



УДК 620.1.72:532.783

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПОТОКА НЕМАТИКА В ОКРЕСТНОСТИ ДЕФЕКТА ДИЭЛЕКТРИКА В СТРУКТУРЕ Si/SiO₂/НЕМАТИК/ЭЛЕКТРОД

С.И. Кучеев, Н.В. Малай, Ю.С. Тучина

Белгородский государственный университет,
ул. Победы 85, Белгород, 308015, Россия, e-mail: skucheev@yahoo.com

Аннотация. Исследуется поведение нематического жидкого кристалла в окрестности дефекта диэлектрической пленки в структуре Si/SiO₂/нематик/электрод в постоянном электрическом поле. Показано, что поток жк материала в окрестности дефекта, обусловленный ионным током, вызывает изменение ориентации ориентированного нематика, и визуализируется в поляризованном свете в виде концентрических интерференционных колец с крестообразным полем погашения света.

Ключевые слова: дефект SiO₂, нематик, периодическая деформация, микронасос.

Основным базовым элементом кремниевых приборов является структура Si/SiO₂ благодаря уникальным электрическим свойствам границы [1]. При этом, некоторые типы дефектов SiO₂ указанной структуры, например, микроскопические участки не окисленной поверхности кремния, при условии их низкой концентрации на поверхности, представляют собой значительные трудности при обнаружении их высокоразрешающими методами контроля, такими как, например, растровая электронная и атомная силовая микроскопии. Поэтому требуются более простые экспресс-методы предварительного картирования поверхности, когда на сравнительно большой площади исследуемой поверхности, фактически методами низкого разрешения (оптическая микроскопия) локализуются дефекты пленки SiO₂ для дальнейшего изучения высокоразрешающими методами. В качестве одного из таких методов картирования может рассматриваться метод основанный на электрооптических свойствах жидких кристаллов (жк). Благодаря вязко упругим свойствам жк материалов, локальные возмущения, обусловленные микроскопическими дефектами (или другими локальными причинами) сопровождаются изменением ориентации молекул жк в большем масштабе, и вследствие двулучепреломления, могут быть оптически зарегистрированы, т.е. другими словами, реализуется принцип «оптического усиления». Для дефектов тина не окисленной поверхности, возмущающими жк факторами могут служить неоднородное электрическое поле в окрестности не изолированной диэлектриком поверхности кремния и (или) локальный сквозной ионный ток через слой жк, формирующийся благодаря инжекции электронов [2].

В ряде работ было показано, что деформация нематика в окрестности дефектов диэлектрической пленки имеет место только при отрицательной полярности приложенного к ячейке напряжения относительно кремниевой подложки. При этом в основу предложенных моделей поведения жк в области деформации были положены эффект динамического рассеяния света [3], нолевые эффекты обусловленные накоплением ионного заряда [4], флексоэлектрический эффект [5]. В настоящем сообщении мы указываем, что сквозной локальный ионный ток, протекающий через слой жк, приводит к деформации ориентированного нематика благодаря ориентации молекул жк в потоке.

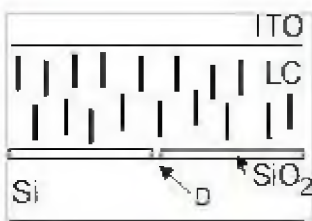


Рис. 1. Сечение жк ячейки (не в масштабе).
D — дефект диэлектрической пленки SiO₂ на Si.

На рис. 1 схематически представлено сечение жк ячейки использованной в работе. В качестве подложки использовался монокристаллический кремний р-типа проводимости (удельное сопротивление 4,5 Ом·см) с пленкой окиси кремния SiO₂ толщиной 350 нм. Гомеотропная ориентация нематического жидкого кристалла 5СВ (Монокристаллреактив, Харьков) достигалась обработкой раствором лецитина в толуоле обеих поверхностей прозрачного электрода ITO и диэлектрической пленки SiO₂. Толщина жк слоя варьировалась в пределах 5-100 нм с помощью фторопластовых прокладок. Наблюдение проводилось в поляризационный микроскоп со скрещенными поляризаторами.

