

УДК 620.1.72:532.783

DOI 10.18413/2075-4639-2018-50-4-452-459

ПЕРЕОРИЕНТАЦИЯ НЕМАТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ p-n ПЕРЕХОДА**REORIENTATION OF NEMATIC WITH ELECTRIC FIELD OF p-n JUNCTION****А.А. Алексеева, С.И. Богданов, Е.Ю. Рыжикова, С.И. Кучеев****A.A. Alekseeva, S.I. Bogdanov, E.Yu.Rizhikova, S.I. Kucheev**Белгородский национальный исследовательский университет, Россия, 308015,
г. Белгород, ул. Победы, 85

Belgorod National Research University, 85 Pobedy St, Belgorod, 308015, Russia

E-mail:kucheev@bsu.edu.ru

Аннотация

Представлено описание жидкокристаллического отражательного пикселя, в основе которого лежит переориентация гомеотропно ориентированного нематика электрическим полем p-n перехода. Приведены экспериментальные результаты, подтверждающие, что переориентация нематика осуществляется электрическим полем, проникающим в слой жидкого кристалла (жк) из области объёмного заряда p-n перехода. Экспериментально исследовано влияние на переориентацию нематика таких параметров структуры (пикселя), как (1) толщина слоя нематика, (2) толщина слоя диэлектрика, который пассивирует p-n переход, (3) частота и величина переменного напряжения прикладываемого к p-n переходу, (4) постоянное смещение p-n перехода, (5) освещение активным светом. Показано, что пороги переориентации нематика, ширина области переориентированного нематика как над n, так и над p поверхностями кремния p-n перехода, интенсивность отраженного света зависят от перечисленных выше параметров структуры и управляющего напряжения, что позволяет принципиально использовать переориентацию нематика в качестве компоненты пикселя, которая может модулировать свет в приборах отображения оптической информации.

Abstract

The description is given of a liquid-crystal reflective pixel based on the reorientation of a homeotropically oriented nematic by the electric field of the p – n junction. Experimental results are presented confirming that the nematic is reoriented by an electric field penetrating into the liquid crystal layer (LC) from the area of the p-n junction space charge. The effect on the nematic reorientation of such structure parameters (pixel) as (1) the thickness of the nematic layer, (2) the thickness of the dielectric layer that passivates the p–n junction, (3) the frequency and magnitude of the alternating voltage applied to the p–n junction, (4) bias of the p–n junction, (5) lighting with active light. It is shown that the nematics reorientation thresholds, the width of the reoriented nematic region both over the n and the p surfaces of the silicon p–n junction, the intensity of the reflected light depend on the above structure parameters and the control voltage, which makes it possible to use the nematic reorientation as a pixel component that can modulate light in optical information display devices.

Ключевые слова: переориентация директора, жидкие кристаллы, p-n переход, Xiaomi.**Keywords:** reorientation of director, liquid crystals, silicon p-n junction, Xiaomi.**Введение**

Жидкокристаллические приборы отображения оптической информации [1], доминирующие на сегодняшний день среди оптических приборов, в основу которых заложены различные физические принципы функционирования, имеют ряд недостатков,

носящих принципиальный характер. Одним из таких недостатков, который проявляется на уровне единичного жк пикселя, является сравнительно медленная реакция ориентированных молекул жидкого кристалла на изменение электрического поля вследствие значительной вязкости [2] жк материалов. Улучшение временных характеристик процесса переориентации молекул жидкого кристалла решается несколькими путями, среди которых на сегодня это: (1) выбор соответствующего электрооптического эффекта и жк материала [3–7], включая эффекты ориентационной бистабильности, основанные на нарушении сцепления директора с поверхностью [8, 9], геометрии электродов, (2) уменьшение толщины жк слоя, для оптимизации времени релаксации директора в состояние ‘off’, (3) увеличение действующего электрического поля при переходе директора в состояние ‘on’ [10], (4) использование двух частотного управления и ряд других. Однако уменьшение толщины слоя жк при одновременном увеличении приложенного к этому слою напряжения в классической схеме пикселя, представляющей в общем случае плоский конденсатор со слоем жк материала в качестве диэлектрика между электродами, увеличивает риск электрического пробоя. С другой стороны, уменьшение размеров пикселя (в плоскости) и приближение их к размерам, сравнимыми с толщиной слоя жк, смешивает несколько типов электрооптических эффектов, что негативно сказывается на электрооптических характеристиках. Вышесказанное означает, что для ряда приложений, особенно для отражательных проекционных приборов [11], где требуется значительное разрешение, использование классической схемы пикселя, по-видимому, уже ограничено.

