

ОРИЕНТАЦИЯ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ НА НАКЛОННО НАПЫЛЕННЫХ СЛОЯХ SiO₂ И CeO₂

© 2014 г. Л. П. Амосова*, канд. физ.-мат. наук; П. С. Парфенов*, канд. техн. наук; М. В. Исаев*

*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: l_amosova@mail.ru

Сравнивается текстура поверхности пленок оксидов кремния и церия, полученных лазерным наклонным напылением при одинаковых углах и скоростях напыления. Исследуется влияние склонности оксидов к кристаллизации на структуру и рельеф осаждаемой пленки – длину и угол наклона образующихся столбиков-кристаллитов к подложке, наличие или отсутствие гряд кристаллитов, вытянутых в направлении, перпендикулярном направлению напыления. Рассматриваются основные типы рельефа поверхности, образующиеся при наклонном напылении оксидов, и варианты ориентации жидких кристаллов с помощью этих рельефов. Показано, что главным критерием продольной или поперечной ориентации жидких кристаллов служит соотношение размеров их молекул и характерных неоднородностей рельефа поверхности, поскольку ориентация с малой площадью контакта энергетически невыгодна.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, ориентация, оксиды кремния и церия, наклонное напыление, рельеф поверхности.

Коды OCIS: 230.3720, 160.3710.

Поступила в редакцию 22.05.2014.

Введение

Жидкие кристаллы – это функциональный наноструктурированный материал, широко используемый в дисплеях, а также в других устройствах, предназначенных для передачи, обработки, отображения и хранения информации оптическими методами. Они представляют интерес как для фундаментальных, так и для прикладных научных исследований в области фотоники и оптоинформатики. Наибольшее практическое применение получили нематические жидкие кристаллы (НЖК). Они представляют собой вязкие жидкости с диэлектрическими свойствами, для которых характерен дальний ориентационный порядок и полная свобода перемещения центров тяжести отдельных молекул в пространстве. Преимущественное направление ориентации молекул НЖК можно получить в результате их межфазного взаимодействия с твердой анизотропной поверхностью, которая выравнивает молекулы вблизи поверхности вдоль определенного направления. Силы межмолекулярного взаимодействия выравнивают молекулы в объеме в том же

направлении. В результате однородной ориентации молекулярных осей в слое жидкий кристалл приобретает свойства одноосного монокристалла и становится прозрачным. Создание однородной ориентации молекул НЖК для формирования одноосного монокристалла является одним из основных технологических процессов в изготовлении всех жидкокристаллических устройств. Методы ориентации делятся на химические, механические и комбинированные и в совокупности могут обеспечивать любые начальные углы наклона директора от 0 до 90°.

Согласно классической теории жидких кристаллов (ЖК) наклонная начальная ориентация директора на гладкой поверхности означает слабое сцепление, которое характеризуется отсутствием порогов электрооптических эффектов и, как правило, большими временами упругой релаксации. При наличии ярко выраженного рельефа поверхности это не так. Сцепление, как и на гладкой поверхности, может быть, как слабым так и сильным в зависимости от сил химического взаимодействия между ЖК и ориентирующим слоем. Большинство ЖК

хорошо смачивает оксиды и фториды металлов. На этом их свойстве основан давно известный метод ориентации ЖК наклонным напылением оксидов некоторых металлов, кремния и германия [1–5]. Наименьшие углы наклона директора (меньше углов наклона кристаллитов к подложке) получаются при ориентации неполными оксидами германия и кремния и тех металлов, которые могут их иметь. Объяснение наблюдаемой тенденции к уменьшению углов наклона директора ЖК при ориентации неполными оксидами элементов по сравнению с ориентацией полными оксидами тех же элементов основывается на теории, предложенной авторами [6]. Силы Ван-дер-Вальса, преобладающие в объеме ЖК, стремятся совместить направления более легкой поляризации ЖК и ориентирующего слоя. Поляризуемость молекул ЖК с диэлектрической анизотропией $\Delta\epsilon > 0$ вдоль направления директора больше, чем в перпендикулярном направлении [7]. Поляризуемость неполного оксида в силу особенностей его матрицы, в которой атомы четырехвалентного элемента могут быть связаны не только с кислородом, но и друг с другом, всегда больше в плоскости поверхности, что способствует планарной ориентации электроположительного ЖК на гладкой поверхности и ориентации, параллельной наклону кристаллитов, на текстурированной. Для ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией, наоборот, наблюдается гомеотропная ориентация на гладкой поверхности и перпендикулярная наклону кристаллитов на текстурированной. Для полного же оксида направления легкой поляризации в плоскости подложки и перпендикулярно ей эквивалентны, что ведет к увеличению угла наклона директора для ЖК с $\Delta\epsilon > 0$ и уменьшению для ЖК с $\Delta\epsilon < 0$.

