



УДК 620.1.72:532.783

**ПОЛЯРНЫЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПАМЯТИ В СТРУКТУРЕ  
Si/НЕМАТИК/ИТО****POLAR ELECTRO-OPTICAL EFFECT OF MEMORY IN Si/NEMATIC/ITO  
STRUCTURE****С.И. Кучеев, А.В. Полунина  
S.I. Kucheev, A.V. Polunina***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.* Описан эффект «памяти» ориентации нематика в структуре монокристаллический кремний/нематик/электрод, имеющий место при отрицательном смещении структуры относительно кремния. Эффект обусловлен переориентацией директора на поверхности кремния в гомеотропное состояние при действии записывающего напряжения и сохранении в этом состоянии продолжительное время без внешнего поля. Показана определяющая роль примесей (не установленной природы) в нематике как собственных, так и привнесённых извне, для реализации эффекта «памяти».

*Resume.* The effect of "memory" of the nematic orientation in a single-crystal silicon / nematic / electrode structure, which occurs when there is a negative bias relative to the silicon substrate is described. The effect is due to the reorientation of the director on the silicon surface into a homeotropic state by the action of the recording voltage and maintaining in this state for a long time without an external field. The determining role of impurities (non-determined nature) in a nematic both own and introduced for the implementation of the "memory" effect is shown.

*Ключевые слова:* нематик, бистабильность, электрооптический эффект, МДП структура.

*Key words:* nematic, bistability, electrooptic effect, MIS structure

**Введение**

Нематические жидкие кристаллы благодаря электрически управляемому двулучепреломлению [1] находят применение в приборах отображения и обработки оптической информации [2]. В моностабильных приборах модуляция волнового фронта света осуществляется при переориентации молекул из исходного состояния ориентации, которое задается обычно жесткими [1] условиями на поверхностях, в состояние заданное действием электрического поля. После выключения электрического поля, вследствие упругих свойств, нематик возвращается в исходное состояние ориентации. В бистабильных жк приборах функционирование основывается на переключении ориентации между двумя (или более [3]) стабильными состояниями, которые сохраняются длительное время (режим «памяти») без внешнего электрического поля и являются, соответственно, энергонезависимыми. Бистабильность, в большинстве описанных случаях, достигается за счет организации топологически разных пространственных распределений директора, которые не могут самопроизвольно переходить друг в друга [4, 5]. Другим вариантом достижения бистабильности является создание управляемых граничных условий на поверхности. Принимая во внимание ряд преимуществ бистабильного переключения ориентации нематика над моностабильным, как например, возможность использовать пассивную адресацию пикселей вместо активно-матричной, поиск эффективного управления ориентацией директора за счет поверхности остается актуальной задачей. В предлагаемой работе показано, что в жк структуре на основе монокристаллического кремния может быть реализован по-



лярных эффект с «памятью», причина которого связана именно с изменением условий на поверхности, сохраняющимися продолжительное время.

### Эксперимент

Экспериментальная ячейка представляла собой сэндвич, в которой подложкой (нижний электрод) служил полированный монокристаллический кремний р - типа проводимости с удельным сопротивлением  $20 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Верхним электродом служила прозрачная плёнка окиси индия (ITO) с натертой пленкой полиимида, которая задает планарную ориентацию молекул жидкого кристалла. Использовался нематик 5СВ из класса цианобифенилов с положительной анизотропией диэлектрической проницаемости. Толщина слоя нематика задается калиброванной фторопластовой пленкой и составляла 5 мкм. Непосредственно перед каждой сборкой нематической ячейки поверхность кремния протравливалась плавиковой кислотой, промывалась дистиллированной водой и просушивалась интенсивным потоком воздуха. Заправка нематика в ячейку осуществляется за счет капиллярных сил с одной точки заливки.

