

ФИЗИКА. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 620.1.72:532.783

DOI 10.18413/2687-0959-2020-52-3-214-223

ДОМЕННАЯ ПЕРЕОРИЕНТАЦИЯ НЕМАТИКА В ПОЛЕ $p - n$ ПЕРЕХОДА В СЕНСОРЕ ПАРА ОРГАНИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ

А. В. Бердниченко, С. И. Кучеев

Белгородский национальный исследовательский университет,
Белгород, 308015, Россия

E-mail: kucheev@bsu.edu.ru

Аннотация. Экспериментально исследовано формирование доменной текстуры в нематике в электрическом поле кремниевого $p - n$ перехода и влияние пара реагентов (диметилформамид, изопропиловый спирт, толуол) на однородно переориентированный нематик и домены. При пороговом напряжении инициатором зарождения линейно расположенных доменов являетсядвигающаяся вдоль линии $p - n$ перехода в однородно переориентированном нематике локальная неоднородность в ориентации молекул, скорость движения которой зависит от приложенного напряжения. Шаг периодичности в расположении доменов зависит от скорости движения этой неоднородности. Влияние пара реагентов на однородно переориентированный нематик полем $p - n$ перехода при фиксированном напряжении проявляется в виде изменения интенсивности отраженного света от переориентированной области нематика. Интенсивность возрастает по мере увеличения концентрации реагента. Для доменной текстуры, также при фиксированном напряжении, влияние пара проявляется в изменении шага периодичности их расположения вдоль линии $p - n$ перехода. Отмечаются два возможных вклада в механизм влияния пара реагентов, а именно: изменение параметра порядка и поверхностного натяжения нематика, причем последний фактор может носить явный градиентный характер, что позволяет по пространственному смещению доменов от линии $p - n$ перехода в прототипе сенсора определять направление на источник пара реагентов.

Ключевые слова: домены в жидком кристалле, кремниевый $p - n$ переход, сенсор пара.

Для цитирования: Бердниченко А. В., Кучеев С. И. 2020. Доменная переориентация нематика в поле $p - n$ перехода в сенсоре пара органических реагентов. Прикладная математика & Физика. 52(3): 214–223.

DOI 10.18413/2687-0959-2020-52-3-214-223

DOMAIN REORIENTATION OF NEMATIC IN $p - n$ JUNCTION FIELD IN SENSOR OF ORGANIC REAGENTS VAPOR

A. V. Berdnichenko, C. I. Kucheev

Belgorod National Research University,
Belgorod, 308015, Russia

E-mail: kucheev@bsu.edu.ru

Received September 11, 2020

Abstract. The formation of a domain texture in a nematic in the electric field of a silicon $p - n$ junction and the influence of reagent vapors (dimethylformamide, isopropyl alcohol, toluene) on a uniformly reoriented nematic and domains were experimentally studied. At a threshold voltage, the initiator of the generation of linearly located domains is a local heterogeneity in the orientation of the molecules moving along the $p - n$ junction line in a uniformly reoriented nematic, the speed of which depends on the applied voltage. The step of periodicity in the arrangement of domains depends on the speed of motion of this heterogeneity. The effect of reagents on a uniformly reoriented nematic by the $p - n$ junction field at a fixed voltage is manifested as a change in the intensity of reflected light from the reoriented region of the nematic. The intensity increases with increasing concentration of the reagent. For a domain texture, also at a fixed voltage, the effect of vapor is manifested in a change in the step of the periodicity of their location along the $p - n$ junction line. Two possible contributions to the mechanism of influence of reagents vapor are noted, namely: a change in the order parameter and surface tension of the nematic, the latter factor being clearly gradient in nature, which allows the spatial directional displacement of domains from the $p - n$ junction line in the sensor prototype to define the direction to the source of the reagent vapor.

Key words: domains in a liquid crystal, silicon $p - n$ junction, sensor of vapor.

For citation: Berdnichenko A. V., Kucheev C. I. 2020. Domain reorientation of nematic in $p - n$ junction field in sensor of organic reagents vapor. Applied Mathematics & Physics. 52(3): 214–223 (in Russian).

DOI 10.18413/2687-0959-2020-52-3-214-223

Введение. Жидкие кристаллы можно отнести к средам, которые перспективны с точки зрения использования в сенсорах следовых концентраций веществ химического и биологического происхождения. Это потенциальное для приложений свойство основано на присущей этим материалам анизотропии практически всех физических параметров, например, показателя преломления, диэлектрической проницаемости, подвижности носителей заряда и т. д. [4] и изменении анизотропии под влиянием примесных молекул. По опубликованным источникам наиболее информативными методами регистрации являются поляризационно-оптические [9], которыми в частности фиксируют: смещение точки перехода в изотропное состояние и изменение интерференционных цветов, обусловленное ориентационными переходами директора [8, 10], изменение энергии сцепления [12], а в случае использования холестериков – это сдвиг длины волны Брегговского отражения [5, 6, 7]. Однако при этом большинство прототипов сенсоров, в которых реализуется оптический метод регистрации, страдают существенным недостатком, связанным с возникающей в процессе регистрации реагента сложной интерференционной картины в плоскости жидкого кристалла [11], которую трудно свести в дальнейшем к некоторому интегральному ответу (например цифровому), что ожидается от таких типов приборов как сенсоры. Такая желаемая функциональность сенсора могла бы быть достигнута в случае однородно ориентированных жк материалов и остающимися таковыми в исследуемом диапазоне концентраций реагентов. Эта задача, в свою очередь, может быть решена в ячейках с геометрией, в которой выполняются два условия, а именно, открытая поверхность жк материала, и в нем осуществляется определенный электрооптический эффект, т. е. молекулы жк постоянно находятся под влиянием электрического поля. Здесь возможно ожидать наблюдение дополнительных ориентационных эффектов, вызванных изменением, например, параметра порядка вследствие внедрения примесных молекул в жк материал, но с сохранением определенной степени однородности ориентации молекул, которая задается внешним полем.