При наклонном напылении оксида на подложку за счет эффекта самозатенения на ней образуется некий рельеф, представляющий собой “щетку” из столбиков-кристаллитов, характерные размеры которых зависят от параметров напыления. К основным параметрам относят углы наклона подложки относительно источника, кинетическую энергию частиц напыляемого вещества, температуру подложки и толщину пленки. Эти параметры определяют форму и длину кристаллитов, угол их наклона относительно плоскости подложки, наличие или отсутствие перпендикулярного направлению напыления рельефа в виде гряд и бороз-

док, сформированных группами кристаллитов. При наличии поперечного рельефа ориентация ЖК определяется минимумом энергии системы ЖК – ориентирующий слой. При малых размерах кристаллитов (относительно длины молекул ЖК) уменьшается площадь контакта и делается энергетически выгодным разворот молекул в плоскости подложки на 90° , то есть ориентация не вдоль кристаллитов, а вдоль гряд кристаллитов.

Зависимости структуры рельефа наклонно напыленных пленок оксидов от температуры подложек исследовались, в основном, теоретически [8]. На практике температура подложек обычно не бывает настолько высокой, чтобы оказывать существенное влияние на кинетическую энергию осаждаемых частиц. Между тем, если температура кристаллизации вещества велика, а при низких температурах оно склонно к стеклованию, то рельеф такой пленки будет существенным образом отличаться от пленки вещества, кристаллизующегося при низкой температуре. Классическим примером таких веществ могут служить кварц и оксид церия, образующие при одних и тех же параметрах напыления существенно различающийся рельеф.

Методика эксперимента

Напыление пленок оксидов кремния и церия производилось с помощью импульсно-периодического CO_2 -лазера. Мощность излучения лазера варьировалась в пределах 10–20 Вт. Для получения более равномерного распыления материала мишени и предотвращения образования кратеров, влияющих на кинетическую энергию и направление разлета частиц, осуществлялось непрерывное сканирование лазерного луча по поверхности мишени.

Лазерный луч, обладая всеми преимуществами электронного луча, обеспечивает большую локализацию области нагрева и позволяет производить испарение при наличии в камере любых газов при большем давлении в вакуумной камере, чем электронный луч. В нашем случае давление в камере составляло порядка 1×10^{-5} мм рт. ст. В процессе напыления SiO_2 и CeO_2 давление не менялось. Подложки находились при комнатной температуре. Толщина слоев оксидов SiO_2 и CeO_2 на подложках (с учетом ее наклонного расположения) контролировалась по кварцевому датчику и составляла 250–600 Å. В этих пределах толщина практи-

чески не влияет на ориентирующие свойства пленок.

Схема установки лазерного испарения в вакууме представлена на рис. 1. Установка состоит из рабочей камеры 1, куда через входное окно из КС1 2 вводится излучение импульсно-периодического CO_2 -лазера 3. Лазерный луч, отражаясь от плоского зеркала 4, фокусируется сферическим зеркалом 5 на мишени 6. Поток испаренного вещества попадает на подложки 7. Контроль толщины слоев осуществляется кварцевым датчиком 8. Контроль давления и температуры подложек осуществляется при помощи блока автоматики 9. Аналоговые данные с датчиков блока автоматики, включая сигнал с кварцевого датчика, поступают на вход микропроцессорного контроллера 10, где оцифровываются и проходят предварительную математическую обработку. Предварительно обработанные данные поступают в память компьютера 11, где проходят окончательную обработку и выводятся на монитор в удобной для оператора форме.

