

06:09

Пространственно-периодическая деформация нематика, обусловленная потоками в окрестности микроконтакта в несимметричной ячейке

© С.И. Кучеев, Н.В. Малай, Е.И. Омельченко, Ю.С. Тучина

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

Поступило в Редакцию 14 марта 2013 г.

Впервые экспериментально установлено, что в гомеотропно ориентированном нематическом жидком кристалле 5СВ в окрестности микроконтакта формируется стационарная пространственно-периодическая деформация поля директора с электрически управляемым периодом. Периодичность распределения директора объясняется его ориентацией встречными потоками нематика и волнообразным профилем пограничного слоя.

Жидкие кристаллы (ЖК), обладая электрически управляемым двулучепреломлением, позволяют амплитудно или (и) фазово модулировать свет [1]. Это свойство ЖК широко используется в электрооптических приборах [2]. Существенным недостатком ЖК приборов дифракционного типа (ЖК решетки, ЖК лазеры, приборы сканирования лазерным лучом и т.п.) является фиксированная пространственная периодичность поля директора, не позволяющая эффективно перестраивать параметры таких приборов. Периодичность поля директора обычно задается рисунком электродов или „рисунком“ исходной ориентации ЖК (благодаря соответствующей обработке поверхности), условиями рефрактивного эффекта, присущей данному типу ЖК материала периодичностью распределения поля директора (холестерические ЖК) [2]. Для расширения функциональных возможностей дифракционных ЖК приборов представляет особый интерес ЖК структуры и реализуемые эффекты в ЖК, когда пространственная периодичность директора была бы электрически управляемой и носила бы самоорганизованный характер. Хорошо известны электрооптические эффекты, в которых пространственная периодичность поля директора формируется именно

самоорганизованным образом, например, благодаря электроконвективным потокам ЖК вещества (домены Капустина–Вильямса) или флексо-электричеству [1]. Однако практического применения вышеупомянутые эффекты не нашли или потому, что шаг периодичности практически не зависит от внешних управляющих параметров (например напряжения), или из-за специфических требований к пространственной форме молекул ЖК. В предлагаемой работе показано, что стационарное периодическое распределение директора самоорганизованно формируется в слое ЖК в окрестности микроконтакта под действием потоков ЖК материала, при этом шаг периодичности зависит от приложенного напряжения. Отметим, что публикации, касающиеся исследований эффектов переориентации нематика в окрестности дефектов диэлектрических пленок (микроконтакты к слою ЖК), появились сравнительно давно [3–5], однако, по сведению авторов, каких-либо упоминаний о наблюдении или описании периодического характера деформации нематика в такой геометрии ЖК ячеек в литературе нет.

Эксперименты проводились с ЖК ячейками (сечение на вставке, рис. 1, *a*) толщиной 5–100 μm , в которых подложкой (1) служили образцы монокристаллического кремния *n*- и *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением 4.5 $\Omega \cdot \text{cm}$ с изолирующей пленкой окиси кремния (2) толщиной 300–350 μm . Участки (3) не окисленной поверхности кремния (дефекты пленки SiO_2) размерами 5–10 μm выполняли роль микроконтактов к слою ЖК. Гомеотропная ориентация нематического ЖК 5СВ задавалась обработкой поверхности пленки SiO_2 и поверхности (4) плоского электрода In_2O_3 (ИТО) раствором лецитина в толуоле. Наблюдение проводилось в поляризационный микроскоп при комнатной температуре.

Деформация ориентированного нематика в окрестности микроконтакта при действии постоянного напряжения с отрицательной полярностью относительно кремниевой подложки в ячейках вышеуказанного диапазона толщин проявляет общие закономерности. Рассмотрим эти закономерности. На рис. 1 представлены типичные микрофотографии, отображающие изменения поляризационной картины, происходящие в окрестности микроконтакта при увеличении напряжения. Эти изменения заключаются в появлении при некотором пороговом напряжении (последнее в основном зависит от размеров микроконтакта) светлой кольцевой полосы (рис. 1, *a*) на некотором удалении от