В литературе мало работ, в которых изучается влияние примесных молекул (реагентов) на жидкокристаллический слой, подвергнутый влиянию электрического поля выше порога Фредерикса. Одной из причин такого состояния дел является вынужденная практика использовать ячейки классической геометрии конденсаторного типа, в которых подразумевается использование двух твердотельных подложек, обеспечивающих подключение напряжения к жидкому кристаллу, но при этом ограничивающих контакт жк материала с внешней средой. В предлагаемой работе рассматривается влияние реагентов (пар легко испаряющихся органических жидкостей) на ход двух электрооптических эффектов в нематике в окрестности $p - n$ перехода, а именно, влияние пара на однородно переориентированный нематик и на доменную текстуру. Оба указанных электрооптических эффекта имеют место в нематике последовательно друг за другом при увеличении напряжения, приложенного к $p - n$ переходу, и реализуются с открытой поверхностью жидкого кристалла.

Эксперимент. В работе использовалась жк ячейка (структура) на основе кремниевой подложки n -типа проводимости с высоколегированным p -карманом. По границе соприкосновения p и n областей формируется $p - n$ переход с выходом на поверхность подложки. С целью исключения электрического контакта жк материала с «полюсами» $p - n$ перехода поверхность подложки была пассивирована пленкой окиси кремния (SiO_2). Отметим, что использование геометрии электродов с непосредственным электрическим контактом с жк материалом в условиях приложения электрического поля, например [11], может приводить к нежелательному электрохимическому разложению жк материала, в результате которого могут происходить ориентационные эффекты, не связанные с присутствием тестируемых реагентов. Гомеотропная ориентация нематика 5 обеспечивалась обработкой поверхности окиси кремния раствором лецитина в толуоле. Описание подобных ячеек с единичным p - n переходом или с группой $p - n$ переходов можно найти в [1, 2]. Наблюдение переориентации нематика из гомеотропного состояния в планарное, формирование доменов в переориентированном нематике, а также влияние пара соответствующего реагента на протекание выше указанных электрооптических эффектов наблюдались и фиксировались поляризационным микроскопом со скрещенными поляризаторами на отражение. В качестве локального источника пара реагента использовалась фильтровальная бумага, которой придается определенный размер и форма для фиксации воздушного зазора с поверхностью подложки [3]. Бумага смачивалась каплей(ми) соответствующей легкоиспаряющейся жидкости, и далее, располагалась вблизи (~ 3 см) слоя жидкого кристалла. Темп смачивания подбирался таким образом, чтобы в этой геометрии эксперимента обеспечивалось распространение пара реагента в сторону жк слоя с увеличивающейся концентрацией до перехода жк в изотропное состояние. Эта геометрия позволяет также найти особенности протекания электрооптических эффектов явно взаимосвязанных с выделенным пространственным направлением потока пара реагента. После перехода нематика в изотропное состояние источник пара реагента удалялся от прототипа сенсора.

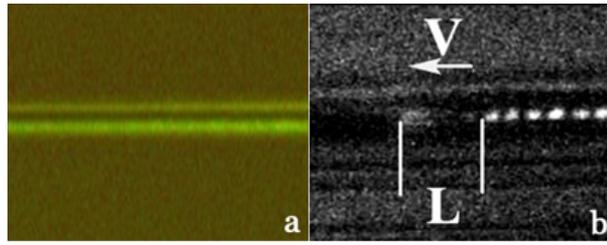


Рис. 1. а – переориентация нематика 5СВ в электрическом поле $p-n$ перехода. Плоскости поляризаторов под 45 град. к линии $p-n$ перехода. Напряжение – 4,5 В. Частота – 50 кГц.
 б – движение «лидера» в переориентированном нематике вдоль линии $p-n$ перехода справа налево со скоростью «V» и формирование доменов. Напряжение – 8.6 В. Частота – 50 кГц, $L = 30 \mu\text{м}$, шаг доменов $d = 10 \mu\text{м}$. Плоскости поляризаторов под 0(90) град. к линии $p-n$ перехода. Ячейка закрытого типа. Толщина жк слоя – 30 мкм
 Fig. 1. а – reorientation of a nematic 5CB in the electric field of the $p-n$ junction. Polarizer planes at 45 degrees to the $p-n$ junction line. Voltage – 4.5 V. Frequency – 50 kHz.
 б – movement of the «leader» along the $p-n$ junction line from right to left with a speed of «V» and the formation of domains. Voltage – 8.6 V. Frequency – 50 kHz, $L = 30 \mu\text{m}$, domain pitch $d = 10 \mu\text{m}$. Polarizer planes under 0 (90) degrees to the $p-n$ junction line. The cell is closed. The thickness of the LC layer is 30 microns

