

05:07:09

Нестационарная локальная переориентация нематика в ячейке с кремниевым $p-n$ -переходом

© Ю.И. Гончаров, Д.А. Колесников, С.И. Кучеев

Белгородский государственный университет
E-mail: skucheev@yahoo.com

Поступило в Редакцию 7 апреля 2014 г.

Впервые сообщается о наблюдении эффекта локальной нестационарной переориентации нематика, который инициируется обратным смещенным $p-n$ -переходом в ячейке с подложкой Si. Скорость перемещения, дистанция, на которую перемещается полоса переориентированного нематика, на порядок превышающая толщину ячейки, определяются напряжением смещения $p-n$ -перехода, а ее профиль зависит от распределения поверхностной проводимости, которая в работе задается облучением ионами Ga (30 keV) или генерацией неравновесных носителей заряда в кремнии светом. Локальная переориентация нематика и обеднение поверхности кремния объясняются влиянием поля объемного заряда в жидком кристалле.

Хорошо известно, что наличие ионов в жидкокристаллических (ЖК) средах является причиной ряда электрооптических эффектов при приложении электрического поля [1]. С точки зрения практического применения некоторые из них рассматриваются негативными, ухудшающими эксплуатационные характеристики ЖК-приборов [2], другие, наоборот — потенциально перспективными, обусловленными самоорганизующимися процессами [3] и, без сомнения, требующими дальнейших исследований.

Ставшая классической конструкция ЖК-ячейки, представляющая собой в общем случае симметричный плоский конденсатор, по мнению авторов, является сдерживающим фактором для более глубокого исследования ионной подсистемы и обусловленной ею молекулярной организации в жидких кристаллах. В подавляющем числе экспериментальных и теоретических работ, согласно литературным данным, ионные процессы в таких ячейках рассматриваются сугубо одномер-

ными [4], перпендикулярно ЖК-слою, за исключением приэлектродных областей [5]. В итоге область проявления ионной подсистемы в ЖК и соответственно возможность исследований ограничены 2–3 десятками микрометров.

В предлагаемой работе рассмотрен электрооптический эффект в несимметричной ЖК-ячейке, в которой одной из стенок служит поверхность кремния с p – n -переходом. Эффект фактически представляет собой динамическую развертку зарядового процесса, который сопровождается локальной переориентацией нематика. Область (в плоскости ячейки), в которой проявляется нестационарный электрооптический эффект, более чем на порядок превышает толщину ЖК-слоя.

В работе использовалась ЖК-ячейка, схематически отображенная на рис. 1, *a*. В качестве подложки использовался монокристаллический кремний n -типа проводимости с удельным сопротивлением $4.5 \Omega \cdot \text{см}$, в котором методами фотолитографии были сформированы легированные бором карманы p^+ -типа проводимости с удельным сопротивлением около $0.1 \Omega \cdot \text{см}$. Гомеотропная ориентация нематического жидкого кристалла 5СВ на поверхности кремния и прозрачного электрода ПТО задавалась обработкой раствором лецитина в толуоле. Толщина ЖК-слоя фиксировалась фторопластовыми прокладками.

В момент подключения обратносмещенной ступеньки напряжения U_0 к p – n -переходу (рис. 1, *a*) вдоль линии p – n -перехода наблюдается переориентация нематика благодаря проникновению электрического поля p – n -перехода в ЖК-слой. Эта полоса переориентированного нематика (далее ППН (BRN)) практически сразу начинает двигаться от линии p – n -перехода, сохраняя параллельность, в сторону кремния n -типа проводимости. На рис. 1, *c* представлено типичное изображение двигающейся ППН (отмечена стрелкой, ~ 0.7 s после включения ступеньки напряжения) на темном фоне гомеотропно ориентированного нематика.

Рассмотрим некоторые закономерности движения ППН в ответ на включение ступеньки постоянного (переменного) напряжения. Ширина ППН при данной толщине ЖК-слоя и величине ступеньки напряжения (U_0) практически остается неизменной при ее движении. По мере удаления ППН от линии p – n -перехода яркость ее уменьшается и на некотором расстоянии (рис. 2, *a*, вставка, кривая *a*) от линии p – n -перехода ППН становится неразличимой от фона гомеотропной ориентации, однако ППН продолжает перемещаться в невидимой фазе.

