

Рис. 5. Зависимость характерного размера структурных образований покрытия полимеризованного C_{60} от периода структуры подложки: а – покрытия толщиной 100–150 нм, б – покрытия толщиной 100–150 нм, сформированные с дополнительным вакуумным отжигом, в – покрытия толщиной 300–400 нм

Отжиг осажденных слоев *in situ* в вакууме непосредственно после формирования при температуре $100^{\circ}C$ в течение 1 часа практически не влиял на структуру и морфологию осажденных слоев (рис. 4). Глубина проникновения материала покрытия в поры подложки не превышает диаметра пор. Наименьшей шероховатостью обладают покрытия, сформированные на подлож-

ках с периодом структурирования около 100 нм и размером пор около 50 нм, что соответствует диапазону размеров структурных образований покрытий полимеризованного C_{60} , сформированных на гладких поверхностях, таких как монокристалл кремния.

Таким образом, исследования показали, что диаметры пор и период структуры исследуемых подложек оказывают решающее значение на шероховатость полимеризованного C_{60} покрытия, характерный размер поверхностных надмолекулярных образований и степень заполнения пор.

1. Плескачевский Ю.М., Хатько В.В., Горох Г.Г., Таратын И.А. / Сб. научн. статей “Наноструктуры в конденсированных средах”/ Под ред. П.А. Витязя. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2011. – С. 18–24.
2. Баркалин В.В., Белогуров Е.А., Таратын И.А., Хатько В.В., Шукевич Я.И. / Нано- и микросистемная техника. – 2012, № 1. – С. 18–24.
3. Корпухин А.С., Бабаевский П.Г., Жуков А.А., Козлов Д.В., Смирнов И.П. / Нано- и микросистемная техника. 2011, № 2.

УДК 621.396:535.8

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРООПТИКИ МИКРООБЪЕМОВ НЕМАТИЧЕСКИХ ЖК В ПРОСТРАНСТВЕННО ИНТЕГРИРОВАННЫХ МОДУЛИРУЮЩИХ СТРУКТУРАХ

Развин Ю.В., Потащиц В.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Нематические жидкие кристаллы (НЖК) относятся к числу перспективных и наиболее доступных в настоящее время электрооптических материалов для устройств модуляции света. НЖК характеризуются дальним ориентационным порядком. Длинные оси молекул в объеме вещества ориентированы вдоль определенного направления. Направление преимущественной ориентации молекул ЖК принято характеризовать единичным вектором \mathbf{n} (так называемый директор). Директор определяет лишь направление преимущественной ориентации молекул. Мерой дальнего ориентационного порядка является степень упорядоченности:

$$S = \frac{1}{2} \langle 3 \cos^2 \Theta - 1 \rangle,$$

где Θ - угол между осью отдельной молекулы и директором слоя ЖК.

В ЖК степень упорядоченности S определяет анизотропию его электрических и оптических свойств. При изменении степени упорядоченности претерпевают изменения анизотропии показателя преломления ($\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$), диэлектрической проницаемости ($\Delta \epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$) и электропро-

водности ($\Delta \sigma = \sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}$). Индексы \parallel и \perp показывают направления относительно длинной оси молекул ЖК.

Особенность электрооптических эффектов в НЖК состоит в том, что вследствие анизотропии диэлектрической проницаемости и электропроводности жидкий монокристалл испытывает вращающий момент, стремящийся понизить энергию ЖК слоя в электрическом поле. Вследствие относительно небольшой вязкости и внутреннего трения вращающий момент приводит к переориентации молекул ЖК. Согласно теории Озеена-Франка электрическое поле вызывает такую деформацию ЖК, что результирующее распределение ориентации осей молекул (n) минимизирует свободную энергию объема ЖК. Минимум энергии искажения ЖК достигается при условии совпадения направления максимальной поляризуемости с направлением поля \mathbf{E} . В результате в ЖК с положительной диэлектрической анизотропией директор стремится установиться вдоль поля, а при отрицательной диэлектрической анизотропии – перпендикулярно ему. Упругие силы стремятся вернуть ЖК в ис-