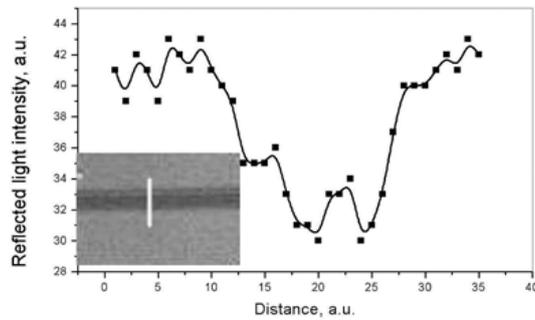


Рис. 2. Распределение интенсивности отраженного света (перпендикулярно линии $p-n$ перехода) от слоя переориентированного нематика 5СВ электрическим полем $p-n$ перехода. Напряжение – 4,5 В. Частота – 50 кГц.
 Вставка: фрагмент ячейки с переориентированным нематиком (горизонтальная темная полоса) на фоне гомеотропной текстуры. Линия $p-n$ перехода под 0(90) град. к плоскостям поляризаторов. Вертикальная метка – участок представленного распределения интенсивности отраженного света
 Fig. 2. The intensity distribution of the reflected light (perpendicular to the line of the $p-n$ junction) from the reoriented nematic 5CB by the electric field of the $p-n$ junction. Voltage – 4.5 V. Frequency – 50 kHz. Insert: a fragment of the cell with a reoriented nematic (horizontal dark stripe) against the background of a homeotropic texture. Line of $p-n$ junction is under 0 (90) degrees to the planes of the polarizers. A vertical mark is a section of the presented distribution of reflected light intensity

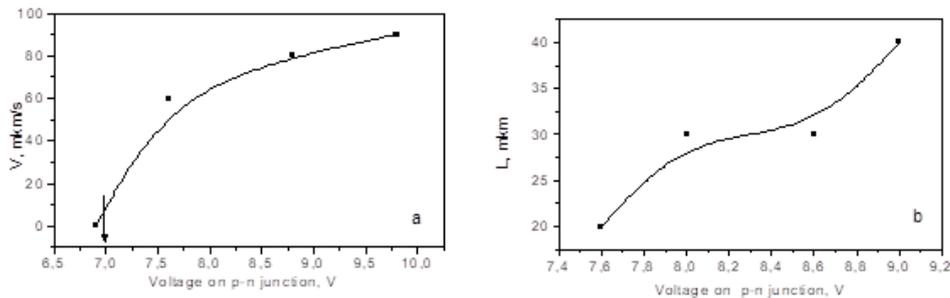


Рис. 3. а – зависимость скорости перемещения «лидера» от напряжения. Стрелка – пороговое напряжение возникновения «лидера». б – зависимость расстояния L между «лидером» и первым формирующимся доменом в доменной текстуре от напряжения. Толщина нематика 5СВ 30 мкм. Частота 50 кГц. Ячейка закрытого типа
 Fig. 3. а – dependence of the «leader» speed on voltage. The arrow is the threshold voltage of the «leader» formation. б – dependence of the distance L between the «leader» and the first domain on the voltage. The thickness of the nematic 5CB 30 microns. Frequency 50 kHz. The cell is closed

Первоначально рассмотрим однородную (преддоменную) переориентацию нематика, и появление доменной текстуры в закрытой ячейке (калиброванная толщина жк слоя позволяет более точно установить закономерности этих электрооптических эффектов) без доступа реагентов к жк материалу. При

прикладывании переменного напряжения к $p - n$ переходу в нематике над переходом происходит переориентация молекул жидкого кристалла. $P - n$ переход имеет вентильную вольтамперную характеристику, поэтому при запирающей фазе напряжения переориентация молекул обусловлена влиянием электрического поля, которое проникает из $p - n$ перехода через диэлектрик в слой жк, а при прямой фазе переменного напряжения переориентация обусловлена полем объемного заряда в жк материале при его релаксации.

В этой фазе напряжения фактически имеет место электрическое замыкание $p - n$ перехода. О накоплении объемного заряда и формировании поля объемного заряда противоположного полю $p - n$ перехода в жк материале косвенно указывает экспериментальный факт: при подключении однополярной ступеньки напряжения запирающей полярности имеет место кратковременная переориентация нематика с последующей релаксацией его в гомеотропное состояние ориентации, а при выключении этой ступеньки напряжения снова происходит кратковременная переориентация нематика, но уже под действием поля объемного заряда.

Выше упомянутая преддоменная переориентация нематика (при напряжении слегка выше порогового) в поляризованном свете проявляется в виде двух светлых полосок вдоль линии $p - n$ перехода на фоне темной гомеотропной текстуры, рис. 1. а (интерференционное окрашивание полосок, нежелательное с точки зрения детектирования реагента, наступает при дальнейшем увеличении напряжения). Рисунок иллюстрирует ситуацию, когда линия $p - n$ перехода расположена под углом 45 град. к плоскостям скрещенных поляризаторов. При таком относительном расположении $p - n$ перехода и поляризаторов интенсивность отраженного света от полос(ы) с переориентированным в них нематиком максимальна.

При повороте ячейки вокруг вертикальной оси, перпендикулярной плоскости ячейки, имеет место чередующееся через 90 град. изменение яркости от максимальной (отмечено выше) до минимальной величины, при которой полоса(ы) выглядит более темной, чем области нематика с исходной гомеотропной ориентацией (вставка, рис. 2).

Такой характер изменения яркости этих полосок показывает, что переориентированные молекулы лежат в плоскости перпендикулярной линии $p - n$ перехода, в которой также лежит вектор электрического поля. Более темный вид полосы переориентированного нематика в сравнении с областями нематика, не затронутыми влиянием электрического поля $p - n$ перехода, объясняется дополнительным поглощением света преимущественно планарно ориентированными молекулами нематика в этой полосе благодаря дихроизму молекул 5СВ, рис. 2.