Скорость осаждения пленки, также как и ее толщина, измерялись по кварцевому датчику, расположенному перпендикулярно потоку частиц, и рассчитывались с учетом угла наклона подложек. Она варьировалась от 1 до 20 Å/с. При напылении под углом 33° мощность лазера снижалась, чтобы скорости роста пленки при малых и больших углах были сопоставимы. Поэтому, несмотря на то, что скорости роста пленки под большими углами несколько больше, на самом деле это имеет место за счет увеличения числа осаждаемых частиц. Энергия каждой отдельной частицы в этом случае даже меньше, что препятствует миграции частиц по

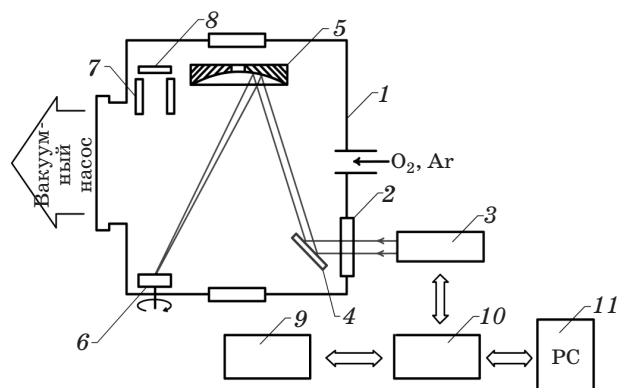


Рис. 1. Схема вакуумной установки для лазерного напыления оксидов. Пояснения в тексте.

поверхности подложек и способствует образованию гряд и бороздок, перпендикулярных направлению напыления.

Изучение рельефа поверхности наклонно напыленных слоев оксидов проводилось с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver PRO-M (фирмы NT-MDT) в полуконтактном режиме с зондом NSG01. Для сравнения также использованы данные, полученные на микроскопе Solver-BIO со сканирующей головкой "Smena" [9].

Для исследования начального угла наклона директора ЖК собирались плоскопараллельные ячейки с фиксированным зазором, состоящие из двух стеклянных подложек, на которые последовательно нанесены прозрачный проводящий электрод и ориентирующий слой оксида. Толщину зазора ячеек контролировали путем измерения емкости ячейки перед ее заполнением ЖК. Ячейки заполняли ЖК капиллярным способом в нематической фазе в вакууме. В работе использовался двухчастотный ЖК-1001 (НИОПИК) с оптической анизотропией $\Delta n = 0,26$ на длине волны 632,8 нм и диэлектрической анизотропией $\Delta \epsilon = 4,4$ ($\epsilon_{\parallel} = 9,5$ и $\epsilon_{\perp} = 5,1$) на частоте 1 кГц, и обычный электроположительный кристалл на основе цианобифенила ЖК-1282 (НИОПИК) с оптической анизотропией $\Delta n = 0,17$ и $\Delta \epsilon = 9,9$ ($\epsilon_{\parallel} = 15,5$ и $\epsilon_{\perp} = 5,6$).

Исследование рельефа ориентирующих слоев с помощью атомно-силового микроскопа

Изучение поверхности наклонно напыленных слоев оксидов с помощью атомно-силового микроскопа показало, что изменение угла наклона подложек относительно направления на источник, скорости напыления и энергии частиц приводит к модификации рельефа поверхности. В нашей предыдущей работе [9] сравнивались между собой текстуры поверхностей слоев оксида церия, полученные при расположении подложек под углами α по отношению к вертикальной оси вакуумной камеры, равными 5° и 35° . На полученных изображениях поверхности (рис. 2а, 2б) видно, что увеличение угла наклона подложки от 5° до 35° приводит к уменьшению высоты пиков в 3 раза (от 60 до 20 нм). Примерно в той же пропорции уменьшается среднее расстояние между максимумами. Отчетливо видно, что при угле напы-