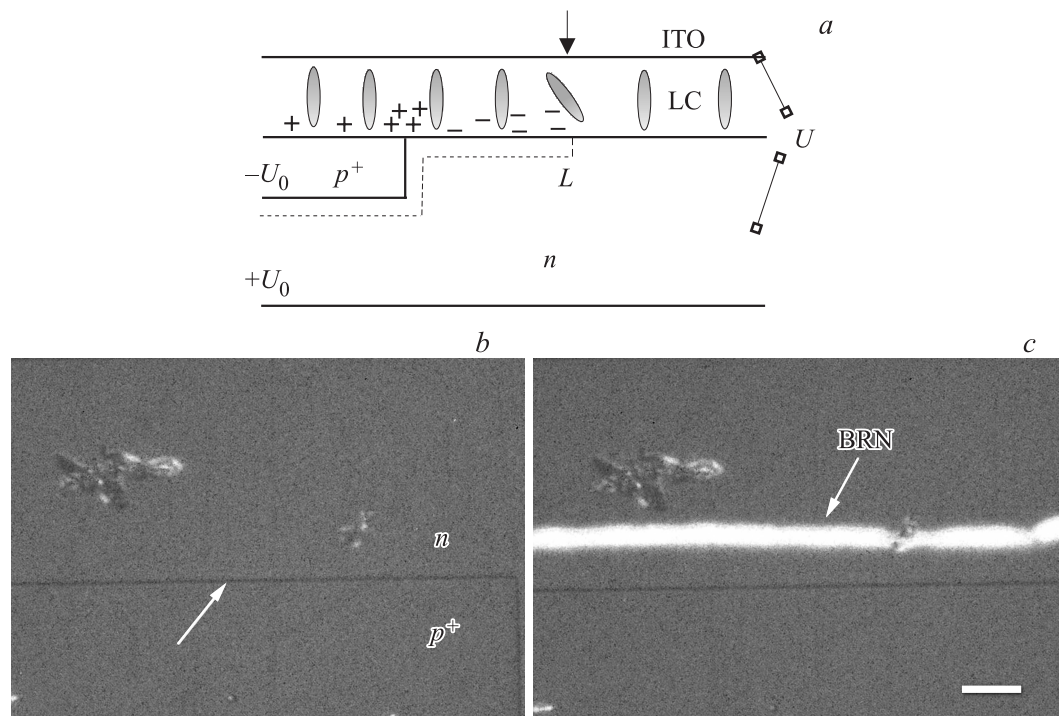


Рис. 1. *a* — схематическое представление ЖК-ячейки (структура Si(*n*)/LC/ITO). *L* — граница обеднения. *b, c* — фрагмент ЖК-ячейки с *p-n*-переходом на поверхности Si. *b* — исходная гомеотропная ориентация нематика 5CB. Толщина ЖК-слоя $10\ \mu\text{m}$. Стрелка указывает на линию *p-n*-перехода. $U_0 = 0$, $U = 0$. *c* — движущаяся ППН (BRN). $U_0 = 5.5\ \text{V}$, $U = 0$. Масштаб $40\ \mu\text{m}$.

Электрическое замыкание p – n -перехода приводит к визуализации ППН на более удаленной дистанции от линии p – n -перехода. На рис. 2, *a* (вставка, кривая *b*) в качестве примера отмечено максимальное расстояние, на которое перемещается ППН от линии p – n -перехода для соответствующей ступеньки напряжения U_0 в данной ячейке. Видно, что это расстояние более чем на порядок превышает толщину ЖК-слоя.

Скорость движения ППН при данном напряжении ступеньки напряжения (U_0) максимальна в непосредственной близости от линии p – n -перехода и по мере удаления от него уменьшается, подчиняясь экспоненциальной зависимости (рис. 2, *a*, пунктирные линии соответствуют линейной аппроксимации). Кроме этого обнаруживается зависимость скорости движения ППН от полярности и величины напряжения U , кратковременно прикладываемого (перед приложением ступеньки U_0) к конденсатору Si(n)/LC/ITO (рис. 1, *a*) с целью его электрической зарядки, при одной и той же величине U_0 . Если выбрано напряжение U с полярностью „+“ относительно ITO, скорость движения ППН увеличивается, тогда как при противоположной полярности („–“ U относительно ITO электрода) скорость уменьшается (рис. 2, *b*).