В предлагаемой работе исследуется переориентация нематика, вызванная электрическим полем кремниевого р-п перехода. Принимая во внимание геометрию предлагаемого пикселя изображения, с одной стороны, электрическое поле прикладываемое к жк, благодаря высоким пробивным напряжениям р-п перехода [12] может быть значительным по величине (сотни вольт). Сильное электрическое поле позволяет уменьшить время реакции жк на включение поля, например, для напряжений, приложенных к р-п переходу в диапазоне 30 в – 70 в для нематика толщиной ~ 10мкм получены времена реакции жк порядка 200–500 микросекунд [13]. С другой стороны, возможно достижение малых толщин жк слоя без проблемы риска пробоя жк материала благодаря распределению электрического поля в плоскости ячейки (пикселя) со стороны только одной из поверхностей.

Эксперимент

На рис. 1а схематически представлен нематический пиксель, который управляется электрическим полем р-п перехода. В работе рассматривалась двухэлектродная схема приложения электрического поля, т. е. управляющее напряжение (переменное напряжения (U) с соответствующим постоянным смещением (U_{dc}) прикладывалось только к «полюсам» р-п перехода, при этом на поверхности покровного стекла какие-либо электрически проводящие плёнки (например, ИТО) отсутствуют. Электрическое поле (обозначено E , рис. 1а) в области объемного заряда р-п перехода, при обратном его смещении, проникает в слой диэлектрика SiO_2 , а далее в слой нематика, вызывая соответствующую переориентацию молекул жк. Заметим, что в отличие от классической схемы пикселя, в которой уменьшение размеров пикселя (с целью увеличения разрешения) осуществляется за счет изменения размеров токопроводящей пленки (электрода), в предлагаемой геометрии размер пикселя сравним с размером области объемного заряда в окрестности металлургической границы р-п перехода, и, следовательно, может варьироваться, например, легированием областей р и n типов проводимости соответствующего р-п перехода.

На кремниевой подложке n типа проводимости с удельным сопротивлением 4,5 Ом*см были изготовлены карманы р+ типа проводимости с удельным сопротивлением на

порядок ниже, чем у подложки. На поверхности кремния была выращена пленка окиси кремния толщиной около 0,35 мкм, пассивирующая р-n переходы. В работе использовался нематический жидкий кристалл 5СВ с исходной гомеотропной ориентацией [14], которая достигалась применением лецитина на обеих внутренних поверхностях нематической ячейки.