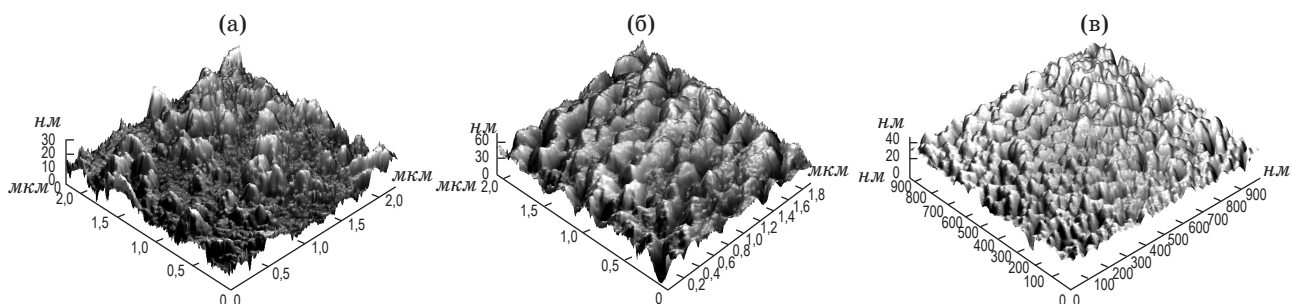


Рис. 2. Изображения текстуры поверхности слоев CeO_2 , напыленных под углами $\alpha = 35^\circ$ (а), 5° (б) и 15° (в) соответственно, полученные с помощью атомно-силового микроскопа.

Таблица 1. Зависимость рельефа пленок CeO_2 и SiO_2 от параметров напыления

| Вещество | Углы напыления α , град | | | Углы наклона кристаллитов β , град | | | Длина кристаллитов, нм | | | Наличие перпендикулярного рельефа | | |
|----------------|--------------------------------|----|--------------------|--|----|----|------------------------|------|------|-----------------------------------|----|----|
| | 8 | 15 | 33 | 8 | 15 | 33 | 8 | 15 | 33 | 8 | 15 | 33 |
| CeO_2 | 13 | 25 | 45 | 40 | 25 | 18 | есть | есть | нет | | | |
| SiO_2 | 3–5 | – | Не удалось оценить | 10 | – | 5 | Зависит от скорости | – | есть | | | |

ления 5° пики заметно наклонены к подложке, в то время как при напылении под $\alpha = 35^\circ$ они практически перпендикулярны подложке. В первом случае наблюдалась анизотропия рельефа – гряды и борозды, перпендикулярные направлению на источник. При угле 35° скопления пиков и цепочек кластеров, вытянутых в перпендикулярном напылению направлении, не наблюдалось. В настоящей работе показано, что промежуточный угол наклона подложек 15° дает разброс неровностей рельефа средний между описанными выше предельными случаями. Максимальный размах неоднородностей рельефа – до 44 нм, перпендикулярный напылению рельеф заметен, хотя и не так ярко выражен, как в случае скользящих углов (рис. 2в).

Полный оксид кремния SiO_2 менее склонен к кристаллизации, чем оксид церия CeO_2 . При напылении пленок оксида кремния под углом 8° характерные размеры получаемого рельефа значительно меньше (рис. 3). Средняя длина кристаллитов составляет порядка 10 нм, что почти на порядок меньше, чем при напылении оксида церия при аналогичных углах. Кроме того, гораздо меньше угол наклона кристаллитов. Лежащие пирамидки покрывают поверхность, как чешуя. Их угол наклона к плоскости подложки составляет всего $3-5^\circ$ (рис. 3), что противоречит принятой модели, согласно которой угол наклона кристаллитов к подлож-

ке должен быть больше угла напыления [10] и выражаться соотношением

$$\beta = \alpha - \arcsin\left(\frac{1 - \sin \alpha}{2}\right), \quad (1)$$

где α – угол между плоскостью подложки и направлением на источник, β – угол наклона кристаллитов относительно подложки.

Что касается поперечного рельефа в виде гряд кристаллитов и борозд между ними, то в случае плотно прилегающих к подложке образований он гораздо слабее выражен и визуально плохо заметен. Тем не менее, как будет показано далее, возможность ориентации на таком рельефе ЖК с нулевым начальным

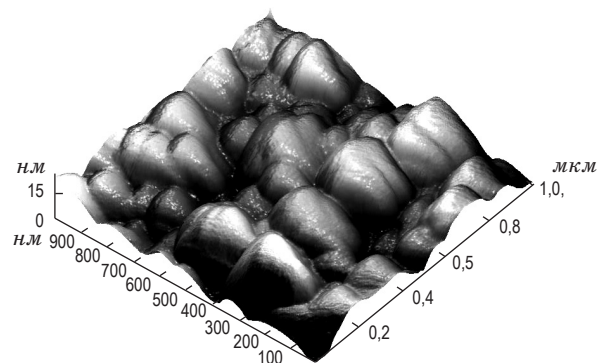


Рис. 3. Изображение текстуры поверхности слоев SiO_2 , напыленных под углом $\alpha = 8^\circ$, полученное с помощью атомно-силового микроскопа.

