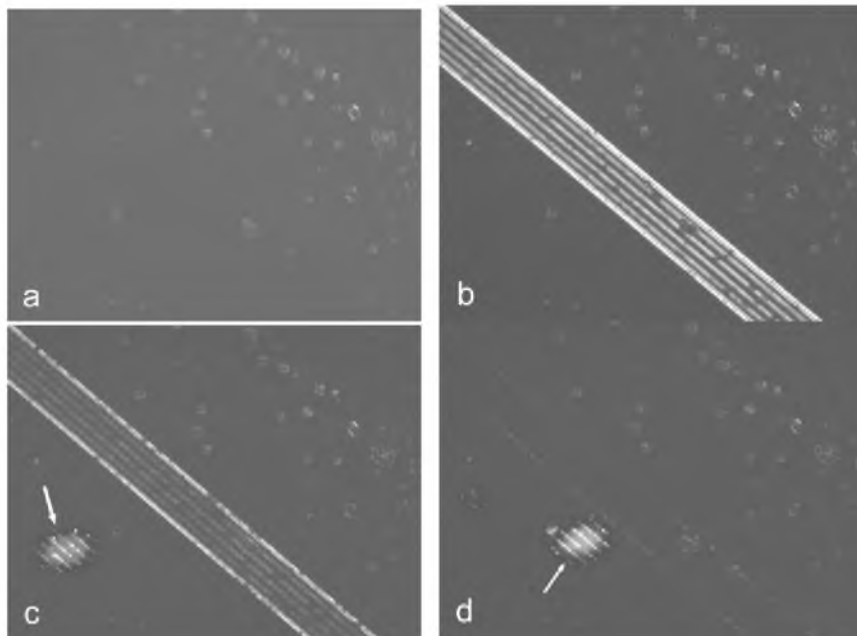


Рис. 5. Влияние освещения на переориентацию нематика в окрестности группы p-n переходов. а - Напряжение 0V. b, c, d - Напряжение 4V. Стрелка указывает на пятно сфокусированного на поверхности кремниевой подложки излучения лазера в нематической ячейке. Смещение 0V. Частота 2 kHz

Fig. 5. Influence of illumination on the reorientation of a nematic in the vicinity of the group of p-n junctions. a - Voltage 0V. b, c, d - Voltage 4V. The arrow points to the spot of the laser radiation focused in the nematic cell on the surface of the silicon substrate. The bias is 0V. The frequency is 2 kHz