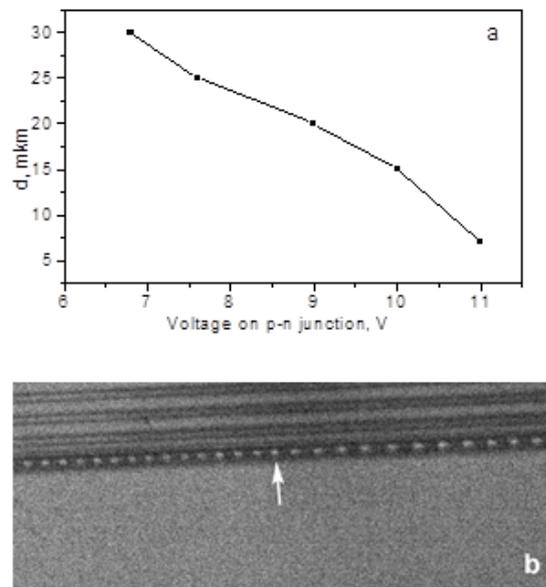


Рис. 4. а – типичная зависимость шага периодичности (d) расположения доменов в нематике 5СВ от напряжения (толщина жк слоя – 20мкм). б – варьирование шага периодичности доменов напряжением. Стрелка указывает место, где находился двигавшийся с правой стороны «лидер», когда напряжение было увеличено. Плоскости поляризаторов под 0(90) град. к линии $p - n$ перехода

Fig. 4. а – typical dependence of the periodicity step (d) of the location of domains in the 5СВ nematic on voltage (thickness of the LC layer is 20 μm) б – variation of the step of domain periodicity by voltage. The arrow indicates the former location of the «leader» moving from the right side when the voltage has been increased. Polarizer planes under 0 (90) degrees to the $p - n$ junction line

При дальнейшем повышении напряжения на $p - n$ переходе вдоль его линии в полосе уже переориентированного нематика формируется доменная текстура. Картина появления линейно расположенных

доменов следующая. При соответствующем пороговом напряжении первоначально возникает локальное возмущение (далее «лидер») в однородно переориентированном нематике. «Лидер» начинает двигаться от места своего зарождения. Такими местами зарождения могут быть локальные неоднородности исходной ориентации нематика на поверхности подложки или изгибы (повороты) линии $p - n$ перехода. Скорость движения «лидера» зависит от напряжения приложенного к $p - n$ переходу, рис. 3. а. Домены непосредственно начинают формироваться последовательно друг за другом на некотором расстоянии L вслед задвигающимся «лидером» рис. 1. б. Расстояние L между «лидером» и первым формирующимся доменом тем больше, чем больше скорость движения «лидера». Типичная зависимость представлена на рис. 3. б. Когда «лидер» уже сформирован, скоростью его перемещения и направлением перемещения можно управлять напряжением. К примеру, его можно остановить и изменить направление его движения в обратную сторону при напряжениях ниже порогового. Отметим, что при обратном движении «лидера» к месту своего зарождения, домены будут соответственно поочередно исчезать переддвигающимся «лидером». Однако при ещё большем уменьшении напряжения домены исчезают уже одновременно вдоль всей линии $p - n$ перехода.

Периодичность расположения доменов (d) зависит от скорости перемещения «лидера» вдоль линии $p - n$ перехода, а именно, чем быстрее движется «лидер», тем меньший шаг доменной текстуры, рис. 4. а. Это позволяет варьировать шаг периодичности на любом выбранном участке линии $p - n$ перехода. Пример изменения периодичности доменов представлен на рис. 4. б.

Далее эксперименты проводились с открытыми ячейками. Отметим, что вышеописанные для закрытых ячеек преддоменная однородная переориентация нематика и доменная текстура, в ячейках с открытой поверхностью нематика происходят подобным образом. Принимая во внимание этот экспериментальный факт, следует считать не критичным фактор жесткости сцепления нематика на верхней поверхности (стекло для закрытой или воздух для открытой ячейки соответственно) на ход выше описанных ориентационных эффектов.

Рассмотрим влияние пара легкоиспаряющихся органических жидкостей на преддоменную однородную переориентацию нематика, а далее, на доменную текстуру. В работе исследовалось влияние пара диметилформамида (ДМ), изопропилового спирта и толуола.

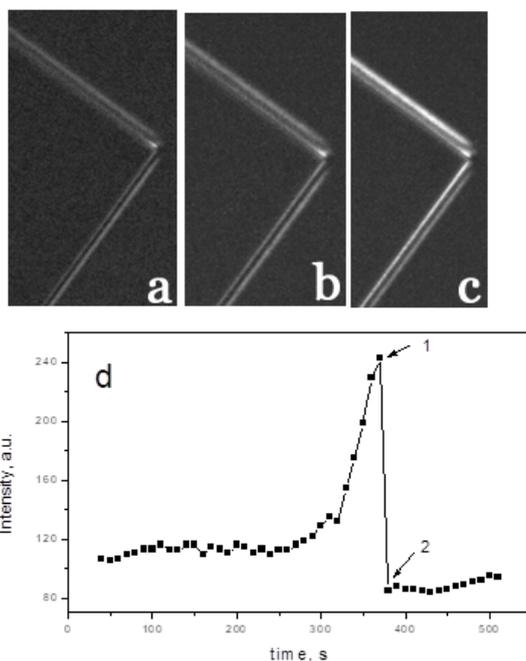


Рис. 5. Реакция переориентированного электрическим полем $p - n$ перехода слоя нематика 5CB с открытой поверхностью на пар ДМ. Время действия пара ДМ, сек: а – 0 (до действия пара), б – 300, с – 350, d – зависимость интенсивности света, отраженного от нематика в окрестности $p - n$ перехода, при действии пара ДМ с возрастающей концентрацией (стрелка 1 – переход в изотропное состояние). Плоскости поляризаторов под 45 град. к линии $p - n$ перехода. Стрелка 2 – возврат в жидкокристаллическое состояние. Напряжение 5 В, частота 50 кГц