углом и отличным от нуля порогом электрооптического эффекта, свидетельствует о том, что перпендикулярный направлению напыления рельеф все же существует. Зависимость рельефа пленок CeO_2 и SiO_2 от параметров напыления представлена в табл. 1.

Измерения начального угла наклона директора в ЖК ячейках, ориентированных оксидами кремния и церия

Начальные углы наклона директора ЖК определялись двумя методами в зависимости от величины ожидаемых углов: по фазовой задержке пропускаемого света и методом вращения ячейки. Метод вращения в классическом виде применим только для углов, близких к 0 и к 90° , в то время как метод фазовой задержки обеспечивает наибольшую точность как раз для средних углов в диапазоне $30\text{--}60^\circ$. Оптические характеристики исследуемых ячеек измерялись на длине волны $0,65$ мкм с использованием оптической схемы, описанной в [11]. Источником излучения служил полупроводниковый лазерный модуль. Ячейки располагались между поляризатором и скрещенным с ним анализатором и измерялось пропускание света в зависимости от подаваемого на прозрачные электроды напряжения или от угла поворота ячейки.

Для включения ячеек на электроды подавалось переменное напряжение с частотой 1 кГц, а для выключения слоя двухчастотного жидкого кристалла (ДЧЖК) – переменное напряжение с частотой 30 кГц. Максимальное значение фазовой задержки $\Delta\Phi_{\text{max}}$ находили экстраполяцией линейного участка зависимости $\Delta\Phi$ ($1/U$) при $1/U \rightarrow 0$. По значению $\Delta\Phi_{\text{max}}$, полученному с помощью расчетной зависимости $\Delta\Phi$ от угла

наклона директора для данной толщины слоя ЖК в ячейке, определяли начальный угол θ [12]. В сумме значения начальных углов наклона директора θ , полученные при деформации поперечного и продольного изгиба слоя ДЧЖК в ячейках, составляли $90 \pm 2^\circ$. Углы наклона подложек при напылении слоев CeO_2 , толщины слоев ЖК в ячейках d и начальные углы наклона директора θ в исследованных ячейках приведены в табл. 2. Начальные углы наклона директора θ в ячейках, ориентированных CeO_2 и заполненных ЖК-1001, изменялись в интервале от 36 до 84° при вариации угла наклона подложек α в случае осаждения CeO_2 от 5 до 35° . Начальные углы наклона директора θ в ячейках, ориентированных CeO_2 с ЖК-1282, изменялись в интервале от 23 до 85° при вариации угла наклона подложек α при осаждении CeO_2 в тех же пределах.

Таким образом, в случае скользящих углов напыления получалась наклонная ориентация ЖК к подложке с углом, зависящим от марки кристалла, а в случае больших углов – ориентация, близкая к гомеотропной (перпендикулярной подложке). В случае наклонной ориентации углы наклона директора существенно превосходили углы напыления и углы наклона кристаллитов, что говорит о недостаточной смачиваемости оксида церия жидкими кристаллами. Планарной ориентации с разворотом молекул перпендикулярно направлению напыления не наблюдалось. Видимо, борозды исчезали раньше, чем длина кристаллитов становилась меньше длины молекул ЖК. С другой стороны, даже при больших углах длина кристаллитов оставалась достаточной для того, чтобы удерживать молекулы ЖК параллельно кристаллитам (табл. 1).