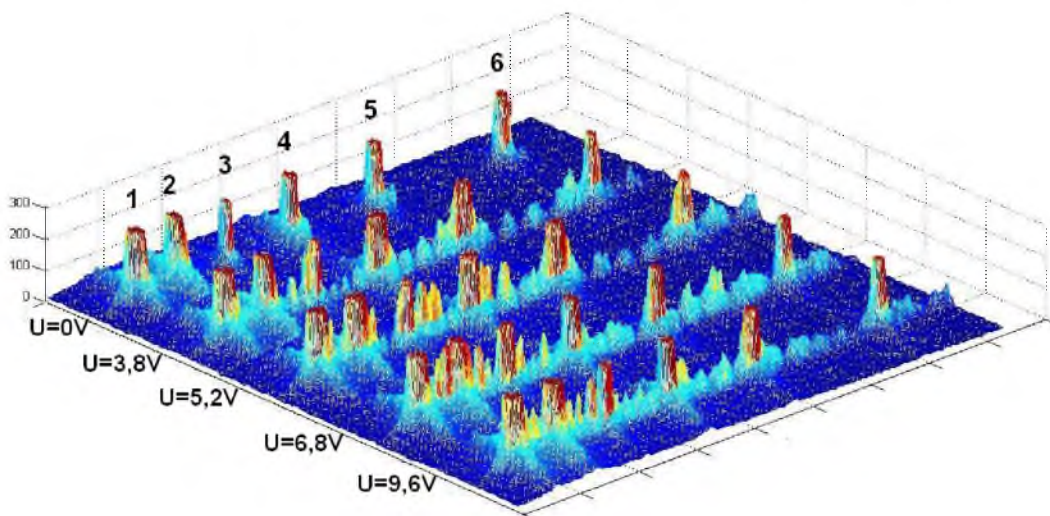


Рис. 6. Распределение интенсивности (отн. ед.) дифракционных порядков для соответствующих напряжений (U) приложенных к ячейке. Частота 15 kHz. 0-й, -1-й, -2-й, -3-й и т.д. дифракционные порядки не показаны. 1,2,3,4,5,6 – дифракционные порядки дифракции от рельефа кремниевой подложки

Fig. 6. Distribution of intensity (relative units) of diffraction orders for the corresponding voltage (U) applied to the cell. The frequency is 15 kHz. 0th, -1th, -2th, -3th, etc. diffraction orders are not shown. 1,2,3,4,5,6 – diffraction orders of diffraction from the relief of the silicon substrate

С увеличением напряжения, помимо постоянно присутствующей дифракции (порядки отмечены в виде 1,2,3,4,5,6, рис.6) появляются дополнительные дифракционные порядки, интенсивность и месторасположение которых сложным образом изменяется с напряжением. Это означает, что в слое нематика, появляющиеся с увлечением напряжения области переориентации выполняют роль дифрагирующих элементов новой, электрически индуцированной, дифракционной решетки. Появление решетки носит пороговый характер, аналогично пороговой переориентации нематика в окрестности уединённого р-п перехода.

Анализ положения дифракционных порядков (исключая постоянную дифракционную картину) и их интенсивности позволяет отметить, что период дифракционной решетки, которая индуцируется полем группы р-п переходов проявляет некоторую зависимость от приложенного напряжения, что продемонстрировано на рис.7. Отметим, что минимальный шаг периодичности лежит в районе 5В, где наблюдается максимальная контрастность в визуальной картине переориентации нематика в поляризованном свете, например, рис. 8cd.

Рассмотрим возможные причины сложного характера изменения интенсивности дифракционных порядков (рис. 6), и как следствие зависимости порядка дифракционной решетки от напряжения (рис. 7).

На рис. 8 приведены микрофотографии (соответствуют разным уровням возрастающего напряжения) фрагмента ячейки с 10-ю электрически соединёнными между собой р-п переходами. Хорошо видно, что общая ширина области переориентации над группой указанных р-п переходов с ростом напряжения увеличивается. Однако это увеличение связано только с увеличением ширины области переориентации нематика в окрестности крайних р-п переходов. В этих местах ячейки указанное увеличение области переориентации в сторону соседних областей ячейки обусловлено отсутствием какой либо жесткой фиксации директора на этих участках ячейки, которая могла бы препятствовать продви-



жению расширения области переориентации под действием электрических полей крайних р-п переходов. Для остальных (внутренних) р-п переходов, полосы переориентации нематики в целом совпадают с местом расположения переходов. Это хорошо видно по реперным отметкам, в качестве которых на рис. 8d отмечены 5 карманов р - типа проводимости. Распределение и фиксация директора в пространстве, в этом случае, уже обусловлены влиянием соседних р-п переходов, которые навязывают директору наклон в разные стороны и тем самым стабилизируют его. Вследствие этого, с увеличением напряжения переориентация директора над карманами и между ними наступает позже (ср. рис. 8a и рис.8с), причем границы полос переориентации более резкие, чем в окрестности уединенного р-п перехода (ср. рис.8с и рис. 3d). С увеличением напряжения полосы гомеотропной ориентации становятся тоньше, и, вследствие этого возможно перекрывание соседних полос переориентации друг с другом в окрестности р-п перехода. Из-за такого перекрывания число дифрагирующих элементов решетки может изменяться, что качественно объясняет наблюдаемую зависимость периода решетки от приложенного напряжения (возрастающий фрагмент кривой на рис. 7), причем минимальный период как раз соответствует максимальному числу дифрагирующих элементов (две области переориентации на один р-п переход). Другой возможной причиной увеличения периода решетки, которая может иметь место при высоких напряжениях, является обеднение карманов вплоть до инверсии типа проводимости. В следствии этого, могут, или значительно измениться свойства р-п переходов или уменьшится число карманов, что вызовет изменение числа дифрагирующих элементов.