Рис. 1 демонстрирует основные состояния ориентации нематика в упомянутой жк ячейке, поясняющие сущность эффекта «памяти». Рис. 1а соответствует исходному состоянию нематика. Хорошо видно, что ориентация нематика однородна, близка к планарной, что связано с навязыванием объему жк однородной ориентации жестким сцеплением молекул на ITO электроде с полиимидом. При включении переменного напряжения (далее тестирующее), ожидаемо видна переориентация нематика, рис. 1б, причем визуализируются неоднородности текстуры, очевидно обусловленные неоднородностями ориентации нематика непосредственно на поверхности кремния. При выключении тестирующего напряжения нематик возвращается в исходное состояние, рис. 1а. Такое поведение нематика является моностабильным.

Для перехода нематика в состояние «памяти» необходимо подать на ячейку или постоянное напряжение с отрицательной полярностью относительно кремния или переменное напряжение с постоянным отрицательным смещением (далее записывающее). Последний вариант включения «памяти» предпочтителен, т.к. в этом случае доступна не прерывная визуализация процесса перехода ориентации нематика непосредственно из исходного состояния (рис. 1б) в состояние «памяти». Минимальное смещение, при котором появляются признаки «памяти» составляет около  $-0,3 \text{ В}$  при длительности действия не менее 10 минут.

В результате действия записывающего напряжения нематик переходит в новое состояние ориентации, которое при тестировании выглядит совершенно по-другому, рис. 1с, в сравнении с моностабильным поведением (рис. 1б). В этом состоянии, неоднородности ориентации нематика уже отсутствуют, вся область «памяти» имеет один определённый интерференционный цвет, рис. 1с. Состояние «памяти» может сохраняться в широких временных пределах от нескольких минут до суток в зависимости от условий записи. Отметим, что положительное смещение относительно кремния не приводит к эффекту «памяти». На рис. 1д представлена типичная зависимость длительности режима «памяти» от величины записывающего напряжения (смещения). Видно, что время «памяти» пропорционально увеличивается с ростом величины отрицательного смещения.

Переход нематика в состояние «памяти» при действии соответствующего записывающего напряжения начинает осуществляться от границы заливки нематика в ячейку (отмечено стрелкой, рис. 1а). Ширина полосы L (рис. 1с), области нематика, где имеет место «память», с течением времени действия записывающего напряжения увеличивается, рис. 2. Такое избирательное поведение «памяти», с точки зрения локализации в ячейке, мы можем связать с (1) возможной адсорбцией некоторых примесей из жк материала на свежее травленной поверхности кремния при заправке ячейки, (2) уменьшением концентрации этих примесей на поверхности кремния вглубь ячейки, и (3) влиянием этих адсорбированных примесей на свойства поверхности кремния ориентировать молекулы жидкого кристалла в процессе протекания постоянного тока. Факт присутствия примесей в данном жк материале и их адсорбция ранее регистрировались по пороговым напряжениям светочувствительности и формирования гомеотропной ориентации в МДП структуре [6].