Иная картина наблюдалась при ориентации жидких кристаллов оксидом кремния. При на-

Таблица 2. Углы напыления ориентирующих слоев CeO_2 и наклона директора ЖК на этих слоях.

| № образца | α , град | Скор. Å/с | Толщ. CeO_2 , Å | Марка ЖК | d , мкм | θ , град |
|-----------|-----------------|-----------|--------------------------|----------|-----------|-----------------|
| 1 Се | 5 | 0,8 | 250 | 1001 | 8,4 | 36 |
| 2 Се | 5 | 0,8 | 250 | 1001 | 7,3 | 40 |
| 3 Се | 19 | 2 | 400 | 1001 | 8,1 | 60 |
| 4 Се | 35 | 4 | 600 | 1001 | 7,9 | 66 |
| 5 Се | 35 | 4 | 600 | 1001 | 7,9 | 84 |
| 15 Се | 5 | 1 | 250 | 1282 | 7,0 | 23 |
| 26 Се | 5 | 1 | 250 | 1282 | 13,5 | 33 |
| 58 Се | 15 | 1,7 | 350 | 1282 | 13,3 | 62 |
| 59 Се | 33 | 2,5 | 390 | 1282 | 13,2 | 85 |

Таблица 3. Параметры напыления ориентирующих слоев SiO₂ и углы наклона директора ЖК на этих слоях.

| № ячейки | α , град | Скор. Å/с | Толщ. SiO ₂ , Å | ЖК | d , мкм | θ , град |
|----------|-----------------|-----------|----------------------------|------|-----------|-----------------|
| 1 Si | 8 | 1 | 390 | 1282 | 13,5 | 0 |
| 2 Si | 8 | 2 | 390 | 1282 | 7,5 | 5 |
| 3 Si | 8 | 8 | 390 | 1282 | 13,7 | 45 |
| 26 Si | 8 | 1 | 390 | 1282 | 12,5 | 42 |
| 33 Si | 8 | 1 | 390 | 1282 | 12,8 | 47 |
| 27 Si | 33 | 4 | 350 | 1282 | 11,7 | 0 |
| 31 Si | 33 | 8 | 480 | 1282 | 12,4 | 0 |
| 6 Si | 33 | 1,5 | 350 | 1001 | 13,5 | 25 |
| 13 Si | 35 | 2,5 | 400 | 1001 | 13,9 | 23 |
| 8 Si | 8 | 0,7 | 390 | 1001 | 13,0 | 68 |
| 10 Si | 8 | 1 | 390 | 1001 | 13,0 | 70 |

пыления под скользящими углами возможно получение как малых 0–5° (ячейки № 1, 2), так и близких к 45° начальных углов наклона директора для кристалла ЖК-1282 (ячейки № 3, 26, 33 табл. 3). Углы наклона директора ЖК, меньшие углов наклона кристаллитов, могут быть обусловлены как хорошей смачиваемостью жидким кристаллом ориентирующей поверхности (если при напылении часть SiO₂ разлагается на SiO и кислород), так и механизмом разворота директора ЖК в плоскости подложек вдоль канавок. Как правило, этот механизм срабатывает при больших углах напыления, хотя сами канавки, перпендикулярные направлению напыления, при малых углах напыления выражены даже сильнее, чем при больших. Но, поскольку направление директора ЖК определяется минимумом энергии связи, разворот молекул параллельно канавкам обычно происходит при уменьшении размеров кристаллитов до критической величины. При напылении кварца можно получать мелкозернистые пленки даже при скользящих углах напыления.

Причиной больших углов наклона директора при малых углах напыления является такой рельеф, когда размеры кристаллитов малы, а перпендикулярные канавки по каким-то причинам не образуются. Микроскопические исследования подтвердили наши предположения. Ориентирующая пленка оксида действительно получалась мелкозернистой, как в случае больших углов напыления, при этом никакой анизотропии в виде вытянутых перпендикулярно направлению напыления образований не наблюдалось. Возможно, что получающийся рельеф обусловлен слишком большой энергией частиц, позволяющей им мигрировать по подложке.

При напылении SiO₂ под углами порядка 30–35° получалась либо ориентация, приближающаяся к планарной (№ 27, 31), либо ориентация была не определена (в зависимости от наличия или отсутствия поперечного рельефа).