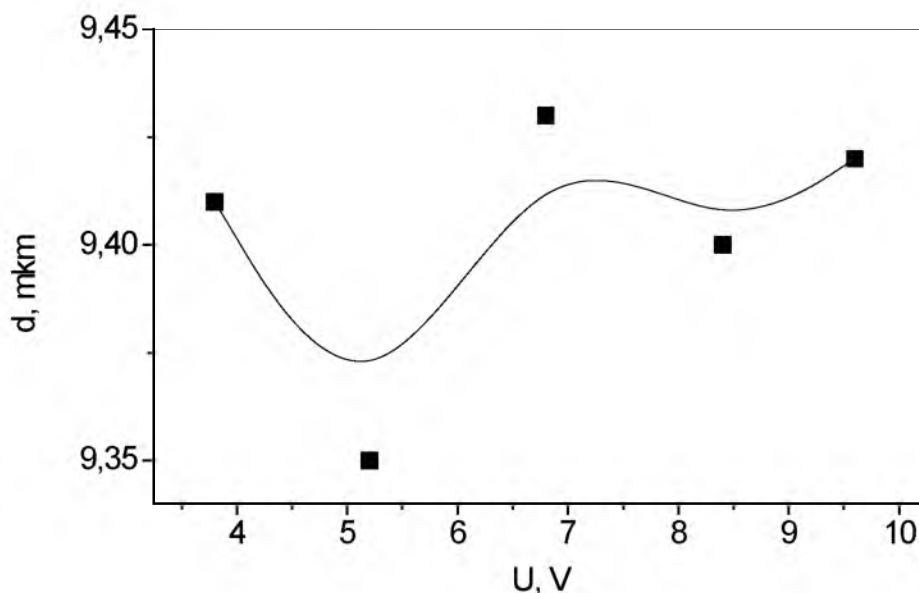


Рис. 7. Зависимость периода дифракционной решетки, индуцированной в слое жк электрическим полем группой р-п переходов от приложенного к ячейке напряжения

Fig. 7. Dependence of the period of the diffraction grating induced by the electric field of a group of р-п junctions in the LC layer by the voltage applied to the cell

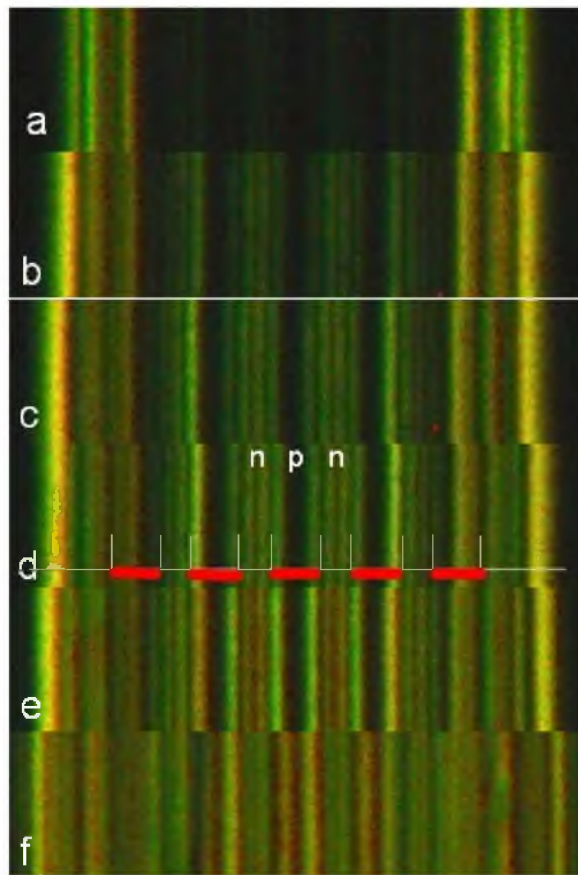


Рис. 8. Поляризационные микрофотографии фрагмента жк ячейки в окрестности 5-ти карманов (метки на (d)) р – типа проводимости при возрастающем напряжении. Смещение 0V