Интересное поведение ППН наблюдается, когда на пути движущейся ППН встречаются изолированные p^+ -карманы. В момент касания ППН с границей p^+ -кармана ППН „исчезает“ в области касания (нематик переходит в гомеотропное состояние). В этот же момент времени формируется новая ППН вдоль границы данного p^+ -кармана и начинает двигаться над поверхностью кремния n -типа проводимости уже от новой границы независимо от формы и размера данного p^+ -кармана.

Принимая во внимание, что радиационные дефекты кристаллической решетки полупроводника (без термического отжига) в общем случае вызывают увеличение поверхностной проводимости (по сравнению с исходной), с целью выяснения влияния поверхностной проводимости на перемещение ППН поверхность кремния была подвергнута облучению ионным пучком Ga в сканирующем дуальном (электроны/ионы) микроскопе FEI Quanta 200 3D (энергия 30 keV, ток 3 nA, время облучения 5 min). Был выбран режим облучения „spot“, при котором ионный пучок фокусируется на поверхности в точку. Из-за имеющейся расфокусировки пучка было получено некоторое радиальное распределение дозы облучения и соответственно поверхностной проводимости. Наклон ионного пучка по отношению к поверхности (в эксперименте

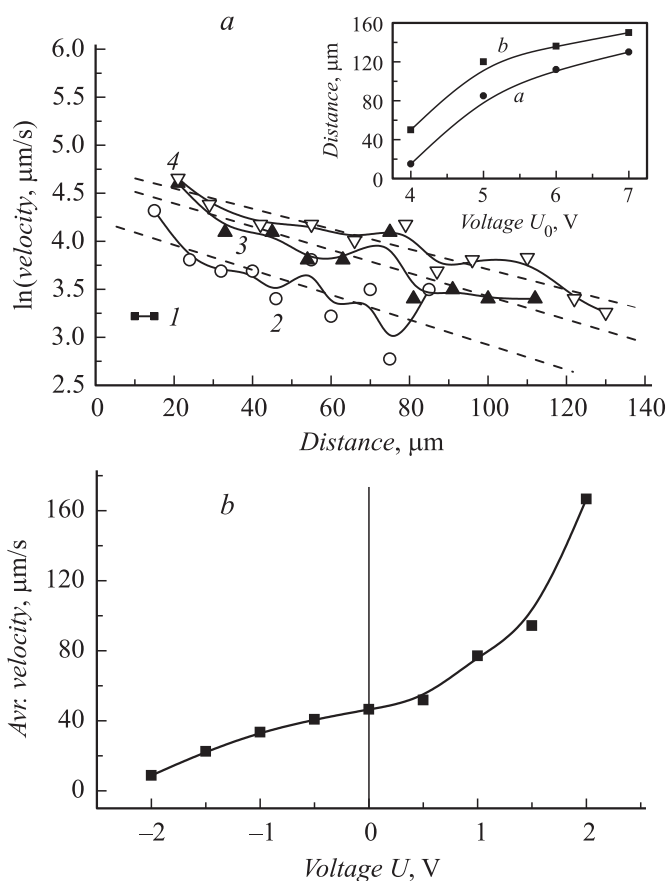


Рис. 2. *a* — зависимость логарифма скорости перемещения ППН от расстояния до p - n -перехода (ступенька напряжения U_0, V : 1 — 4; 2 — 5; 3 — 6; 4 — 7). $U = 0$. *b* — зависимость средней скорости ППН от напряжения U , $U_0 = 6.5 \text{ V}$. Толщина ЖК-слоя $10 \mu\text{m}$.