Деформация нематика, при действии соответствующей величины напряжения, начинает регистрироваться в виде светлой кольцевой полосы с крестообразным полем погашения, рис. 2а. «Крест» гашения света связан с поглощением света поляризаторами. Он показывает, что распределение ориентации молекул аксиально симметричное с осью, проходящей через дефект, при этом изменение ориентации молекул лежат в плоскостях, перпендикулярных плоскости ячейки.

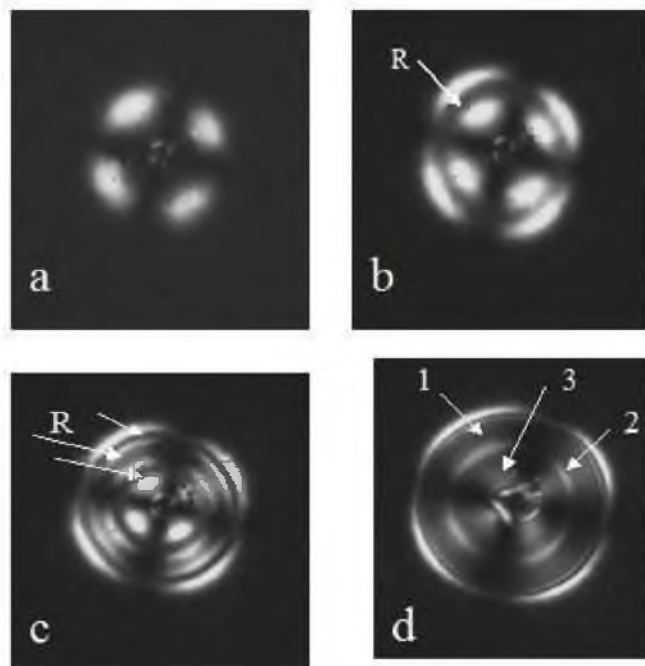


Рис. 2. Деформация нематика в окрестности дефекта. R-красное интерференционное кольцо. Напряжение, В: а – 4; б – 4,4; с – 4,7; д – 7,3. Толщина жк слоя 50 нм.



Обращает внимание на себя факт, что кольцевая деформация локализована на заметном удалении от самого дефекта, который расположен в центре области деформации. Последнее косвенно указывает на не определяющую роль электрического поля в механизме описываемого электрооптического эффекта. Согласно геометрии ячейки, рис. 1, электрическое поле максимально в центре и начальное просветление поля зрения ожидалось бы также ближе к центру.

На начальных стадиях деформации, рис. 2а, светлое кольцо не имеет цветной окраски, которая является признаком интерференции поляризованного света. Окрашенные интерференционные кольца появляются далее с увеличением напряжения, рис. 2 b-d. Сначала появляется одно кольцо (R), месторасположение которого также удалено от оси симметрии (дефекта), рис. 2b, а затем, в процессе деления этого кольца и последующих, в конечном итоге, в результате уплотнения колец друг к другу, формируются два кольцевых образования (1,3) с узкой светлой кольцевой полосой между ними (2), рис. 2d. В кольцевых образованиях 1 и 2 содержится равное число интерференционных колец, а ход порядка интерференционных цветов относительно центральной светлой кольцевой полосы (2), противоположный. Уместно сравнить последовательность расположения интерференционных цветов в кольцевом образовании (например, в 1-м от периферии к центру) с последовательностью изменения интерференционной окраски в классической ячейке с прозрачными электродами при В-эффекте [2]. Хорошо известно, что при реализации В-эффекта, при пороговом напряжении, наблюдается смена темного поля, которое обусловлено исходной гомеотропной ориентацией нематика, на светлое, а только потом (при увеличении напряжения) появляются чередующиеся друг за другом интерференционные цвета поля зрения. По всей видимости, при начальном не значительном отклонении директора от нормали, не выполняются условия интерференции между обычным и необыкновенным лучами, возможно, вследствие нарушения пространственной когерентности, и первый интерференционный цвет, для которого начинают выполняться условия интерференции, является красный. В нашем случае, первое интерференционное кольцо (R) также имеет красный цвет. Отметим, светлая каемка (не цветная), по периферии деформированной области нематика, так и остается не цветной при любом действующем напряжении, и может рассматриваться аналогом перехода от темного поля к светлому при В-эффекте. Таким образом, распределение цветных интерференционных колец представляет собой, своего рода, развертку в плоскости ячейки последовательности интерференционных цветов, имеющих место при В-эффекте. При этом роль электрического поля (для В-эффекта), как показано ниже, выполняет поток жк материала.