Двухчастотный ЖК-1001 при ориентации SiO₂, напыленным под углами $\alpha = 30\text{--}35^\circ$, ориентируется с минимальным для него углом $\theta = 22\text{--}25^\circ$. При углах напыления 8° углы наклона директора ЖК-1001 к подложке составляли 68–70°. Таким образом, для данного кристалла при ориентации оксидом кремния наблюдалась тенденция, противоположная той, которая имела место при использовании в качестве ориентирующего слоя оксида церия. При увеличении угла наклона напыления угол наклона директора уменьшался.

Как при малых, так и при больших углах ориентация получалась, как правило, достаточно однородная. Большинство ячеек обладало хорошим контрастом, но корреляции между максимально достижимым контрастом ячеек (отношением минимального оптического пропускания к максимальному) и начальным углом наклона директора ЖК не наблюдалось.

Основные результаты

Обобщая данные проведенных исследований можно выделить четыре основных типа рельефа поверхности, образующихся при наклонном напылении оксидов. Как следствие, возможны следующие четыре принципиально различных варианта ориентации ЖК с помощью этих рельефов (рис. 4):

а) При скользящих углах напыления $5^\circ < \alpha < 15^\circ$ оксидов как кремния, так и церия, образуются кристаллиты с углом наклона к подлож-

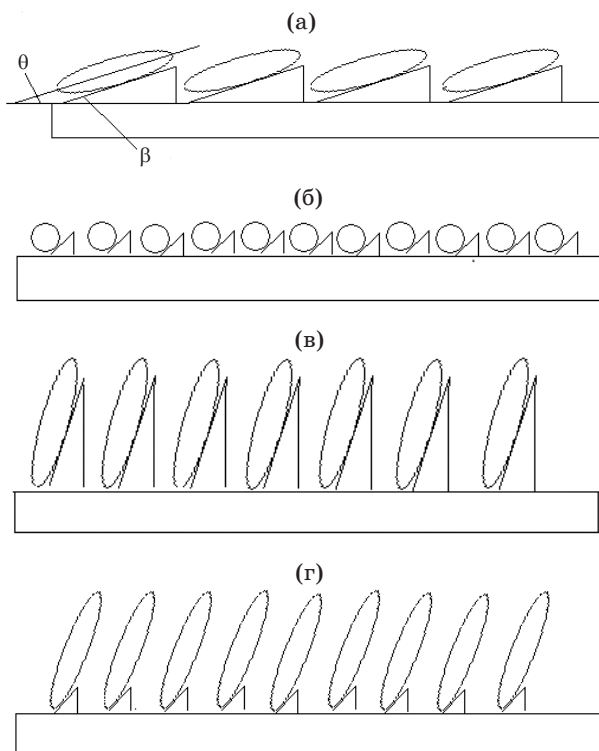


Рис. 4. Основные типы рельефа поверхности, образующиеся при наклонном напылении оксидов под различными углами, и варианты ориентации ЖК с помощью этих рельефов. $5^\circ < \alpha < 15^\circ$, любой оксид (а); $15^\circ < \alpha < 35^\circ$, плохо кристаллизующийся оксид (б); $15^\circ < \alpha < 35^\circ$, хорошо кристаллизующийся оксид (в); $15^\circ < \alpha < 35^\circ$, плохо кристаллизующийся оксид и отсутствие поперечного рельефа (г).

ке $\beta < 25^\circ$ и длиной $l \geq 10$ мкм. В большинстве случаев возникает также поперечный рельеф в виде гряд и борозд, вытянутых перпендикулярно направлению напыления, но поскольку длина кристаллитов больше длины молекул ЖК, механизм разворота на 90° в плоскости подложки не реализуется, и директор направлен по направлению напыления (вдоль кристаллитов). Углы начального наклона директора θ могут быть как больше, так и меньше β , в зависимости от сил химического взаимодействия для конкретной пары оксид–жидкий кристалл.

б) При увеличении углов между плоскостью подложки и направлением на источник $15^\circ < \alpha < 35^\circ$ углы наклона кристаллитов β , соответственно, также увеличиваются, а их длины уменьшаются. Когда длина кристаллитов становится меньше длины молекул ЖК, происходит разворот директора ЖК в плоскости под-

ложки на 90° , при этом $\theta = 0$. Механизм разворота молекул, обусловленный стремлением системы к минимуму энергии, реализуется на SiO_2 и не реализуется на CeO_2 .