52°) приводит к эллиптическому виду распределения поверхностной проводимости на поверхности. На рис. 3, *a* (вставка) представлен фрагмент ЖК-ячейки с участком поверхности кремния с p - n -переходом, который был обработан ионным пучком Ga вышеуказанным спосо-

бом. С целью визуализации поверхности кремния через гомеотропно ориентированный нематик поляризаторы полностью не скрещивались. Хорошо видны кратер (С), возникший под действием фокусированного пучка ионов, и светлая эллиптическая область (Am) аморфизированной поверхности кремния [6]. Далее, с увеличением расстояния от кратера следует поверхность, которая, без сомнения, тоже подверглась облучению ионами Ga. Из-за меньшей дозы облучения она не разрешается оптически, однако различима в растровый электронный микроскоп [7]. С целью постоянной (во времени) визуализации ППН вместо ступеньки постоянного напряжения к $p-n$ -переходу подключалось переменное напряжение. В таком режиме электрическое замыкание $p-n$ -перехода осуществляется в периоды времени, соответствующие прямому смещению перехода вследствие его низкого сопротивления. После включения переменного напряжения формируется ППН, которая перемещается и достигает некоторого стационарного положения, оставаясь видимой (рис. 3, а, вставка). На рис. 3, а приведены кривые, которые соответствуют стационарным положениям ППН при разных величинах переменного напряжения U_0 . Хорошо видно, что имеет место корреляция с предполагаемым распределением поверхностной проводимости. Для аморфизированной поверхности кремния (Am), которой соответствует максимальная поверхностная проводимость, ППН не перемещается от линии $p-n$ -перехода. По мере удаления от кратера (С) расстояние (D), на которое ППН отходит от линии $p-n$ -перехода, пропорционально увеличивается при заданном напряжении на $p-n$ -переходе (рис. 3, а).

Поверхностная проводимость кремния изменялась генерацией неравновесных носителей заряда под действием света. В работе использовался He–Ne-лазер ($0.63 \mu\text{m}$), сфокусированный на поверхности кремния в пятно. Были установлены следующие экспериментальные факты. В область засветки поверхности кремния соответствующий участок ППН не перемещается. Профиль линии ППН, который задается распределением интенсивности света лазерного излучения на поверхности кремния, сохраняется несколько секунд после выключения лазерного излучения, по мере движения ППН (рис. 3, б, с). На рис. 3, с граница G очерчивает поверхность, соответствующую пятну лазерного излучения, действовавшего в первый момент времени движения ППН. Наблюдается гистерезисное поведение скорости перемещения ППН при включении и выключении лазерного излучения. После достижения соответствующего стационарного положения ППН включение лазерного