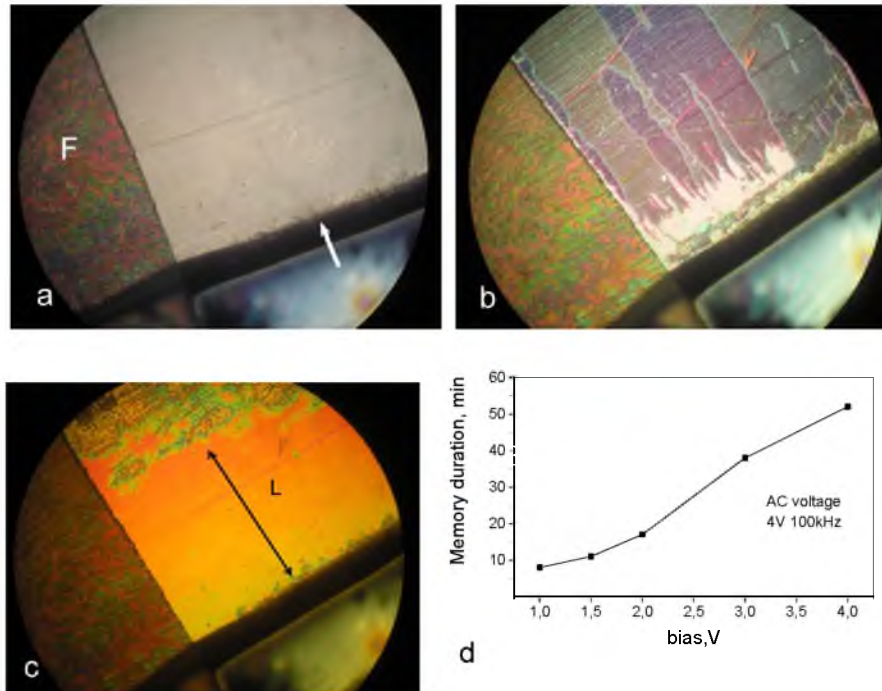


Рис. 1. Эффект «памяти». а - Исходная ориентация нематика в ячейке ( $U=0$ ). F – фторопластовая плёнка, фиксирующая толщину слоя нематика. Стрелка указывает на границу, где нематик вводится в ячейку. б - Переориентированный нематик тестирующим напряжением  $U=4$  В, 100 кГц. Моностабильный режим. с - Нематик в режиме «памяти» после действия смещения  $-3$ В (тестирующее напряжение  $U=4$  В, 100 кГц). d - Типичная зависимость времени эффекта «памяти» от величины смещения (время записи каждой точки 1 мин.)

Fig. 1. "Memory" effect. a - The initial orientation of nematic in the cell ( $U = 0$ ). F - plastic film fixes the thickness of cell. The arrow indicates the boundary where nematic is introduced into the cell. b - The nematic reoriented by the testing voltage  $U = 4$  V 100 kHz. Monostable mode. c - nematic in "memory" mode after a  $-3$ V bias action (the testing voltage  $U = 4$  V, 100 kHz). d - Typical dependence of the "memory" effect duration on bias (the recording time for each point is 1 min.)

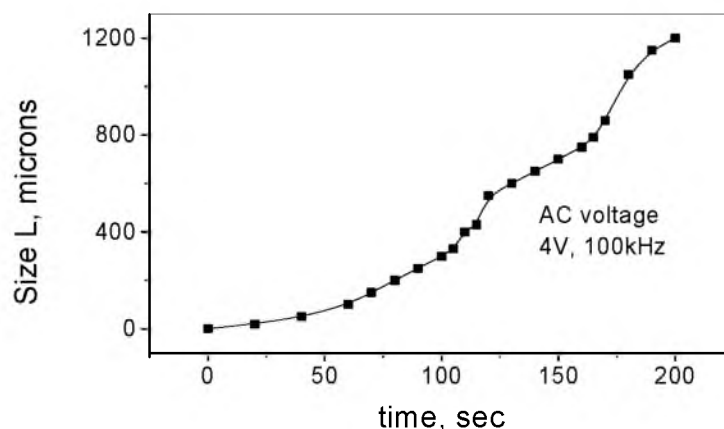


Рис. 2. Зависимость размера области «памяти» L от времени действия записывающего напряжения (смещение  $-1$ В)

Fig. 2. Dependence of the area size L of the "memory" on the time of action of the recording voltage ( $-1$ V of bias)