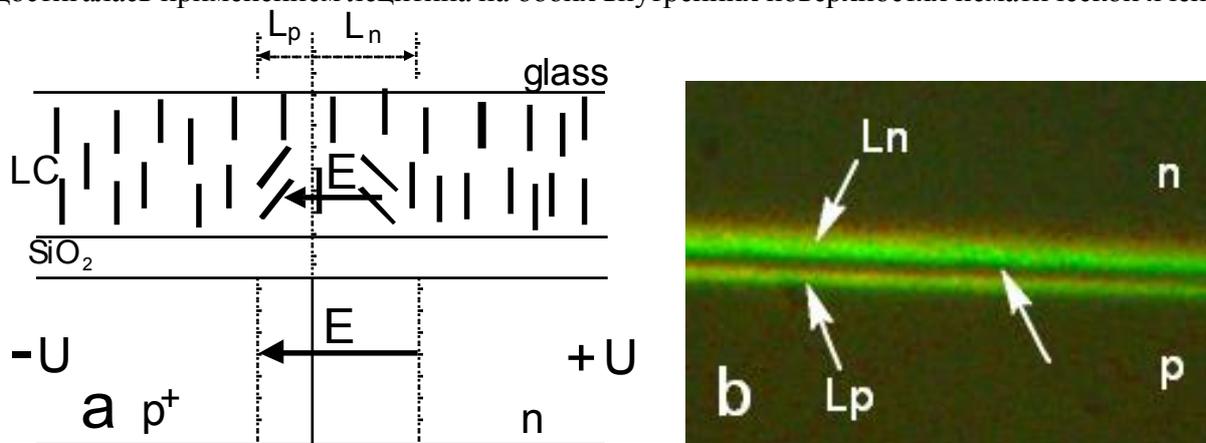


Рис. 1. Переориентация нематика в окрестности р-n перехода. (а) Схематическое представление пикселя. (б) Микрофотография области переориентации гомеотропно ориентированного нематика в окрестности металлургической границы р-n перехода. $U=6V$. $U_{dc}=0V$. Частота 30 кГц. Стрелка - полоска гомеотропной ориентации нематика

Fig. 1. Reorientation of the nematic in the vicinity of the p-n junction. (a) Schematic representation of a pixel. (b) Micrograph of the region of reorientation of a homeotropically oriented nematic in the vicinity of the metallurgical boundary of the p-n junction. $U=6V$. $U_{dc}=0V$. Frequency 30 kHz. The arrow is a strip of homeotropic orientation of a nematic

Рассмотрим особенности переориентации нематика при изменении основных параметров пикселя (структуры) и управляющего напряжения. Зависимость порогового напряжения переориентации нематика от толщины жк слоя исследовалась в клиновидной ячейке. На рис. 2а представлены кривые зависимости пороговых напряжений от толщины жк слоя. Видно, что с уменьшением толщины нематика пороги переориентации значительно возрастают. Такой рост порогов, по-видимому, связывается с возрастанием упругости нематика благодаря влиянию подложек, задающих исходную ориентацию директора. Из приведенных кривых, рис. 2а, следует, что пороги переориентации над р поверхностью превышают пороги над n поверхностью в окрестности перехода. Наблюдаемая разница в порогах переориентации обусловлена несимметричным легированием р и n областей кремния, вследствие чего область объемного заряда смещена в сторону области n типа проводимости относительно металлургической границы р-n перехода. Наблюдается явная зависимость порогов переориентации нематика от частоты переменного напряжения, рис. 2а,б. С увеличением частоты приложенного напряжения пороговые напряжения уменьшаются. По всей видимости, ход кривых (рис. 2а, б) обусловлен наличием емкости у р-n перехода и зависимостью этой емкости от частоты переменного напряжения [12].

Как выше указано, для предлагаемой геометрии жк пикселя (рис. 1а), переориентация нематика происходит как над р так и над n поверхностями р-n перехода (рис. 1б), следовательно, суммарная ширина пикселя (размер в плоскости) состоит из областей переориентации нематика над n (отмечено L_n , рис. 1) и р (отмечено L_p , рис. 1) областями р-n перехода соответственно. Вследствии такой особенности переориентации жидкого кристалла в поле р-n перехода, ширина пикселя заранее не фиксирована, в

отличие от классической схемы пиксела, где ширина последнего задается конструкционно и изменяется в соответствии с величиной поля, проникающего в жк слой, рис. 3. На фоне исходной гомеотропной ориентации, которая дает темное поле, область переориентации нематика ($L_n + L_p$), благодаря появлению двулучепреломления (до напряжения появления интерференционных цветов) даёт светлое поле. Другими словами, модуляция света для передачи шкалы серого в окрестности пикселя происходит заменой части темного поля на светлое поле. На кривых, показывающих зависимость ширины области переориентации от приложенного напряжения U (рис. 3а), так и величины смещения U_{dc} (рис. 3б) как для p так и n типа поверхностей, можно выделить линейные участки. Это означает возможность реализации шкалы серого для описываемого жк пикселя. Отметим, полосы переориентированного нематика L_p и L_n разделяются полоской гомеотропной ориентации (рис. 1б, отмечено стрелкой), ширина которой уменьшается с увеличением U , но при этом не исчезает полностью [15]. Последний факт указывает на то, что директор первоначально переориентируется в двух местах по разные стороны от границы p - n перехода. Распределение директора в этих полосах переориентации топологически разное (рис. 1а) и не может непрерывным образом перейти одно в другое ни при каких значениях напряжения U .