Arrow 2 – return to the liquid crystal state. Voltage 5 V, frequency 50 kHz

Рис. 5 демонстрирует типичное проявление влияния пара ДМ с увеличивающейся концентрацией на переориентированный вдоль линии $p - n$ перехода нематик. Хорошо видно, рис. 5. а б с, что по

мере увеличения концентрации молекул ДМ в жк слое интенсивность отраженного света от нематика в окрестности $p - n$ перехода увеличивается, при этом выбор начального значения напряжения таков, что интерференционное окрашивание переориентированного нематика ещё не происходит. На рис. 5. d представлена зависимость интенсивности отраженного света от переориентированного нематика над n - поверхностью в окрестности $p - n$ перехода. Видно, что влияние пара ДМ начинает проявляться сравнительно задолго до фазового перехода в изотропное состояние (отмечен стрелкой 1). После удаления источника пара, и, соответственно, испарения определенного количества молекул ДМ из нематика, последний снова переходит в жидкокристаллическое состояние, причем начальная величина интенсивности отраженного света непосредственно после перехода (стрелка 2, рис. 5. d) меньше значений интенсивности отражения до действия пара ДМ. Продемонстрированную чувствительность области переориентированного нематика к инородным молекулам можно связать с изменением параметра порядка жидкого кристалла. При уменьшении параметра порядка эффективное влияние электрического поля, которое остается неизменным, на нематик будет уменьшаться при одновременном усилении вклада флуктуации в результирующее состояние ориентации молекул. Вышесказанное косвенно подтверждается характером распределения интенсивности отраженного света от переориентированного нематика при возрастании концентрации пара ДМ, рис. 6. Хорошо видно, что ширина темной полосы (впадина между n, p максимумами), которая характеризует эффективность влияния электрического поля на нематик, с увеличением времени действия пара ДМ уменьшается.

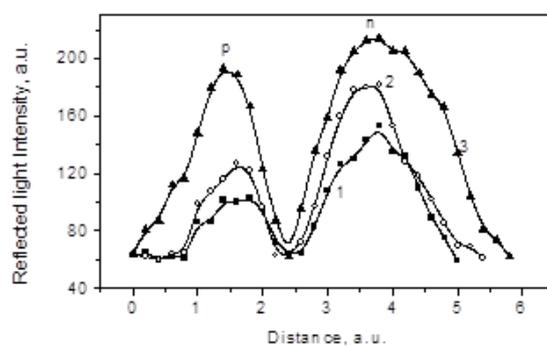


Рис. 6. Распределение интенсивности отраженного света от переориентированного нематика 5CB с открытой поверхностью поперёк линии $p - n$ перехода при действии пара ДМ. Длительность действия пара ДМ, сек: 1 – 0; 2 – 30; 3 – 60. n, p означают полосы переориентации нематика над соответствующими поверхностями $p - n$ перехода.

Плоскости поляризаторов под ~ 15 град. к линии $p - n$ перехода. Напряжение – 4В. Частота – 50 кГц
 Fig. 6. The intensity distribution of reflected light from a reoriented 5CB nematic layer with an open surface across the $p - n$ junction line under the action of a DM vapor. Duration of a DM vapor action, sec: 1 – 0; 2 – 30; 3 – 60. n, p means the nematic reorientation bands over the corresponding surfaces of the $p - n$ junction. Polarizer planes under ~ 15 degrees to the $p - n$ junction line. Voltage – 4V. Frequency – 50 kHz

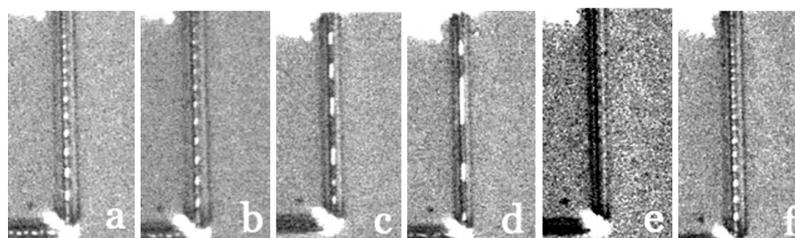


Рис. 7. Доменная текстура при возрастании концентрации пара ДМ. Время действия пара ДМ, сек.: a – 0, b – 50, c – 150, d – 300, e, f – доменная текстура после выхода жк из изотропного состояния. Ячейка с открытой поверхностью нематика 5CB. Напряжение – 6,5 В. Частота – 50 кГц. Плоскости поляризаторов под 0(90) град. к линии $p - n$ перехода

Fig. 7. Domain texture under increasing concentration of DM vapor. Duration of DM vapor, sec.: a – 0, b – 50, c – 150, d – 300, e, f – domain texture after an isotropic state. Cell with an open surface of the nematic 5CB. Voltage – 6.5 V. Frequency – 50 kHz. Polarizer planes under 0 (90) degrees to the $p - n$ junction line

Установлено влияние пара ДМ на периодичность в расположении доменов. Рис. 7. a, b, c, d демонстрирует ряд типичных изображений доменной текстуры в тонком слое нематика при увеличении концентрации ДМ (до перехода в изотропное состояние). На приведенных изображениях (на соответствующих участках, имеющих одинаковую толщину жк материала) видно увеличение шага периодичности в расположении доменов. После выхода из изотропного состояния наблюдается значительно уменьшенный

шаг периодичности доменов (рис. 7. е), который затем продолжает увеличиваться (рис. 7. ф) и в конечном итоге достигает исходного значения (рис. 7. а).