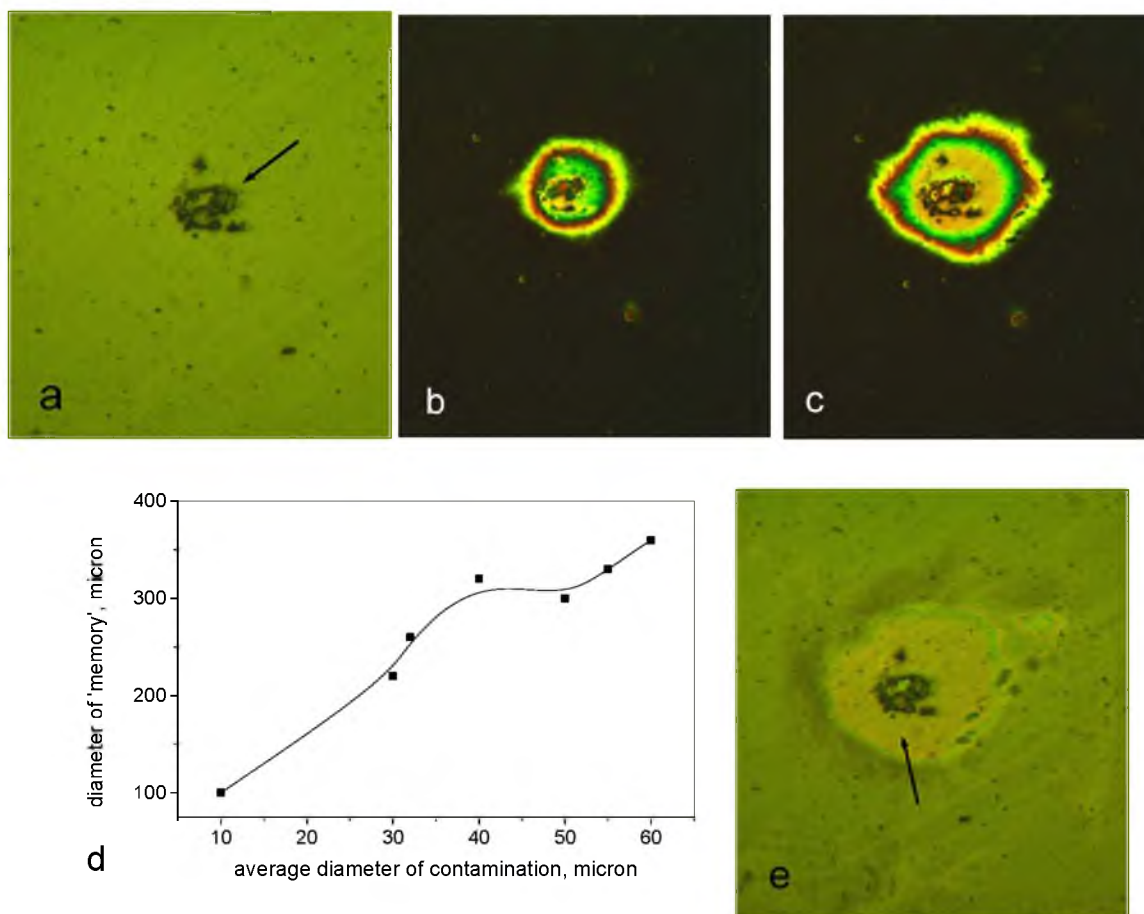


Рис. 3. Эффект «памяти» в окрестности локального загрязнения на поверхности кремния.  
 а - Исходная ориентация нематика ( $U=0$ ). Стрелка - загрязнение поверхности кремния, соответствующее месту высохшей капли воды. (b, c) - Длительность записывающего напряжения (4 В, смещение – 0.5 В, частота 100 кГц), минуты: b- 3, c- 8. d - Зависимость размера (средний диаметр) участка с эффектом «памяти» от среднего диаметра загрязнения, соответствующего высохшей капли. Время действия записывающего напряжения 400 секунд. e – Нематик в окрестности загрязнения в состоянии «памяти» ( $U=0$ ). Стрелка указывает на гомеотропную ориентацию нематика на поверхности кремния

Fig. 3. "Memory" effect in the vicinity of local contamination on the silicon surface. a - Initial orientation of nematic ( $U = 0$ ). Arrow - contamination of the silicon surface corresponding to the place of dried water droplet. (b, c) - The duration of the recording voltage (4V, bias - 0.5 V, 100 kHz), minutes: b- 3, c- 8. d - size dependence of area with the effect of "memory" (mean diameter) on the average diameter of contamination corresponding to the dried droplets. Duration of the recording voltage of 400 seconds. e - Nematic in the "memory" mode in the vicinity of contamination ( $U = 0$ ). The arrow points on a homeotropic orientation on the silicon surface