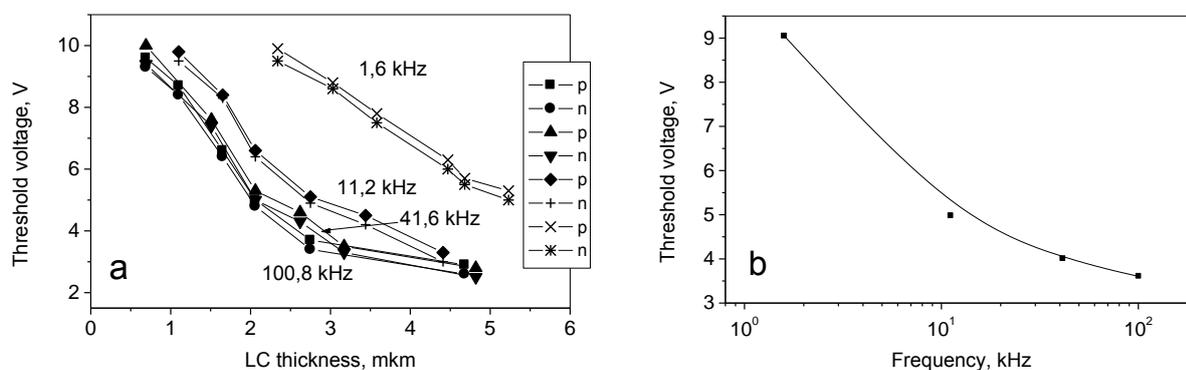


Рис. 2. Зависимость порогового напряжения переориентации нематика от: (а) толщины слоя нематика над p и n поверхностями, (б) частоты переменного напряжения U над n поверхностью ($U_{dc}=0$ В. Толщина нематика ~ 3 мкм)

Fig. 2. Dependence of the nematic reorientation threshold voltage on: (a) the thickness of the nematic layer over the p and n surfaces, (b) the frequency of the alternating voltage U over the n surface ($U_{dc} = 0$ V. The nematic thickness is $\sim 3 \mu\text{m}$)

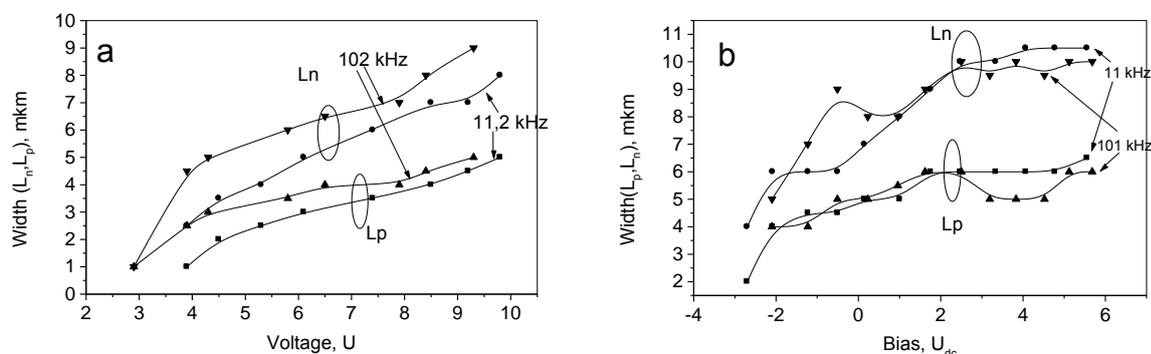


Рис. 3. Зависимость ширины переориентированного нематика над областями p и n p - n перехода от: (а) приложенного напряжения U . Смещение $U_{dc}=0$ В. (б) напряжения смещения U_{dc} . Толщина жк слоя 5 мкм. $U = 9$ В

Fig. 3. Dependence of the width of the reoriented nematic over the p and n $p - n$ transition regions on: (a) applied voltage U . Offset $U_{dc} = 0$ V. (b) offset voltage U_{dc} . The thickness of the LC layer is 5 mkm. $U = 9$ V

Факт зависимости ширины L_p и L_n областей переориентации нематика при изменении смещения р-п перехода при постоянной величине переменного напряжения (U) (рис. 3b) косвенно подтверждает, что в основу механизма переориентации нематика в такой геометрии пиксела лежит проникновение электрического поля в нематик, которое возникает в области пространственного заряда р-п перехода. В этом случае увеличение (уменьшение) смещения изменяет ширину области объемного заряда с локализованным в этой области электрическим полем E (рис. 1a).