ходное состояние, определяемое граничными условиями на поверхностях слоя. Анализ такой модели показывает, что существует пороговое напряжение, при достижении которого начинается переориентация ЖК-слоя

$$U_{пор} = \pi(4\pi K/\Delta\varepsilon)^{1/2},$$

где K – модуль упругости НЖК

В качестве примера рассмотрим электрооптику твист эффекта (Т-эффекта), как наиболее применяемого в НЖК-устройствах. Твист-эффект наблюдается в планарно-ориентированных слоях НЖК с положительной диэлектрической анизотропией. Направление ориентации молекул на границах слоя отличаются друг от друга на угол 90° , при этом образуется закрученная структура. В отсутствие управляющего напряжения такая структура оптически активна, причем угол вращения плоскости поляризации проходящего через нее излучения равен углу закрутки жидкого кристалла. Этот режим выполняется для всех длин волн λ , проходящего через ячейку излучения, удовлетворяющих режиму Могена:

$$\lambda \ll 4d\Delta n,$$

где d – толщина слоя жидкого кристалла, Δn – его оптическая анизотропия.

При достаточно большой толщине слоя ЖК (~10 мкм) условие Могена выполняется для всех длин волн видимого диапазона. Соответственно, твист-ячейка закручивает на 90° плоскость поляризации как монохроматического, так и белого света. В отсутствие поля оптическая система: твист-ячейка в параллельных поляроидах (если направление поляризатора совпадает или перпендикулярно ориентации молекул ЖК на входной грани модулятора), непрозрачна при распространении света по нормали к ограничивающим поверхностям. Для твист-эффекта характерна зависимость от толщины ЖК слоя не только угла наклона молекул, но и их азимута. В результате выражение для порогового поля, определяющего начало деформации, равно:

$$U = \pi([K_{11} + (K_{33} - 2K_{22})/4]4\pi/\Delta\varepsilon)^{1/2}$$

При этом порог Т-эффекта всегда превышает порог начала деформации. Времена переориентации и релаксации молекул ЖК для чистой Т-деформации определяются выражениями

$$\tau_{вкл} = \gamma_1 d^2 / (\Delta\varepsilon E^2 d^2 + \pi^2 K_{22})$$

$$\tau_{рел} = \gamma_1 d^2 / \pi^2 K_{22}$$

где γ_1 – коэффициент вязкости ЖК

Необходимо подчеркнуть, что если время включения Т-эффекта может быть уменьшено увеличением управляющего напряжения, то изменение времени релаксации при условии постоянства d определяется только параметрами ЖК.

Матричные модуляторы (ПМС) являются универсальным устройством отображения информации дискретного типа. Простейший модулятор имеет две системы ортогональных электродов N строк и M столбцов (разрядов), между которыми находится слой ЖК. С увеличением информационной емкости уменьшается размер световых элементов – пикселей (переключаемых микрообъемов жидкого кристалла). Электрооптика микрообъемов ЖК существенным образом отличается от электрооптических свойств сплошных модулирующих структур.

Основная проблема, с которой приходится сталкиваться при управлении матричным модулятором, является подавление кросс-эффекта. Кросс-эффект (включение “полувыбранных” пикселей) возникает вследствие гальванической и емкостной связи между электродами, а также полой ВКХ жидкого кристалла и приводит к уменьшению числа отображаемых строк модулятора. Максимальное число сканируемых строк матричного модулятора определяется выражением:

$$N_{max} = [(1+P)^2 + 1] / [(1+P)^2 - 1]^2$$

где $P = (U_p - U)/U$ – крутизна ВКХ, U – пороговое напряжение для ЖК слоя, U_p – рабочее напряжение.

Кросс-эффект можно ослабить при подборе режимов управления по так называемым схемам $U/2$, $U/3$, или использовать жидкий кристалл с крутой ВКХ. При управлении матричным модулятором повторяющимися импульсами электрического поля число отображаемых строк зависит от среднеквадратичного значения порогового и рабочего напряжений. Таким образом, чем круче вольт-контрастная характеристика ЖК (меньше P), тем с большим числом сканируемых строк можно построить матрицу.

Требования к временным характеристикам электрооптических эффектов, применяемых в матричных модуляторах, связаны в основном с повышением быстродействия. Чистый твист-эффект в ЖК, имеющий память релаксационного типа, считался до недавнего времени малоперспективным для мультиплицирования информации на модуляторе матричного типа. Время отклика зависит от толщины ячейки и отношения динамической вязкости к коэффициенту упругости K используемой ЖК смеси.

Исследование образцов матричных ЖК ПМС на основе Т-эффекта показало, что при малых объемах модулирующего слоя в пределах апертуры пикселя существенное влияние на кинетику переключения оказывает начальный преднаклон молекул жидкого кристалла.

