

диффузией атомов сурьмы в объем кристалла. Выполненные измерения слоевой концентрации носителей заряда показали, что электрическая активация примеси в этих слоях составляет 100%. Распад преципитатов и диффузия из них атомов сурьмы оставляет на их месте микропустоты. Исследования показали высокую эффективность сформированного слоя пористого кремния как геттера. Время жизни неравновесных носителей заряда в кристаллах с созданным геттером в 3-4 раза выше по сравнению с исходными значениями.

УДК 621.396:535.8

## АПЕРТУРНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ LC-МОДУЛЯТОРА В РЕЖИМЕ ПЛАНАРНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

Развин Ю.В., Потачиц В.А.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В работе приведены результаты исследования электрооптических параметров световых клапанов жидкокристаллических (LC) модуляторов оптического излучения, работающих в режиме планарного переключения (in plane switching mode – IPS).

Исследования и использование режима планарного переключения связаны прежде всего с развитием технологии TFT-LC дисплеев [1-2]. В этих работах рассмотрены вопросы влияния топологии электродов, характеристик LC на передаточные параметры IPS-дисплеев. В [2] показано, что в таких условиях могут возникать, так называемые, “суперординарные” домены в жидкокристаллическом слое. Формирование таких доменов существенно зависит от угла преднаклона LC-молекул в топологической структуре электродов. Исследование данного режима IPS в модулирующей планарно-интегрированной LC-структуре, как мы ожидаем, позволит не только детально изучить процессы развития возникающих искажений в LC-слое, но и значительно расширить функциональные возможности таких структур.

Рассмотрим следующую модель исследуемого образца LC-модулятора в виде планарной структуры с гомеотропной ориентацией молекул нематического жидкого кристалла (NLC).

Электроды анализируемой структуры направлены вдоль оси  $x$  -перпендикулярно плоскости рисунка (рис.1). Анализ проведем для NLC с положительной диэлектрической анизотропией  $\Delta\epsilon > 0$  ( $\Delta\epsilon = \epsilon_t - \epsilon_n$ ). Параметры  $\epsilon_t$  и  $\epsilon_n$  определяют диэлектрические проницаемости в направлениях параллельном и перпендикулярном направлению преимущественной ориентации жидкокристаллических молекул.

1. Челядинский А. Р., Комаров Ф.Ф. Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии. УФН. 2003. Т. 173. №8. С. 813.
2. В.И. Плебанович, А.И. Белоус, А.Р. Челядинский, В.Б. Оджаев Создание бездислокационных ионно-легированных слоев кремния. ФТТ, 2008. т.50. в.8. с. 1378-1382.
3. П.К. Садовский, А.Р. Челядинский, В.Б. Оджаев, М.И. Тарасик, А.С. Турцевич, Ю.Б. Васильев. Создание геттера в кремнии путем имплантации ионов сурьмы. ФТТ. 2013. т.55. в.6. 1071-1073.

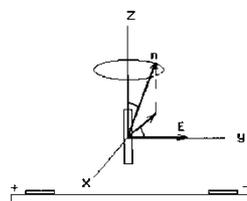


Рисунок 1 – Положение NLC-молекул в световом клапане в режиме IPS- переключения

При приложении к электродам управляющего электрического поля  $E$  межэлектродная область (апертура клапана) разбивается на два эквивалентных домена. Причиной возникновения этих доменов является различный преднаклон LC-молекул на границах клапана. Граничная область между этими доменами представляет собой стенку, определяемую параметрами перехода Фредерикса. NLC- молекулы в этой области сохраняют начальную гомеотропную ориентацию.

Ограничимся случаем малых начальных искажений, когда возникающая деформация директора LC-слоя  $n$  может быть представлена следующим образом:

$$n_x = 0 \quad n_y = \sin \varphi \approx \varphi \quad n_z = \cos \varphi \approx 1 .$$

Тогда плотность свободной энергии Франка для такого LC-слоя в одноконстантном приближении записывается в виде:

$$F = k/2[(\operatorname{div} n)^2 + (\operatorname{rot} n)^2], \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент упругости

С учетом рассматриваемой геометрии модели выражение (1) преобразуется в более простую форму:

$$F = \left(\frac{k}{2}\right) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^2 . \quad (2)$$