На рис. 8 представлены изображения доменов, сформированные в более толстом слое нематика ($\sim 50 - 60$ мкм) вдоль линии $p - n$ перехода при действии пара ДМ. В отличие от тонкого слоя, когда наблюдается периодичность доменов (рис. 7) только вдоль линии $p - n$ перехода, в «толстом» нематике в доменной текстуре дополнительно проявляется периодичность в отклонении от линии $p - n$ перехода. При этом в каждом отдельном домене, в свою очередь, наблюдаются определенные закономерности в распределении яркости отраженного света, связанные с соответствующим пространственным расположением директора.

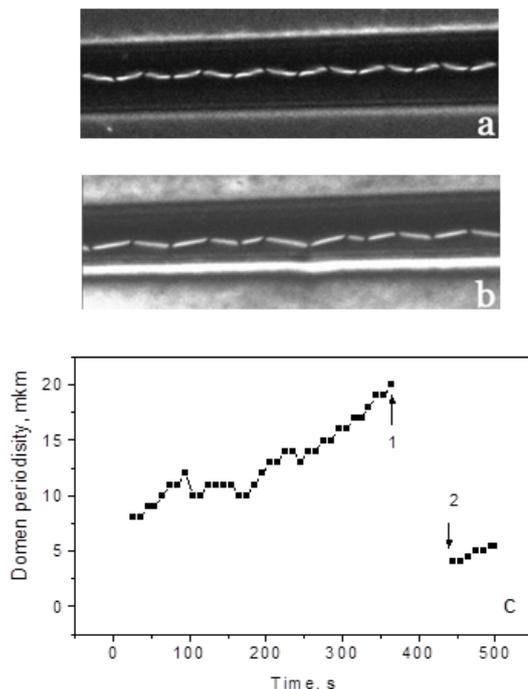


Рис. 8. Доменная текстура в «толстом» слое нематика при возрастании концентрации ДМ. а – исходная доменная текстура. б – время действия пара ДМ 200 секунд. с – зависимость шага расположения доменов от времени действия пара ДМ. Ячейка с открытой поверхностью нематика 5СВ. Напряжение – 6,5 В. Частота – 50 кГц.

Плоскости поляризаторов под $0(90)$ град. к линии $p - n$ перехода

Fig. 8. Domain texture in a thick nematic layer under increasing concentration of DM. а – original domain texture. б – the duration of DM vapor action is 200 seconds. с – dependence of the step of the arrangement of domains on the time of DM vapor action. Cell with an open surface of the nematic 5СВ. Voltage – 6.5 V. Frequency – 50 kHz. Polarizer planes under $0(90)$ degrees to the $p - n$ junction line

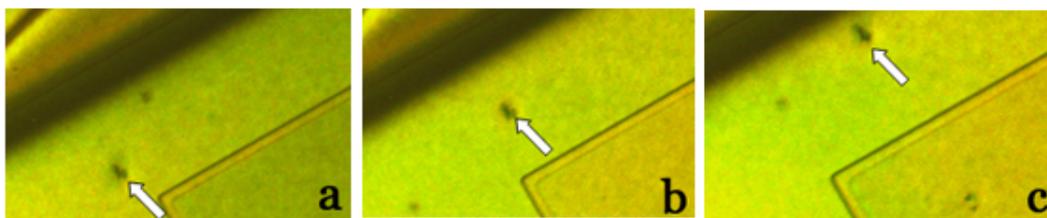


Рис. 9. Перемещение пылинки с поверхностью нематика в области вне действия поля $p - n$ перехода при градиентном влиянии пара изопропилового спирта. Ячейка с открытой поверхностью нематика 5СВ

Fig. 9. The movement of a speck of dust with a nematic surface in an area outside the action of the $p - n$ junction field under the gradient influence of isopropyl alcohol vapor. Cell with an open surface of the nematic 5СВ

По мере увеличения концентрации ДМ до перехода в изотропное состояние (отмечено стрелкой 1) шаг расположения доменов увеличивается, что отображено на рис. 8. с. После выхода из изотропного состояния (стрелка 2), начальный шаг в расположении доменов, как и в случае тонкого слоя жк (рис. 7. е), начинается с меньшей величины. Малый шаг периодичности расположения доменов после выхода из изотропного состояния связан с повышенной скоростью движения «лидера», которая в свою

очередь объясняется низкими значениями вязко-упругих параметров нематика сразу после выхода из изотропного состояния.

Ряд экспериментальных результатов указывают на возможный вклад фактора поверхностного натяжения нематика в общий механизм влияния пара реагента на ориентационное поведение директора. В условиях выделенного направления потока пара реагента с возрастающей интенсивностью можно допустить неоднородную по поверхности величину поверхностного натяжения нематика. В этом случае «стягивание» поверхности нематика в сторону, противоположную от источника пара, может проявиться по (1) перемещению микропылинок, (2) эффекту ориентации директора в потоке жк материала, а также (3) пространственному сдвигу структурных распределений директора. Все три отмеченные выше явления наблюдаются в экспериментах при использовании пара изопропилового спирта и толуола. Отметим, что для пара ДМ подобные проявления не столь явные.