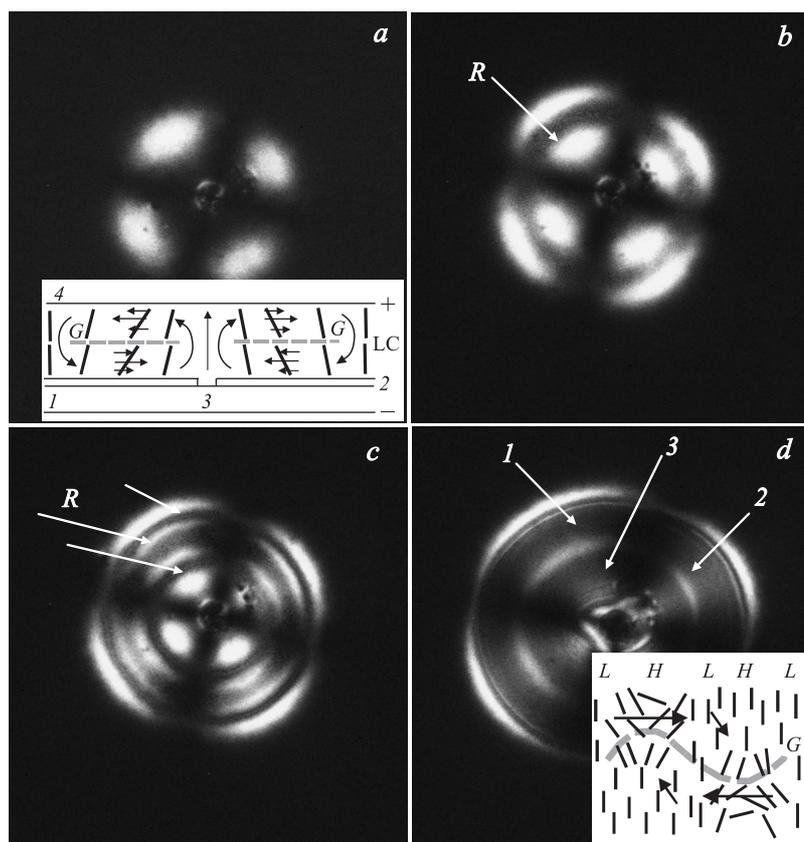


Рис. 1. Микрофотографии области деформации гомеотропно ориентированного нематика в окрестности микроконтакта. Напряжение, V : $a - 4$, $b - 4.4$, $c - 4.7$, $d - 7.3$. Толщина ЖК слоя $50 \mu\text{m}$. Вставки схематическая картина деформации поля директора в случае плоского (a) и волнообразного (d) профиля пограничного слоя G (пунктирная линия); H , L — области ЖК с максимальным и минимальным значением показателя преломления соответственно.

центра (ось микроконтакт–электрод ИТО), а далее интерференционных кольцевых полос (между красными (R) интерференционными кольцами, рис. 1, b, c), которые делятся (в каждом акте деления на две новые

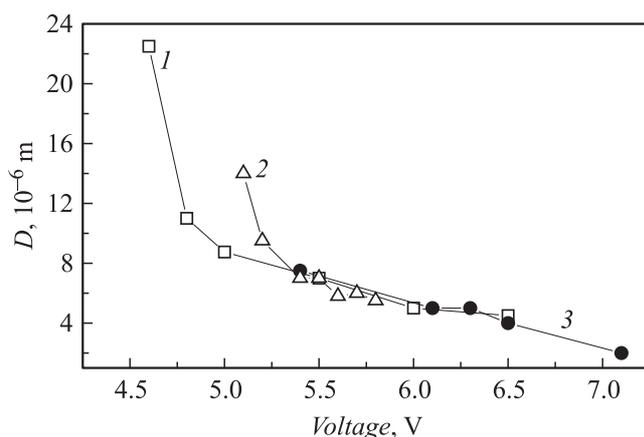


Рис. 2. Зависимость средней ширины интерференционной полосы D от напряжения, приложенного к ячейке. Толщина ЖК слоя, μm : 1 — 100, 2 — 50, 3 — 20.

полосы), становятся тоньше по ширине и плотно упаковываются при этом друг к другу в два кольцевых образования 1, 3 с равным количеством дифракционных полос в каждом и светлой кольцевой областью 2 между этими образованиями (рис. 1, d). На рис. 2 приведены кривые зависимости средней ширины интерференционной полосы D в первом кольцевом образовании для разных толщин ЖК слоя. Хорошо видно, что ширина интерференционной полосы существенно зависит от приложенного напряжения, при этом обращает на себя внимание факт, что D , начиная с некоторого напряжения, практически не зависит от толщины ЖК слоя.

Исследование движения микрочастиц, взвешенных в ЖК, показало, что они перемещаются в радиальном направлении от центра к периферийным участкам области деформации нематика и обратно, т.е. циркулярным образом, пересекая при этом вышеуказанные кольцевые образования (1, 2, 3, рис. 1, d), иногда заходя за границу области деформации нематика на расстояние 20–30 μm . Отметим, что деформация нематика в виде кольцевых образований 1, 3 и 2 стационарная (за исключением центральной области в непосредственной близости к микроконтакту).