На важную роль в реализации эффекта «памяти» адсорбируемых примесей указывают также результаты следующего эксперимента, в котором примеси не являются собственными, т.е. не принадлежат изначально жк материалу, а привносятся извне. После травления в HF и прополаскивания дистиллированной водой, поверхность кремния не обдувалась потоком воздуха. Это приводит к высыханию отдельных капель воды непосредственно на поверхности кремния. Загрязнения на поверхности кремния при подобном высыхании стягиваются в центры соответствующих капель и остаются на поверхности. В нематической ячейке, эти центры загрязнений, вследствие диффузии, становятся источниками примесей, которые адсорбируются в окрестности этих капель, причем концентрация примесей естественным образом уменьшается с увеличением расстояния от центра высохших капель. В таких ячейках было установлено, что участки «памяти» в первую очередь начинают формироваться в окрестности высохших капель, рис. 3, при этом размеры участков увеличиваются с увеличением времени действия записывающего напряжения. Прослеживается четкая корреляция между видимыми размерами загрязнений на поверхности кремния (рис. 3а) с размерами участков с «памятью» в ячейке после подачи записывающего напряжения, рис. 3. Вид-



но, что чем больше средний диаметр локального загрязнения на подложке, тем больше размер участка нематика, который переходит в состояние «памяти». Это косвенно согласуется с предположением, что чем больше загрязнение, тем большее количество примесей переходит в жк материал, и, в свою очередь, адсорбируется на поверхности кремния. Таким образом, необходимым условием реализации эффекта «памяти» является наличие примесей на поверхности, запускающих при действии отрицательного смещения механизм перехода директора на поверхности кремния в гомеотропное состояние. Формирование гомеотропной ориентации в окрестности высохших капель после действия записывающего напряжения убедительно регистрируется в поляризованном свете, рис. 3е.

### Выводы

В ходе выполнения работы было установлено следующее. Действие постоянного смещения с отрицательной полярностью относительно кремния в структуре Si/5CB/ITO приводит к переходу директора на поверхности кремния из исходного стабильного состояния ориентации в гомеотропное, причем последняя сохраняется продолжительное время. Длительность эффекта «памяти» зависит как от величины смещения, так и от продолжительности его действия. Необходимыми условиями для реализации эффекта «памяти» являются (1) свежее травленная HF поверхность кремния и (2) присутствие примесей (пока не установленной природы) как собственных, т.е. изначально принадлежащих жк материалу так и внесенных извне. Принимая во внимание, что длительность эффекта памяти значительно превышает максвелловское время релаксации ионного заряда в жк материале, механизм эффекта «памяти» не связывается с процессами накопления и релаксации зарядовой подсистемы. По всей видимости, в основе механизма лежит процесс электроочистки поверхности кремния, в котором играют роль дополнительные ионы, происхождение которых связано с адсорбированными на поверхности кремния примесями.

### Список литературы References

1. Блинов Л.М. 1978. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука: 384.  
Blinov L.M. 1978. Electro and magneto-optics of liquid crystal. M.: Nauka: 384.
2. Yang D.K., Wu S.T. 2006. Fundamentals of Liquid Crystal Devices John Wiley&Sons, Ltd. : 378.
3. Lee E.K., Kim J.H. 2007. Multistability of nematic liquid crystals realized on microscopic orientation patterns. Journal of Applied Physics, 102: 036102.
4. Dozov I., Nobili M., Durand G. Fast bistable nematic display using monostable surface switching. 1997. Appl. Phys. Lett., 70: 1179 -1181.
5. Barberi R., Giocondo M., Durand G. Flexoelectrically controlled surface bistable switching in nematic liquid crystals. 1992. Appl. Phys. Lett., 60: 1085 -1086.
6. Захвалинский В.С., Кучеев С.И., Межаков Н.Н., Перервенко Э.О., Пилук Е.А. 2014. Ионная адсорбция и ориентация нематика на карбиде кремния в нематической ячейке. Научные ведомости БелГУ, Серия Математика. Физика, 25(196), вып.37: 138-142.  
Zahvalinski V.S., Kucheev S.I., Mezhaikov N.N., Perervenko E.O., Piluk E.A. 2014. The ionic adsorption and the orientation of the nematic on the silicon carbide in the nematic cell. Belgorod State University Scientific Bulletin, Mathematics & Physics, 25 (196), issue 37: 138-142.