Рис. 9 демонстрирует перемещение микропылинок вместе с поверхностью нематика при направленном потоке пара изопропилового спирта. Направление движения микропылинок и направление от источника пара совпадают. На этом же рисунке 9 демонстрируется практически однородная ориентация нематика, которая формируется в результате перехода из гомеотропного состояния ориентации в потоке жк вызванного стягиванием поверхности. Эффект наблюдается на большой площади поверхности нематика, где влияние электрического поля $p-n$ перехода заведомо отсутствует. Доменная текстура (рис. 8. а) представляет собой пример определенного фиксированного в пространстве распределения директора с входом на поверхность жидкого кристалла. Рис. 10. а б демонстрирует эффект сдвига линейно расположенных доменов в сторону противоположную от источника пара (реагент – толуол).

Рисунок 10 (также как и рис. 9) демонстрирует ориентационный переход нематика из гомеотропного (темные области вне действия поля $p-n$ перехода, рис. 10. а) в наклонное состояние (рис. 10. б) за счет ориентации директора в потоке, причем однородность интерференционного цвета по всей отмеченной области поверхности (рис. 10. б) подтверждает однородность ориентации директора (в потоке). После удаления источника пара движение пылинок меняется на обратное, а домены возвращаются в область линии $p-n$ перехода.

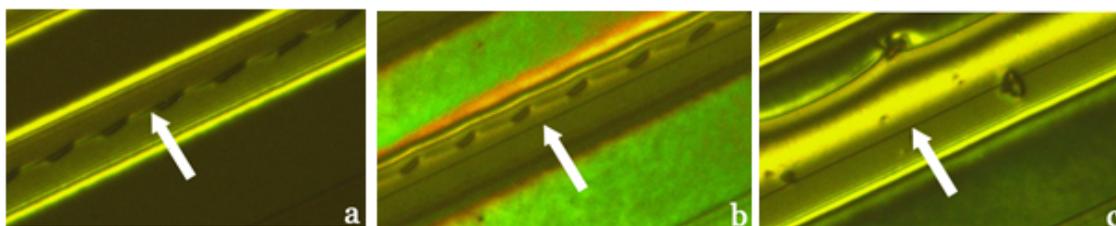


Рис. 10. а – доменная текстура до действия пара реагента. б – сдвиг доменов от линии $p-n$ перехода при действии пара толуола. в – разрушение доменов перед фазовым переходом в изотропное состояние. Стрелка указывает на линию $p-n$ перехода. Ячейка с открытой поверхностью нематика 5СВ. Напряжение – 6 В. Частота – 50 кГц.

Плоскости поляризаторов под 15 град. к линии $p-n$ перехода

Fig. 10. а – domain texture prior to the action of the reagent vapor. б – domain shift from the $p-n$ junction line under the action of toluene vapor. в – destruction of domains before the phase transition into an isotropic state. The arrow points to the $p-n$ junction line. Cell with an open surface of the nematic 5СВ. Voltage – 6 V. Frequency – 50 kHz. Polarizer planes under 15 degrees to the $p-n$ junction line

Заключение. Таким образом, в работе экспериментально продемонстрировано, что такие электрооптические эффекты, как преддоменная переориентация нематика и доменная текстура, имеющие место в электрическом поле $p-n$ перехода, демонстрируют чувствительность к парам легкоиспаряющихся жидкостей, таких как диметилформамид, толуол, изопропиловый спирт. Для преддоменной однородной переориентации нематика в поле $p-n$ перехода характерно увеличение интенсивности отраженного света, при этом выбором начального значения напряжения появление интерференционных цветов может быть исключено. Последнее позволяет упростить процедуру формирования выходного сигнала в прототипе сенсора. Доменная текстура, которая формируется вслед за преддоменной переориентацией нематика при увеличении напряжения, также демонстрирует чувствительность к пару реагентов. Чувствительность проявляется в увеличении шага периодичности доменов с ростом концентрации реагента в жк материале. Рассматривая доменную текстуру в роли дифракционной решетки, появляется потенциальная возможность регистрировать наличие пара реагента дифракционными методами. Для пара изопропилового спирта и толуола установлено существенно более сильное проявление влияния поверхностного натяжения, изменение которого в плоскости поверхности нематика вызывает ориентацию директора в потоке и смещение линейно расположенных доменов от линии $p-n$ перехода.