Измерения ширины интерференционных колец, проведенные в ячейках с разной толщиной жк слоя (10-100 мкм) (для 5 мкм ячеек эффекты гидродинамической неустойчивости не позволяют получить приемлемое количество интерференционных колец) показывают, что в некотором диапазоне напряжений, их ширина, практически, не зависит от толщины ячейки и является только функцией приложенного напряжения.

Поворот ячейки на любой угол (0-360 °) вокруг оси, перпендикулярной плоскости ячейки, не сопровождается изменением цвета интерференционных колец. Это подтверждает вышесказанное, что изменение ориентации молекул жк происходит в плоскостях перпендикулярных плоскости ячейки, т.е. изменяются полярные углы молекул, но не азимутальные.

Вышепредставленные экспериментальные факты позволяют предложить модель деформации ориентированного нематика в окрестности дефекта диэлектрика. При прикладывании напряжения к жк ячейке, через слой жк от дефекта (D) к электроду ИТО течет ионный ток j (рис. 3), который вовлекает в движение вещество жидкого кристалла в том же направлении.

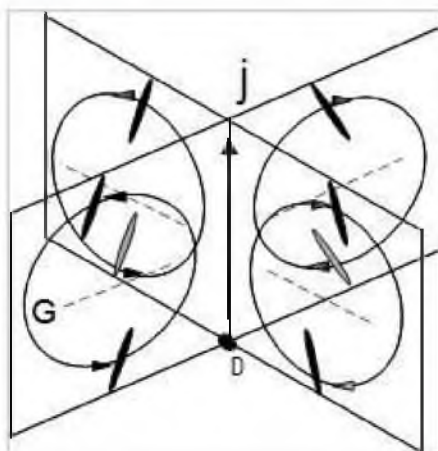


Рис. 3. Ориентация (отклонение от нормали) молекул в потоках жк материала. D – дефект пленки SiO_2 . j – сквозной ионный ток в жк слое от катода (поверхность не окисленного участка кремния (D) к аноду (поверхность электрода ИТО (не показана))). G – пограничный слой.

Другими словами, ионный ток можно рассматривать своего рода микронасосом, перекачивающим жк материал, интенсивность перекачки которого управляется напряжением. При малых напряжениях устанавливается замкнутый ламинарный поток жк материала от центра вдоль поверхности электрода ИТО и возврат жк материала обратно к центру (D) вдоль поверхности пленки SiO_2 окиси кремния (рис. 3). Пограничный слой G в объеме жк слоя, где относительная скорость этих встречных потоков равна нулю, но всей видимости, первоначально плоский. В такой ситуации просветление гомеотропно ориентированного нематика (рис. 2a) объясняется ориентацией директора в потоке жк вещества [5] (рис. 3). У верхнего электрода молекулы отклоняются от центра, а у нижней поверхности SiO_2 – к центру в радиальном направлении (рис. 3). При увеличении напряжения, пограничный слой G теряет устойчивость, превращаясь из плоского в периодически деформированный, навязывая соответствующую периодическую ориентацию нематика (рис. 2d). Необходимо заметить, что принятие пограничным слоем волнообразного профиля – довольно широко распространенное явление на границе встречных потоков в разных средах [6].