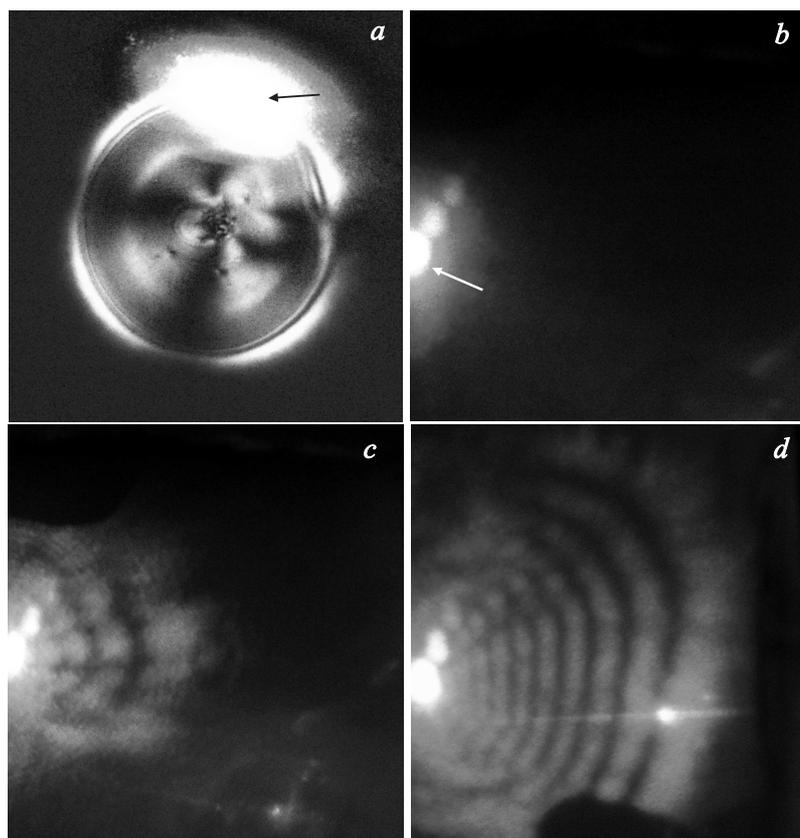


Рис. 3. *a* — микрофотография области деформации нематика с пятном лазерного излучения (стрелка), локализованным на первой группе кольцевых интерференционных полос. *b, c, d* — изображение области деформации нематика на экране в расходящемся лазерном луче света. Стрелка *b* отмечает пятно расфокусированного лазерного луча на экране. Напряжение, V : *a* — 8, *b* — 0, *c* — 5.2, *d* — 8. Толщина ЖК слоя $50 \mu\text{m}$.

На рис. 3, *b–d* представлены типичные изображения деформированного нематика, которые наблюдаются на экране в расходящемся лазерном луче, отраженном от ЖК ячейки. Хорошо видно, что при-

жатые друг к другу кольцевые интерференционные полосы, на которые проецируется пятно расходящегося лазерного луча (стрелка, рис. 3, *a*), отображаются на экране в виде чередующихся светлых и темных полос, количество и ширина которых увеличивается при увеличении напряжения (рис. 3, *b, c, d*). Отметим значительное отклонение от оптической оси лучей света, которые формируют эти светлые полосы на экране, по сравнению с отклонением лазерных лучей света при расфокусировке их линзой в случае отсутствия деформации нематика ($U = 0$, рис. 3, *b*). Сравним вышепредставленные оптические картины с оптической картиной проявления эффекта Капустина–Вильямса [1]. В этом эффекте электроконвективные пространственно-периодические потоки ЖК вещества между двумя плоскими электродами ориентируют директор, формируя в пространстве домены с соответствующим периодическим распределением показателя преломления. Домены при их освещении демонстрируют свойства линз, формируя изображение в виде чередующихся светлых и темных полос. Из подобного сравнения можно сделать вывод, что в нашем случае каждая в отдельности область деформированного нематика, которая наблюдается в виде отдельной кольцевой интерференционной полосы и формирует на экране светлую полосу, обладает свойствами линзы. Следовательно, в такой области ЖК должно иметь место изменение показателя преломления в некотором диапазоне от минимального (L) (не сильное отклонение директора от исходной ориентации) до максимального значения (H) (в некотором объеме ЖК директор близок к горизонтали). В итоге вся область деформации нематика, состоящая из кольцевых образований (1, 3 и 2, рис. 1, *d*), может быть представлена как область с некоторым пространственно-периодическим распределением поля директора.