Список литературы

1. Алексеева А. А., Богданов С. И., Кучеев С. И., Рыжикова Е. Ю. 2018. Переориентация нематика электрическим полем n перехода. Научные ведомости БелГУ, Сер. Математика. Физика, 50(4): 452–459.
2. Богданов С. И., Гудкова В. А., Колесников Д. А., Кучеев С. И., Плесканёв А. А. 2017. Дифракционная решетка, индуцированная электрическим полем $p-n$ переходов в нематической ячейке. Научные ведомости БелГУ, Сер. Математика. Физика, 27 (276), 49: 75–84.
3. Валетова Е. А., Колесников Д. А., Кучеев С. И. 2017. Адсорбция и переориентация нематика на наноразмерной углеродной плёнке, индуцированная парами органических растворителей. Научные ведомости БелГУ, Сер. Математика. Физика, 50(1): 64–72.
4. Blinov L. M., Chigrinov V. G. 1993. Electrooptic Effects in Liquid Crystal Materials. Springer New York, 464.
5. Chang C. K., Kuo H. L., Tang K. T. and Chiu S. W. 2011. Optical detection of organic vapors using cholesteric liquid crystals. Appl. Phys. Lett., 99: 073504(3pp).
6. Chang C. K., Kuo H. L. 2014. Liquid crystal gas sensor cell and the use thereof. Patent application number: 20140004004, Publication date: 2014-01-02.
7. Kek K. J., Lee J. J. Z. 2017. Chemical gas sensors using chiral nematic liquid crystals and its applications. Journal of the Society for Information Display, 25(6): 366–373.
8. Niu X., Zhong Y., Chen R., Wang F and Luo D. 2017. Highly sensitive and selective liquid crystal optical sensor for detection of ammonia . OPTICS EXPRESSES , 25(12): 13549–13556.
9. Popov N., Honaker L. W., Popova M., Usol'tseva N., Mann E. K., Jáklí A. and Popov P. 2018. Thermotropic liquid crystal-assisted chemical and biological sensors. Materials, 11(1): 1–20.
<https://doi.org/10.3390/ma11010020>
10. Shibaev P. V., Wenzlick M., Murray J., Tantillo A. and Howard-Jennings J. 2015. Rebirth of Liquid Crystals for Sensoric Applications: Environmental and Gas Sensors Advances in Condensed Matter Physics, Volume 2015, Article ID 729186 (8 pp). <http://dx.doi.org/10.1155/2015/729186>
11. Zou Y., Namkung J., Lin Y., Ke D. and Lindquist R. G. 2011. Influence of a bias voltage on surface-driven orientational transitions for liquid crystal-based chemical and biological sensors. J. Phys. D: Appl. Phys. 44: 135103 (7pp).
12. Zou Y., Namkung J., Lin Y., Ke D. and Lindquist R. G. 2016. Interference colors of nematic liquid crystal films at different applied voltages and surface anchoring conditions. OPTICS EXPRESS , 19(4): 3297--3303.

References

1. Alekseeva A. A., Bogdanov S. I., Kucheev S. I., Rizhikova E. Yu. 2018. Pereorientaziya nematica elektricheskim polem n perehoda [Reorientation of nematic with electric field of n junction]. Belgorod State University Scientific Bulletin, Mathematics & Physics, 50(4): 452–459.
2. Bogdanov S. I., Gudkova V. A., Kolesnikov D. A., Kucheev S. I., Pleskanev A. A. 2017. Difrakzionnaya reshotka induzirovannaya elektricheskim polem $p-n$ perehodov v nematicheskoi yacheike [Diffraction grating induced with electric field of $p-n$ junctions in nematic cell]. Belgorod State University Scientific Bulletin, Mathematics & Physics, 27 (276), 49: 75–84.
3. Valetova E. A., Kolesnikov D. A., Kucheev S. I. 2017. Adsorbziya i pereorientaziya nematica na nanorazmernoi uglevodnoi plenke, induzirovannaya parami organicheskikh rastvoriltelei [Adsorption and reorientation of nematic on nano-dimensional carbon film induced by vapor of organic solvents]. Belgorod State University Scientific Bulletin, Mathematics & Physics, 50(1): 64–72.
4. Blinov L. M., Chigrinov V. G. 1993. Electrooptic Effects in Liquid Crystal Materials. Springer New York, 464.
5. Chang C. K., Kuo H. L., Tang K. T. and Chiu S. W. 2011. Optical detection of organic vapors using cholesteric liquid crystals. Appl. Phys. Lett., 99: 073504(3pp).

6. Chang C. K., Kuo H. L. 2014. Liquid crystal gas sensor cell and the use thereof. Patent application number: 20140004004, Publication date: 2014-01-02.
7. Kek K. J., Lee J. J. Z. 2017. Chemical gas sensors using chiral nematic liquid crystals and its applications. *Journal of the Society for Information Display*, 25(6): 366–373.
8. Niu X., Zhong Y., Chen R., Wang F and Luo D. 2017. Highly sensitive and selective liquid crystal optical sensor for detection of ammonia . *OPTICS EXPRESS* , 25(12): 13549–13556.
9. Popov N., Honaker L. W., Popova M., Usol'tseva N., Mann E. K., Jáklí A. and Popov P. 2018. Thermotropic liquid crystal-assisted chemical and biological sensors. *Materials*, 11(1): 1–20.
<https://doi.org/10.3390/ma11010020>
10. Shibaev P. V., Wenzlick M., Murray J., Tantillo A. and Howard-Jennings J. 2015. Rebirth of Liquid Crystals for Sensoric Applications: Environmental and Gas Sensors *Advances in Condensed Matter Physics*, Volume 2015, Article ID 729186 (8 pp). <http://dx.doi.org/10.1155/2015/729186>
11. Zou Y., Namkung J., Lin Y., Ke D. and Lindquist R. G. 2011. Influence of a bias voltage on surface-driven orientational transitions for liquid crystal-based chemical and biological sensors. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 44: 135103 (7pp).
12. Zou Y., Namkung J., Lin Y., Ke D. and Lindquist R. G. 2016. Interference colors of nematic liquid crystal films at different applied voltages and surface anchoring conditions. *OPTICS EXPRESS* , 19(4): 3297–3303.

Получена 11.09.2020

Бердниченко Артем В. – аспирант Белгородского государственного национального исследовательского университета

ул. Победы, 85, Белгород, 308015, Россия

E-mail: 946360@bsu.edu.ru

Кучеев Сергей Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики Белгородского государственного национального исследовательского университета

 <http://orcid.org/ORCID 0000-0002-1623-2063>

ул. Победы, 85, Белгород, 308015, Россия

E-mail: kucheev@bsu.edu.ru