В работе использовались экспериментальные образцы матричных НЖК-модуляторов, собранных на подложках с переменной структурой

электродов. Оптическая апертура образцов не превышала $16 \times 16 \text{ мм}^2$. Размеры электродов исследуемых структур менялись в пределах $100 \dots 5 \text{ мкм}$. Соответственно изменялся шаг структуры. В образцах использовались различные смеси нематических ЖК ($\Delta\epsilon = 0,5 \dots 2$). Толщина жидкокристаллического слоя устанавливалась с помощью прокладок либо с помощью площадок, напыленных на рабочие поверхности оптических подложек. Регистрация контрастно-временных параметров исследуемых образцов осуществлялась в поляризованном свете по осциллографической методике, в качестве источников считывающего излучения в работе использовались ЛГ208 и ЛГ311 [1].

На рис. 1 приведены осциллограммы переключения обычной твист-ячейки и пикселя исследуемого образца ПМС при реализации режима регулируемого преднаклона ЖК-молекул.

В качестве рабочей среды в образцах ПМС использовалась нематическая смесь ДЧЖК, что позволяло получать режим изменяемого преднаклона молекул. При этом, как показывают результаты исследования, можно устранить появление кросс-эффекта.

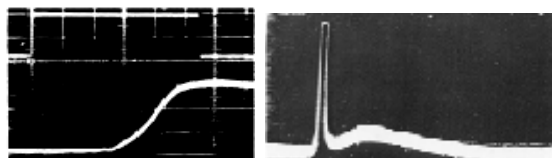


Рисунок 1 – Осциллограммы переключения твист-ячейки (сплошной модулирующий слой) и пикселя исследуемого образца ПМС (нижняя осциллограмма). Верхняя осциллограмма соответствует временной развертке управляющего импульса

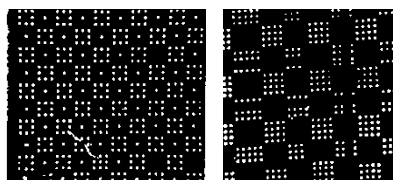


Рисунок 2 – Фотографии фрагментов ПМС

1. Развин, Ю.В. Особенности переключения жидкокристаллического слоя при комбинированном возбуждении / Ю.В. Развин, В.А. Потачиц // Наука – образованию, производству, экономике: материалы докладов 2-й междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2004. – Т. 2. – С. 330–334.

УДК 621

АППРОКСИМАЦИЯ СИНГУЛЯРНЫМИ ВЕЙВЛЕТАМИ

Романчак В.М., Кондратьева Н.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Компьютерное моделирование в той или иной степени решает задачу аппроксимации. Поэтому поиск и исследование новых методов аппроксимации представляет значительный интерес и является актуальной прикладной задачей.

Данной работой мы продолжаем развитие нового метода аппроксимации - метода сингулярных вейвлетов. Вначале, на нестрогом уровне, поясним отличие классического вейвлета от сингулярного. Пусть $\psi(x)$ – это базисный вейвлет («маленькая волна», «всплеск»), который должен удовлетворять условию:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0. \quad (1)$$

В вейвлете варьируют значения параметра масштабирования a и параметра сдвига b :

$$\frac{1}{a} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (2)$$

В теории вейвлетов рассматривают скалярное произведение действительной функции $f(x)$ и вейвлета функции (2), которое называют вейвлет преобразованием:

$$Wf(b,a) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (3)$$

Можно показать, что если функция $\psi(x)$ удовлетворяет условию допустимости (1), то в преобразовании (3) «малый всплеск» приводит к «маленькой волне», т.е. функция $Wf(b,a)$ для малых a будет близка к нулю. Если базисный вейвлет не удовлетворяет условию допустимости («большой всплеск»), то преобразование (3) может привести к «большой волне», т.е. функция $Wf(b,a)$ может оказаться большой. Между тем, изменив определение интегрального вейвлета преобразования можно устранить эту проблему.

Введем дельта преобразование по формуле:

$$Hf(b,a) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} (f(t) - f(b)) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (4)$$

С учетом условия допустимости (1) дельта преобразование (4) совпадает с вейвлет преобразованием (3). Но если в преобразовании (4) выбрать вейвлет, для которого не выполняется необходимое условие допустимости (1), то «большой всплеск» по-прежнему будет приводить к «маленькой волне», т.е. функция