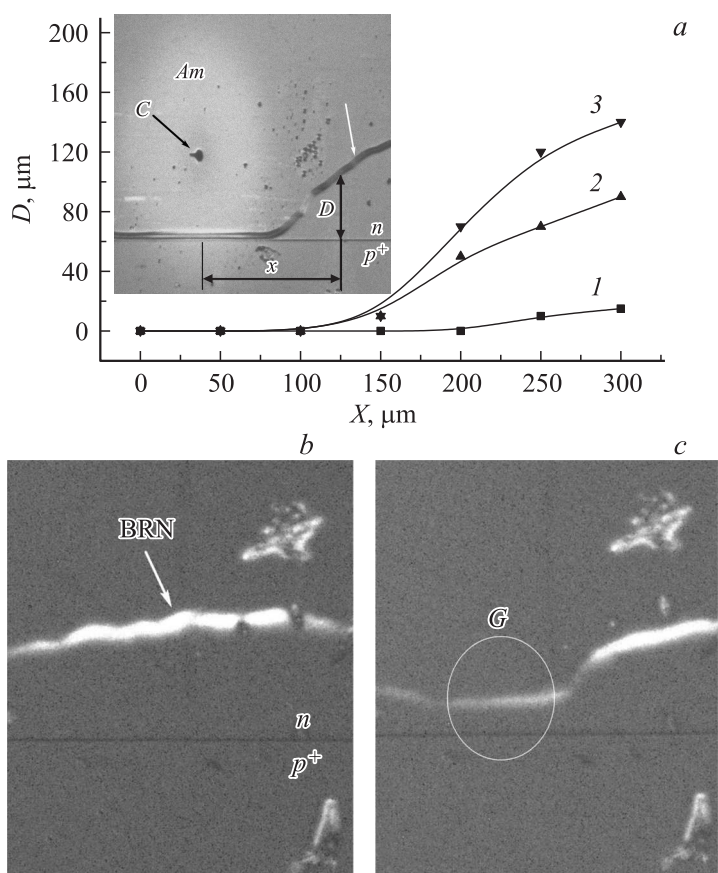


Рис. 3. *a* — стационарное положение ППН в ЖК-ячейке с кремнием, облученным ионами Ga. Напряжение U_0, V : 1 — 2, 2 — 4, 3 — 6. Частота 50 kHz. Вставка: вид стационарной ППН (BRN), $U_0 = 5.5 \text{ V}$, частота 50 kHz. *b, c* — профиль линии ППН, через $\sim 2 \text{ s}$ после включения ступеньки постоянного напряжения ($U_0 = 5 \text{ V}$, $U = 0$). *b* — без лазерного облучения, *c* — с предварительным лазерным облучением.

облучения приводит к быстрому (порядка 0.1 s) изменению профиля линии ППН. После выключения лазерного излучения требуется на

порядок больший период времени (несколько секунд), чтобы ППН достигла стационарного положения.

Принимая во внимание вышеприведенные результаты (гистерезис, сохранение формы линии ППН, заданной световым излучением, характерное время перемещения ППН, лежащее в секундном диапазоне, что на несколько порядков превышает характерное время зарядовых процессов в кремнии [8]), полагаем, что эффект движущейся ППН и обеднение поверхности кремния, над которой перемещается ППН, обусловлено пространственным разделением ионных зарядов в слое ЖК и формированием объемного заряда. Область максимальной неоднородности электрического поля (на границе области пространственного заряда) проявляется локальной переориентацией нематика (рис. 1, *a*, отмечено вертикальной стрелкой). Факт формирования объемного заряда и его ограничение (в плоскости ячейки) линией ППН отчетливо проявляется в ячейках с начальной наклонной ориентацией нематика. В таких ячейках в момент выключения ступеньки постоянного напряжения происходит кратковременная переориентация нематика электрическим полем объемного заряда только в той области, по которой ППН передвигалась (включая невидимую фазу движения) на момент выключения напряжения. Если такие ячейки запитываются переменным напряжением, то гомеотропная ориентация наблюдается только на тех участках ЖК ячейки, по которым ППН уже переместилась.

В заключение хотелось бы отметить, что описываемый в работе электрооптический эффект высоко интегрирован с кремниевой технологией, база которой, как известно, опирается на свойства $p-n$ -перехода, и мог бы найти применение в приборах электрооптической обработки информации, в которых запись и считывание информации осуществляются соответственно светом в виде динамического распределения ионов в жидких кристаллах и эффектом поля в кремнии, который индуцируется электрическим полем ионного заряда.

Список литературы

- [1] *Yang D.K., Wu S.T.* // Fundamentals of Liquid Crystal Devices. John Wiley & Sons, Ltd. 2006. P. 378.
- [2] *Mizusaki M., Miyashita T., Uchida T., Yamada Yu., Ishii Yu., Mizushima S.* // J. Appl. Phys. 2007. V. 192. P. 014 904.
- [3] *Бартонов Я., Кальнин А.А.* // ЖТФ. 1998. Т. 68. В. 1. С. 125–127.

- [4] *Pagliusi P., Zappone B., Cipparrone G., Barbero G.* // J. Appl. Phys. 2004. V. 96. N 1. P. 218–223.
- [5] *Stojmenovik G., Neyts K., Vermael S., Verschueren A.R.M., van Asselt R.* // Jpn J. Appl. Phys. 2005. V. 44. N 8. P. 6190–6195.
- [6] *Ziegler J.F.* // Ion Implantation: Science and Technology. San Diego: Academic Press, Inc., 1988. P. 63.
- [7] *Кучеев С.И., Тучина Ю.С.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 6. С. 131–134 [*Kucheev S.I., Tichina Yu.S.* // Technical Physics. 2010. V. 55. N 6. P. 883–886].
- [8] *Muller R., Kamins T.* // Device electronics for integrated circuits. N.Y.: Wiley, 2003. P. 560.