Исследование движения микрочастиц, взвешенных в жк, действительно показывает, что они перемещаются циркулярным образом от центра, где расположен дефект, к периферии и обратно в радиальном направлении, пересекая при этом выше указанные кольцевые образования (1, 2, 3, рис. 2d), иногда заходя за границу деформированной области нематика (в область гомеотропной ориентации) на расстояние 20-30 мкм.

В заключении необходимо отметить два обстоятельства. Первое касается существенного ограничения при использовании выше описанного электрооптического эффекта для регистрации дефектов пленки SiO_2 , а второе – применение в дифракционной оптике. Принимая во внимание, что переориентация нематика в окрестности дефекта пленки обусловлена ионным током и существенно определяется величиной этого тока, наличие вскрытых окон в окисле, имеющих значительно большую площадь, чем площадь дефектов, в значительной мере, может снизить токи непосредственно через микроскопические дефекты, вплоть до не возможности реализации деформации нематика. Другими словами, дефекты пленки могут быть в наличии, но не визуализироваться, т.к. основная доля ионного тока будет протекать через участки



ячейки со вскрытыми окнами в окисле. И второе – минимальный размер периода электрически управляемой деформации нематика, достигнутый в работе, сравним (и даже меньше) со стандартными размерами пикселей электрически управляемых коммерческих модуляторов света (например [7, 8]), выполненных по технологии LCoS (жк на кремний). Такое сравнение показывает потенциальную перспективность получения периодического распределения директора, основанное на самоорганизованном эффекте волнообразного распределения директора возникающем при потере устойчивости пограничного слоя между потоками жк вещества в предлагаемой геометрии жк ячейки.

Литература

1. Muller R., Kamins T. Device electronics for integrated circuits / New York: Wiley, 1986.
2. Блинов Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов / М.: Наука, 1978. – 384 с.
3. Zakzouk A.K.M. Time dependent MOS gate oxide defects using nematic liquid crystals // J. Electrochem. Soc. – 1980. – 127, № 4. – P.932-937.
4. Gritsenko N.I., Kucheev S.I., Moshel N.V. A model nonuniform electric field in nematic liquid crystal over a dielectric defect // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 1990. – 193. – P.43-46.
5. Невская Г.Е. Рубцов А.Е. Дефектоскопия диэлектрических пленок с помощью нематических жидких кристаллов // Микроэлектроника. – 1987. – 45. – С.74-80.
6. Forster D. Microscopic theory of flow alignment in nematic liquid crystal // Phy. Rev. Lett. – 32, № 21. – P.1161-1164.
7. Ламб Г. Гидродинамика / Москва: ИЛ, 1947.– 928 с.
8. Duran V., Clemente P., Matinez-Leon LI., Climent V., Lancis J. // J.Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2009. – 11. – P.085403.
9. Sakakura V., Sawano T., Shimotsuma Ya., Miura K., Hirao K. // Jpn. J. Appl. Phys. – 2009. – 48. – P.126507.

VISUALIZATION OF NEMATIC FLOW IN THE VICINITY OF DEFECT OF DIELECTRIC IN Si/SiO₂/NEMATIC/ELECTROD STRUCTURE

S.I. Kucheev, N.V. Malai, Yu. S. Tuchina

Belgorod State University,
Pobedy St., 85, Belgorod, 308015, Russia, e-mail: skucheev@yahoo.com

Abstract. Behavior of homeotropically oriented nematic liquid crystal (5CB, Single Crystal Institute, Kharkiv, Ukraine) in the vicinity of defect in SiO₂ dielectric film at Si/SiO₂/nematic/electrode structure under the direct voltage action is investigated. It is shown that liquid crystal flow that is associated with through-like ion current between defect and ITO electrode causes the change of initial orientation of the nematic and it is visualized via concentric interference rings with cross-like quenching of polarized light.

Key words: SiO₂ defect, nematic, period deformation, micropump.