Поскольку LC-молекулы в пристеночной области подвержены поперечному изгибу, то в межэлектродном промежутке возникает поляризация слоя (флексоэлектрический эффект) [3]. Тогда для рассматриваемого варианта справедливо следующее определение  $F$ , учитывающее полное взаимодействие LC с электрическим полем  $E$ :

$$F = \left( \frac{k}{2} \right) \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 - e_1 \varphi \frac{d\varphi}{dy} E - \frac{\Delta \varepsilon}{8\pi} E^2 \varphi^2 \quad (3)$$

где  $e_1$ - флексоэлектрический коэффициент

Условие равновесия определяется минимумом полной энергии искажений по отношению ко всем вариациям директора LC-слоя. В границах выбранных приближений уравнение (3) после выполнения условий минимизации должно удовлетворять определением уравнения Эйлера и представляет собой линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка. Решение такого уравнения записывается в виде:

$$\varphi = C e^{-hy} \sin py \quad (4)$$

Выполненный анализ решения (4) показал, что в зависимости от параметров управляющего поля (амплитуда, частота) происходит смещение стенки, определяемой как граница между возникающими доменами. Например, если с увеличением амплитуды электрического поля  $E$  молекулы LC в правой пристеночной области увеличивают угол наклона, то в левой пристеночной области угол наклона уменьшается и стенка сдвигается в левом направлении. При изменении полярности управляющего поля движение стенки меняется на противоположное. При таком движении стенки возникают деформационные неоднородности в ориентации директора LC, приводящие к перераспределению пространственного заряда в доменных областях. Тогда согласно модели Хелфриха [4], учитывающей деформационное перераспределение пространственного заряда в пристеночной области, деформация стенки может носить квазипериодический характер.

Таким образом, начальная неустойчивость в ориентации LC-слоя в конечном итоге приводит для пристеночных молекул к развитию синусоидальных деформаций вдоль оси  $ox$ .

Выполненные экспериментальные исследования соответствовали условиям рассматриваемой модели LC-структуры. В экспериментах использовались планарные LC-ячейки (типа "сэндвич"), образованные двумя плоскими подложками, выполненными из прозрачного оптического материала. На одной из подложек формировалась топологическая структура параллельных металлических электродов. Вторая оптическая подложка проводящих покрытий не имела. Рабочие поверхности этих подложек подвергались дополнительной обработке для получения гомеотропной ориентации используемых NLC-сред. Геометри-

ческие размеры исследуемых образцов варьировались в следующих пределах: толщина LC-слоя – 5...20 мкм, ширина межэлектродного промежутка – 10...100 мкм, длина электродов – 10...20 мм. Возбуждение LC-слоя в используемых образцах осуществлялось подачей на электроды импульсного напряжения с регулируемыми амплитудно-частотными характеристиками. В данных экспериментах амплитуда управляющих импульсов изменялась в пределах 3...30 В.

Регистрация экспериментальных данных проводилась осциллографическим и микроскопическим (в поляризованном свете) методами.

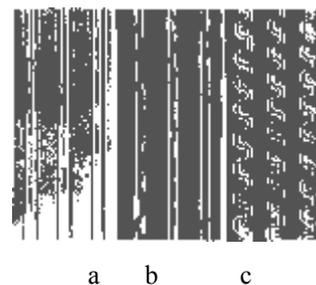


Рисунок 2 – Микрофотографии искажений LC-слоя при различных амплитудах управляющих импульсов: 5 В (а), 8 В (b) и 15 В (с)

На рис.2 представлены микрофотографии исследуемых образцов LC-модуляторов с шириной межэлектродного промежутка 10 мкм, иллюстрирующие развитие искажений в модулирующем слое в зависимости от величины управляющего поля. В данном образце управляющие электроды соединены в две группы (четные и нечетные электроды). Микрофотография 2а соответствует пороговым условиям формирования стенки и соответствующих доменов по всей длине межэлектродного промежутка. При увеличении амплитуды управляющего поля наблюдается возникновение периодического смещения стенки (микрофотография 2b). Затем при больших значениях управляющего напряжения (15 В и выше) происходит устойчивая деформация стенки квазипериодического вида. Деформационные искажения резко увеличиваются, что связано с распространением их на всю толщину LC-слоя (микрофотография 2с). Также были проанализированы частотные зависимости наблюдаемых картин в диапазоне изменения частоты управляющих импульсов 10...10<sup>4</sup> Гц.