Fig. 8. Polarization microphotographs of a fragment of a cell in the vicinity of 5 pockets (labels on (d)) of p-type conductivity with increasing voltage. The bias is 0V

Выводы

Таким образом, экспериментально продемонстрировано, что в слое гомеотропно ориентированного нематического жидкого кристалла можно формировать дифракционную решетку электрическим полем группы р-п переходов при управлении последними переменным напряжением. Дифрагирующими свет элементами являются области переориентации нематика в окрестности каждого р-п перехода. Порогом переориентации нематика можно управлять постоянным смещением, уровнем освещения, величиной частоты управляющего напряжения. Изменение периода решетки объясняется изменением числа дифрагирующих элементов вследствие перекрывания областей переориентации нематика над р - и п - участками р-п перехода.

Список литературы

References

1. Blinov L.M. and Chigrinov V.G. 1993. Electrooptic Effects in Liquid Crystal Materials. Springer New York: 464.
2. Subacius D., Bos P. J., and Lavrentovich O. D. 1997. Switchable diffractive cholesteric gratings. Appl. Phys. Lett. 71(10), 8: 1350-1352.
3. Wu S.-T., Chen Yi. S., Guo J. H. and Fuh A. Y. G. 2006. Fabrication of Twisted Nematic Gratings Using Polarization Hologram Based on Azo-Dye-Doped Liquid Crystals. Japanese Journal of Applied Physics. 45(12): 9146–9151.
4. Lasarev G., Hermerschmidt A., Kruger S., Osten S. LCOS Spatial Light Modulators: Trends and Applications. Optical Imaging and Metrology. <http://www.beck-shop.de>



5. Schadt M., Schmitt K., Kozenkov V., and Chigrinov V. 1992. *Jpn. J. Appl. Phys. Part 131*: 2155.
- 6 Kucheev S.I., Litvin P.M., Tkach V.N., Chigrinov V.G. 2007. *EuroDisplay*. P-26: 302-305.
7. Гончаров И.Ю., Кучеев С.И., Колесников Д.А. 2016. Бистабильность нематика 5СВ на наноразмерной углеродной плёнке. *Научные ведомости БелГУ. Серия Математика. Физика*. 6 (227). 42: 119-121.
- Goncharov I.Yu., Kucheev S.I., Kolesnikov D.A. 2016. Bistability of 5CB nematic on a nanoscale carbon film. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics & Physics*. 6 (227). 42: 119-121.
- 8 Gritsenko N.I., Kucheev S.I., Litvin P.M. 2004. Nematic Diffractive Grating Induced by Nano-Treated Silicon Oxide Surface . *Proc. of 11th IDW'04. Japan*: 129-132.
9. Geis M. W., Lyszczarz T. M., Osgood R. M., and Kimball B. R. 2010. *OPTICS EXPRESS*. 18(18): 18886 – 18893.
10. Muller R., Kamins T. 2003. *Device electronics for integrated circuits*. New York, Wiley: 530.
11. Kucheev S.I. 2004. Nematic liquid crystal pixel with microsecond response. *Proc. of the 8th ASID'03. China*: 594-597.
12. Гончаров И.Ю., Колесников Д.А., Кучеев С.И. 2014. Нестационарная локальная переориентация нематика в ячейке с кремниевым р-п переходом. *Письма в ЖТФ*. 40(9): 758–761.
- Goncharov I.Yu., Kolesnikov D.A., Kucheev S.I. 2014. Nonstationary local reorientation of a nematic in a cell with a silicon p-n junction. *Technical Physics Letters*. 40(9): 758–761.