в) Углы напыления большие $15^\circ < \alpha < 35^\circ$, но вещество хорошо кристаллизуется, и длина кристаллитов остается больше длины молекул ЖК. Независимо от наличия или отсутствия поперечного рельефа наблюдается ориентация ЖК под большими углами вдоль кристаллитов, в ряде случаев, близкая к гомеотропной. Реализуется на CeO_2 и не реализуется на SiO_2 .

г) Углы напыления большие $15^\circ < \alpha < 35^\circ$, а размеры кристаллитов малы, как в случае, изображенном на рис. 4б, но отсутствует поперечный рельеф. Причины отсутствия поперечного рельефа может быть несколько. Например, слишком высокая кинетическая энергия частиц и высокая температура подложки, что может приводить к миграции частиц по поверхности и сглаживанию рельефа. Исчезновение рельефа может быть также вызвано низким вакуумом в камере и высокой скоростью откачки, приводящими к искажению траектории частиц. Наконец, может быть слишком велика амплитуда сканирования лазерного луча по подложке, что при относительно небольших расстояниях от мишени до подложек заставляет рассматривать источник частиц уже не как точечный, а как протяженный.

Независимо от причин образования рельефа, изображенного на рис. 4г, на таком рельефе реализуется случай слабого сцепления ЖК с поверхностью, что практически исключает возможность использования данного случая для ориентации ЖК в технических устройствах из-за недопустимо высокой пространственной неоднородности и нестабильности. Все три варианта рельефа, на которых силы взаимодействия ЖК с ориентирующей поверхностью достаточно велики (а–в), могут быть использованы в реальных ЖК устройствах, а предпочтение того или иного конкретного случая зависит от поставленных задач.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01) и внутренних средств Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий механики и оптики.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Jiao M., Ge Z., Song Q., Wu S.-T.* Alignment layer effects on thin liquid crystal cells // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. P. 061102-1–061102-3.
2. *Janning J.L.* Thin film surface orientation for liquid crystals // *Appl. Phys. Lett.* 1972. V. 21. № 4. P. 173–174.
3. *Goodman L.A., McGinn J.T., Anderson C.H., Digeronimo F.* Topography of obliquely evaporated silicon oxide films and its effects on liquid crystal orientation // *IEEE Trans. Electron Devices.* 1977. ED-24. P. 795–804.
4. *Wilson T., Boyd G.D., Westerwick E.H., Storz F.G.* Alignment of liquid crystals on surfaces with film deposited obliquely at low and high rates // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1983. V. 94. P. 359–366.
5. *Амосова Л.П.* Влияние условий напыления пленок окислов полупроводников и металлов на ориентацию жидких кристаллов // *Оптический журнал.* 2013. Т. 80. № 3. С. 68–78.
6. *Dubois-V.E., de Gennes P.G.* Effect of long range Van der Waals forces on the anchoring of a nematic fluid at an interface // *J.Coll. Int. Sci.* 1976. V. 57. P. 403–410.
7. *Шубаев В.П.* Необычные кристаллы или загадочные жидкости // *Соросовский образовательный журнал.* 1996. № 11. С. 37–46.
8. *Paik S.M., Kim S., Schuller I.K., Ramirez R.* Surface kinetics and roughness on microstructure formation in thin films // *Phys. Rev. B.* 1991. V. 43. № 2. P. 1843–1846.
9. *Коншина Е.А., Иванова Н.Л., Парфенов П.С., Федоров М.А.* Динамика переориентации двухчастотного нематического жидкого кристалла с квазигомеотропной структурой // *Оптический журнал.* 2010. Т. 77. № 12. С. 45–51.
10. *Trait R.N., Smy T., Brett M.J.* Modeling and characterization of columnar growth in evaporated films // *Thin Solid films.* 1993. V. 226. P. 196–201.
11. *Амосова Л.П., Васильев В.Н., Иванова Н.Л., Коншина Е.А.* Пути повышения быстродействия электроуправляемых оптических устройств на основе нематических жидких кристаллов // *Оптический журнал.* 2010. Т. 77. № 2. С. 3–14.
12. *Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П.* Определение характеристик жидкокристаллических ячеек оптическими методами // *Оптический журнал.* 2006. Т. 73. № 12. С. 9–13.