Вышеизложенное позволяет качественно представить картину возникновения периодической деформации нематика в окрестности микроконтакта. Ионный ток, текущий от микроконтакта к электроду ИТО, увлекает в движение вещество жидкого кристалла в том же направлении. При начальных напряжениях устанавливается замкнутый ламинарный поток ЖК от центра вдоль поверхности электрода ИТО и возврат ЖК обратно к центру вдоль поверхности пленки SiO_2 (вставка, рис. 1, *a*). Пограничный слой G в объеме ЖК слоя, где относительная скорость встречных потоков равна нулю, по всей видимости, первоначально плоский (вставка, рис. 1, *a*). В этом случае просветление гомеотропно ориентированного нематика (рис. 1, *a*) объясняется ориентацией ди-

ректора потоками ЖК вещества [6], при этом директор отклоняется от вертикали (вставка, рис. 1, *a*). С увеличением скорости встречных потоков ЖК вещества (при увеличении напряжения) пограничный слой G , по всей видимости, теряет устойчивость и деформируется, приобретая некоторую волнообразную форму (вставка, рис. 1, *b*). Отметим, что неустойчивость пограничного слоя на границе встречных потоков в разных средах — достаточно распространенное явление. В таких случаях наблюдаются волнообразные неустойчивости среды (например, эффект колебания флага, появление ряби на поверхности воды, волнообразный профиль течений в жидкостях и т.д.) [7].

Вследствие волнообразного профиля пограничного слоя G скорости потоков (стрелки, вставка на рис. 1, *b*) периодически меняются в пространстве как по величине, так и по направлению. Из-за эффекта ориентации директора потоками возникают его соответствующее пространственно-периодическое распределение (вставка на рис. 1, *b*) и периодическое изменение показателя преломления. Увеличение интенсивности потоков ЖК вещества (при дальнейшем увеличении напряжения) сопровождается увеличением пространственной частоты волнового профиля пограничного слоя G . Размер локальной области ЖК, демонстрирующей свойства линзы, становится меньше, что эквивалентно увеличению фокусной силы такой линзы. Это в свою очередь сопровождается формированием изображения соответствующей светлой полосы на экране (рис. 2, *c, d*). Именно по причине недостаточной фокусной силы области деформации нематика, которые содержат не более 2–3-х интерференционных полос (например, область деформации, отображенной на рис. 1, *c*, или деформация нематика в тонких ячейках толщиной 5–10 μm , в которых турбулентное движение ЖК материала не позволяет получить большего числа интерференционных полос), не формируют на экране светлые полосы.

Таким образом, экспериментально показано, что деформация поля директора в окрестности микроконтакта имеет стационарное пространственно-периодическое распределение, которое формируется за счет неустойчивости пограничного слоя между встречными потоками ЖК материала, причем потоки вызваны локальным ионным током, протекающим между микроконтактом и плоским электродом. Необходимо отметить, что минимальный размер периода электрически управляемой деформации поля директора, достигнутый в работе, сравним (и даже меньше) со стандартными размерами пикселей электрически управля-

емых коммерческих модуляторов света (например [8,9]), выполненных по технологии LCoS (ЖК на кремнии), которые широко используются в приборах обработки оптической информации. Такое сравнение показывает перспективность получения периодического распределения директора, носящего самоорганизованный характер, в предлагаемой геометрии ЖК ячейки.

Список литературы

- [1] *Блинов Л.М.* Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978. С. 384.
- [2] *Yang D.K., Wu S.T.* Fundamentals of Liquid Crystal Devices. 2006. John Wiley&Sons, Ltd. P. 378.
- [3] *Zakzouk A.K.M.* // J. Electrochem. Soc. 1980. V. 127. N 4. P. 932–937.
- [4] *Невская Г.Е., Рубцов А. Е.* // Микроэлектроника. 1987. Т. 45. С. 74–80.
- [5] *Gritsenko N.I., Kucheev S.I., Moshel N.V.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1990. V. 193. P. 43–46.
- [6] *Forster D.* // Phys. Rev. Lett. 1974. V. 32. N 21. P. 1161–1164.
- [7] *Ламб Г.* Гидродинамика. М., 1947. С. 928.
- [8] *Duran V., Clemente P., Matinez-Leon L.I., Climent V., Lancis J.* // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2009. V. 11. P. 085 403.
- [9] *Sakakura V., Sawano T., Shimotsuma Ya., Miura K., Hirao K.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2009. V. 48. P. 126 507.