Одним из существенных конструктивных параметров рассматриваемого в работе ЖК пиксела является толщина пассивирующего р-п переход слоя диэлектрика SiO_2 . В работе исследование влияния толщины SiO_2 на переориентацию нематика проводилось на ступеньке травления кислотой HF плёнки окисла. На рис. 4a представлено изображение участка травления SiO_2 (криволинейная светлая полоска, отмечена стрелкой) представляющая собой переходную область от не затронутого травлением SiO_2 к полностью вытравленному окислу (поверхность Si).

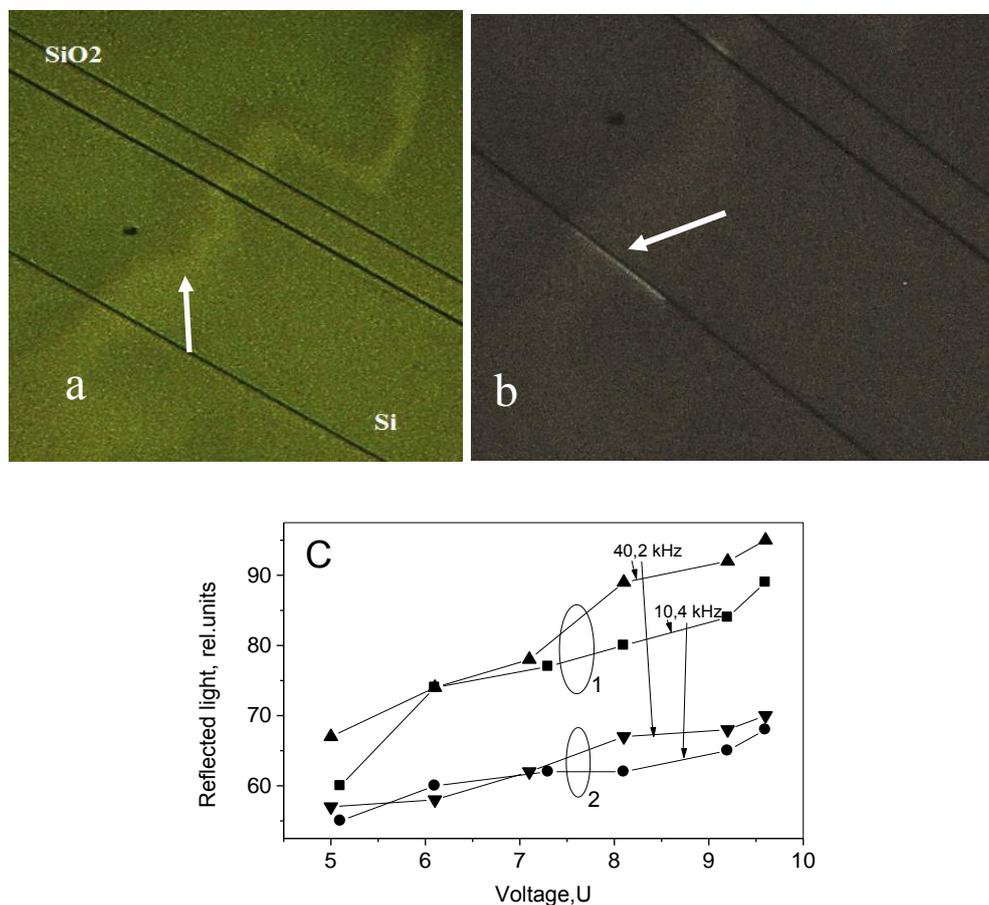


Рис. 4. Переориентация нематика над ступенькой пленки окиси кремния. (a) Ступенька травления плёнки окиси кремния. (b) Переориентация нематика над ступенькой травления плёнки окиси кремния SiO_2 (отмечено стрелкой). Напряжение 9 В, $U_{dc}=0$ В, частота 100 кГц. (c) Зависимость интенсивности отраженного света от переориентированного нематика над (1) ступенькой SiO_2 над не травленной окисью кремния (2) от напряжения U . Напряжение смещения $U_{dc}=0$ В