Были выполнены эксперименты по исследованию данной структуры в режиме работы дифракционного расщепителя. На рис.3 приведены полученные зависимости эффективности возни- каемой дифракционной решетки (с учетом образования стенки) для первых двух порядков дифракции от величины управляющего напряжения. Происходит эффективная перекачка световой энергии между порядками. Также про-

исходит пространственное изменение дифракционной картины и формирование двухмерного дифракционного поля. На основе исследуемых структур был собран по матричной технологии

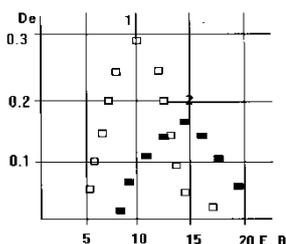


Рисунок 3 – Изменение эффективности первых двух порядков дифракции излучения на исследуемой LC-структуре

УДК 51-73

## РАЗРАБОТКА ДВУХСЕНСОРНОЙ ГАЗОВОЙ МИКРОСИСТЕМЫ НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Реутская О.Г.<sup>1</sup>, Таратын И.А.<sup>1</sup>, Хатько В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО Минский НИИ радиоматериалов, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Одним из перспективных решений, применяемых для повышения селективности газовых сенсорных систем, является создание матриц из сенсоров (мультисенсорные системы), имеющих различные физические свойства и (или) параметры чувствительного слоя. Изготовление модуля химических сенсоров на одном кремниевом кристалле (Lab-on-a-chip) является одним из перспективных направлений в развитии газовой сенсорики. Целью работы является разработка конструкции и технологии изготовления, а также исследование 2-х сенсорной газовой микросистемы на диэлектрической подложке из пористого анодного оксида алюминия. Ожидается, что мультисенсорная микросистема, выполненная с использованием диэлектрической подложки на основе нанопористого анодного оксида алюминия, устранит все отмеченные недостатки прототипов и повысит чувствительность и селективность микросистемы к детектируемым газам [1].

На рис. 1 представлена топология 2-х сенсорной газовой микросистемы. Ее отличие от ранее разработанной 4-х сенсорной микросистемы [2] состоит в размещении платиновых нагревателя и информационных электродов на разных сторонах подложки. Электроды и чувствительный слой на основе  $\text{SnO}_2+1,5\%\text{Pt}+1,5\%\text{Pd}$  на планарной стороне подложки, нагреватель в виде мандра – на обратной. Платиновые электроды для снятия сигнала с полупроводникового чувствительного слоя имеют зазор 90 мкм. Толщина платиновых электродов к чувствительному слою составляет 0,5 мкм. Ширина нагревателя

пространственный модулятор (16x16). По сравнению с обычными матричными LC-модуляторами наблюдается увеличение пороговых характеристик и уменьшение времени релаксации LC-слоя в исходное состояние.

1. Kiefer, K. In-Plane Switching of nematic liquid crystals //Pros.:Display 92.-Japan.-1992.-P.547-552.
2. Oh-e M. Principles and Characteristics of Electro-optical Behaviour with in-Plane Switching Mode //Pros.:Asia Display 95.-1995.-P.577-581.
3. De Gennes P.G. The physics of liquid crystals.-M.:World, 1977.-167с.
4. Блинов, Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов / Л.М. Блинов -М.: Наука, 1978. – 175 с.

составляет 30 мкм. Кристалл микросистемы, изготовленный на подложке нанопористого анодного оксида алюминия (пористость ~ 15 %), имеет размер - 1,25x1,25 мм и толщину - 60 мкм. Размер площадки под одним чувствительным элементом составляет 275x200 мкм. Размер перфорированных окон - 115x520 мкм. Использование в топологии микросистемы сквозных отверстий, как и использование самой нанопористой диэлектрической подложки, призвано снизить потребляемую мощность газовой микросистемы за счет уменьшения объема контактирующего с нагревателем материала подложки и уменьшения коэффициента теплопроводности алюмооксидной подложки зависящего от ее пористости [3].

При изготовлении 2-х сенсорной микросистемы использовалась, разработанная в ОАО Минский НИИ радиоматериалов инновационная технология микромеханической обработки (micro-machining) нанопористого анодного оксида алюминия, которая раньше была использована при изготовлении 4-х сенсорной микросистемы.

Изготовленные кристаллы микросистемы были разварены в 6-ти выводной металлический корпус, для проведения в дальнейшем электрофизических измерений (рис. 2).

Исследование отклика сенсоров микросистемы на активный газ проводили на экспериментальном стенде, состоящем из измерительной ячейки, системы создания и поддержания заданной газовой среды в ячейке и приборов измерения электрических сигналов. В качестве поверочных газовых смесей (ПГС) использовали