Fig. 4. Reorientation of the nematic above the step of the film of silicon oxide. (a) A step of etching a film of silicon oxide. (b) Reorientation of the nematic above the etching step of the film of silicon oxide SiO_2 (indicated by an arrow). Voltage 9 V, $U_{dc} = 0$ V, frequency 100 kHz. (c) Dependence of the intensity of the reflected light on the reoriented nematic over (1) the SiO_2 step over non etched silicon oxide (2) on the voltage U . Bias voltage $U_{dc} = 0$ V

На рис. 4b представлено изображение переориентации нематика (при пороговых значениях напряжения) над указанной выше ступенькой травления окисла. Хорошо видно, что в этом месте интенсивность отраженного света значительно превышает интенсивность света над не травленным участком окиси кремния. Подобное соотношение для интенсивностей света над травленным и не травленным окислом остается при повышении напряжения U , что отображено кривыми на рис. 4с. Заметим, что в тех местах ячейки, где окись кремния полностью стравлена, при включении управляющего напряжения, выше описанная переориентация нематика в окрестности р-п перехода не наблюдается, а наблюдается нестационарная локальная переориентация нематика [16], представляющая собой полосу переориентированного нематика, которая перемещается от металлургической границы р-п перехода, обусловленная формированием плавающего р-п перехода.

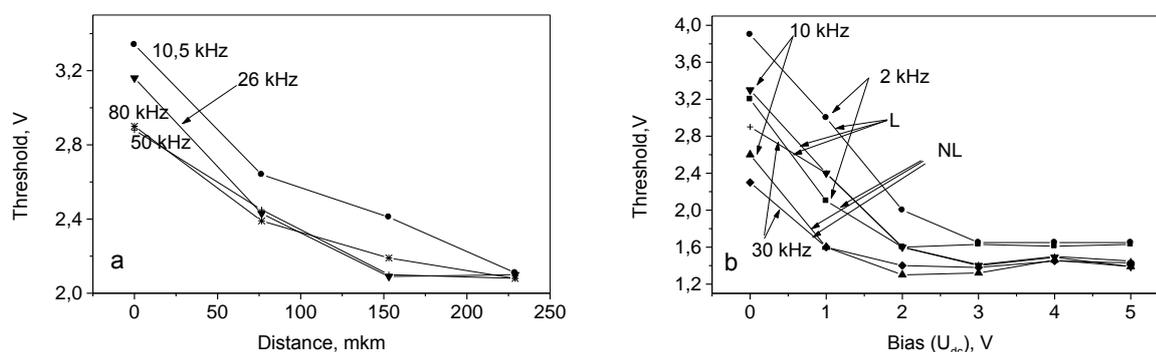


Рис. 5. Зависимость порога переориентации нематика в окрестности р-п перехода от: (а) расстояния до центра лазерного пятна ($U_{dc} = 0$ В), (b) смещения р-п перехода. L, NL – освещен и не освещен р-п переход активным светом (He-Ne лазер) соответственно

Fig. 5. Dependence of the nematic reorientation threshold in the vicinity of the p-n junction from: (a) the distance to the center of the laser spot ($U_{dc} = 0$ V), (b) the offset of the p-n junction. L, NL – illuminated and not illuminated p-n junction with active light (He-Ne laser), respectively

Структура пиксела сформирована в полупроводниковой подложке. Поэтому на особенности функционирования такого пиксела неизбежно будет оказывать влияние генерация неравновесных носителей заряда, которая может происходить из-за освещения активным светом, а также влияния температуры и других факторов. В работе рассматривалось влияние факта генерации и положения зоны генерации неравновесных носителей заряда, вызванные освещением поверхности кремния He-Ne лазером в районе р-п перехода на пороги переориентации нематика. На рис. 5а представлены кривые, показывающие влияние на переориентацию нематика места расположения зоны генерации относительно р-п перехода при нулевом его смещении. Из приведенных кривых хорошо видно, что место локальной генерации неравновесных носителей существенно влияет на пороги переориентации. С приближением зоны генерации к р-п переходу порог переориентации возрастает. Вышеуказанный экспериментальный факт объясняется уменьшением области объемного заряда в условиях возрастания генерации неравновесных носителей заряда, и, по всей видимости, негативен с точки зрения функционирования структуры в качестве пиксела. С другой стороны, было установлено влияние смещения на пороги переориентации в условиях освещения структуры активным светом. На рис. 5b представлены кривые пороговых напряжений в зависимости от смещения р-п перехода. Видно, что указанные зависимости носят противоположный характер, т. е. светочувствительность структуры в окрестности р-п перехода с ростом смещения падает.

Анализ результатов на данном этапе исследований позволяет считать возможной причиной уменьшения светочувствительности структуры образование дефектов в пассивирующем диэлектрике при его протравливании кислотой (HF) в процессе подготовки Si подложки, через которые имеет место утечки заряда.

С целью выяснения критических размеров толщины жк слоя, которую можно достигнуть в данной геометрии пикселя и при этом еще наблюдалась бы переориентация нематика, проводились эксперименты с открытой поверхностью нематика. На этом этапе исследований отсутствие покровного стекла позволяло значительно уменьшить толщину жк слоя вплоть до полного его удаления. По факту наблюдения в непосредственной близости от р-п перехода интерференции естественного (неполяризованного) света (стрелка, рис. 6а) позволило оценить толщину жк, при которой еще имеет место переориентация (для допустимого диапазона величин напряжений), что дало величину около 0,8 мкм, при этом ширина области переориентации (суммарная, над р и n поверхностями) в окрестности р-п перехода составляла около 6 мкм. Отметим, что указанная величина ширины переориентации касается единичного р-п перехода. Для встречных р-п переходов оценка ширина переориентации даёт около 3 мкм, что превосходит фиксированную ширину пикселя, например, дисплея Xiaomi (~ 15 мкм), рис. 6б.

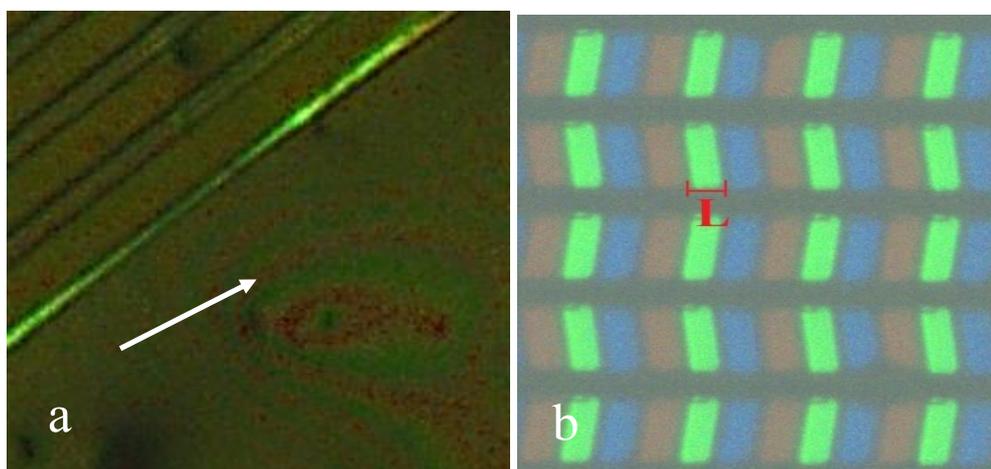


Рис. 6. а) Переориентация нематика с открытой поверхностью электрическим полем р-п перехода. Толщина жидкого кристалла ≈ 0.8 мкм. Напряжение $U = 9$ В. Частота 100 кГц. $U_{dc} = 0$ В. Стрелка – интерференционные полосы. б) Пиксели дисплея Xiaomi с плотностью 440 ppi, $L \approx 15$ мкм

Fig. 6. a) Reorientation of a nematic with an open surface by an electric field of the p-n junction. The thickness of the liquid crystal is ≈ 0.8 μm . Voltage $U = 9$ V. The frequency is 100 kHz. $U_{dc} = 0$ V. Arrow – interference fringes. b) The pixels of Xiaomi display with density equal to 440 ppi, $L \approx 15$ μm

Выводы

Таким образом, экспериментально продемонстрировано, что электрическое поле р-п перехода может вызывать переориентацию нематического жидкого кристалла. Такие параметры, как пороговое напряжение переориентации нематика, ширина области переориентации как над р, так и над n поверхностями могут эффективно управляться (1) амплитудой переменного напряжения, приложенного к р-п переходу, (2) его постоянным смещением, (3) частотой. Уменьшение толщины пассивирующего р-п переход диэлектрика существенно увеличивает интенсивность отраженного света от пикселя, что объясняется большей степенью проникновения электрического поля из области объёмного заряда в слой жк. Внешнее освещение структуры активным светом, вызывающее генерацию неравновесных носителей заряда, существенно влияет на пороги переориентации нематика, при этом светочувствительность структуры может быть

уменьшена увеличением смещения р-п перехода. Таким образом, эффективное управление переориентацией нематика в окрестности р-п перехода может быть положено в основу функционирования пикселя, модулирующего свет.

Список литературы References

1. Yang D.K., Wu S.T. 2006. *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* John Wiley&Sons, Ltd. : 378.
2. Blinov L.M. and Chigrinov V.G. 1993. *Electrooptic Effects in Liquid Crystal Materials*. Springer New York: 464.
3. Vanbrabant P. J. M., Dessaud N., Strömer J. F. 2008. Temperature influence on the dynamics of vertically aligned liquid crystal displays. *APPLIED PHYSICS LETTERS*. 93. 261112.
4. Cho H. J., Lee Y.H. 2009. Characterization of a twisted-nematic liquid crystal display by a simple model. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 11. 065709 (6pp).
5. Baek J. I., Kim K. H., Kim J. C., Yoon T. H., Woo H. S., Shin S. T. and Souk J. H. 2009. Fast Switching of Vertical Alignment Liquid Crystal Cells with Liquid Crystalline Polymer Networks. *Japanese Journal of Applied Physics*. 48. 056507 (5pp).
6. Choi S.W., Yamamoto S.I., Iwata T. and Kikuchi H. 2009. Optically isotropic liquid crystal composite incorporating in-plane electric field geometry. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42. 112002 (5pp).
7. Kim M.S., Seen S.M., Lee S.H. 2012. The Static Electricity Resistant Liquid Crystal Display Driven by Fringe Electric Field. *Japanese Journal of Applied Physics*. 51. 044201 (3 pp).
8. Dozov I., Nobili M., Durand G. 1997. *Appl. Phys. Lett.* 70: 1179–1181.
9. Гончаров И.Ю., Кучеев С.И., Колесников Д.А. 2016. Бистабильность нематика 5CB на наноразмерной углеродной плёнке. *Научные ведомости БелГУ. Серия Математика. Физика*. 6 (227). 42: 119–121.
10. 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.
11. Geis M. W., Lyszczarz T. M., Osgood R. M., and Kimball B. R. 2010. *OPTICS EXPRESS*. 18(18): 18886 – 18893.
12. Lasarev G., Hermerschmidt A., Kruger S., Osten S. *LCOS Spatial Light Modulators: Trends and Applications. Optical Imaging and Metrology*. <http://www.beck-shop.de>
13. Muller R., Kamins T. 2003. *Device electronics for integrated circuits*. New York, Wiley: 530.
14. Kucheev S.I. 2004. Nematic liquid crystal pixel with microsecond response. *Proc. of the 8th ASID'03. China*: 594–597.
15. Лукьянченко Е.С., Козунов В.А., Григос В.И. 1985. Ориентация нематических жидких кристаллов, *Успехи химии*, 2. 214–226.
16. Luk'yanenko E.S., Kozunov V.A., Grigos V.I. 1985. The orientation of nematic liquid crystals. *Uspekhi khimii*, 2. 214–226.
17. Богданов С.И., Гудкова В.А., Колесников Д.А., Кучеев С.И., Плесканёв А.А. 2017. Дифракционная решетка, индуцированная электрическим полем р-п переходов в нематической ячейке. *Научные ведомости БелГУ, Серия Математика. Физика*. 27 (276). 49: 75–84.
18. Bogdanov S.I., Gudkova V.A., Kolesnikov D.A., Kucheev S.I., Pleskanev A.A. 2017. Diffraction grating induced with electric field of p-n junction in nematic cell. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics & Physics*. 27 (276). 49: 75–84.
19. 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.
20. 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.