

## КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КЛАССИЧЕСКОГО ЖК-МОДУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА «ГОСТЬ – ХОЗЯИН»

Г.В. Симоненко<sup>1</sup>, С.А. Студенцов<sup>2</sup>, В.А. Ежов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского» (СГУ),

<sup>2</sup> Научно-производственное предприятие «Фотон»,

<sup>3</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)

### Аннотация

Методом компьютерного моделирования выполнен анализ оптических характеристик ЖК-модулятора, в котором используется электрооптический эффект «гость – хозяин». В статье рассмотрены классические конструкции ЖК-модулятора, выполненные на основе планарной ячейки с различными углами закрутки структуры ЖК с поляроидом и без него. Кроме этого проанализирована конструкция ЖК-модулятора с гомеотропной ориентацией ЖК без поляроида. Даны практические рекомендации по нахождению оптимальных конструкций ЖК-модуляторов для различных конкретных задач.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, оптические характеристики, ЖК-модулятор, эффект «гость – хозяин».

**Цитирование:** Симоненко, Г.В. Компьютерный анализ оптических характеристик различных конструкций классического ЖК-модулятора на основе эффекта «гость – хозяин» / Г.В. Симоненко, С.А. Студенцов, В.А. Ежов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, №3. – С. 376-384.

### Введение

Жидкокристаллические модуляторы (ЖКМ) на основе электрооптического эффекта «гость – хозяин» представляют значительный интерес для систем отображения и обработки информации с повышенной оптической эффективностью вследствие возможности работы данных ЖКМ без поляризаторов (бесполяридная конструкция) либо только с одним поляризатором [1 – 6]. В настоящее время производится несколько вариантов ЖК-модуляторов на основе эффекта «гость – хозяин» как в просветном, так и в отражательном конструктивном исполнении [6]. Наиболее широко распространённые конструкции таких устройств выполнены в виде классической сэндвич-структуры (на основе различных планарных или гомеотропных ориентаций ЖК) [5, 6], а также изготовлены в виде диспергированного в полимерной плёнке ЖК (такие устройства называют polymer dispersed LC (PDLC)) [6]. Классическая конструкция ЖК-модулятора, реализованная на базе одной ЖК-ячейки «гость – хозяин», имеет по сравнению с другими устройствами, основанными на эффекте «гость – хозяин», такие преимущества, как простая технология и малая стоимость производства, а также повышенный уровень пропускания при достаточно высоком уровне контраста изображения [5, 6]. В силу разнообразия конструкций ЖК-модуляторов, работающих на основе эффекта «гость – хозяин» и для расширения сферы применения данных ЖКМ актуальна оптимизация их конструкций. Анализ оптических характеристик ЖКМ в стандартной конструкции выполнен достаточно полно [5–7], при этом для анализа ЖКМ обычно используется очень большой набор оптических, электрооптических и динамических характеристик

[7 – 11]. Однако остаются открытыми вопросы об оптимизации ЖКМ с различными видами ориентационных ЖК-структур и различными типами конструкций ЖК-ячеек, включая различные величины углов закрутки спирали ЖК-структуры.

Данная работа направлена на устранение этого пробела и посвящена оптимизации различных вариантов классических ЖКМ с эффектом «гость – хозяин» на основе компьютерного моделирования.

### 1. Методы исследования

#### 1.1. Оптические характеристики ЖКМ

Как известно [7 – 11], для достаточно полного теоретического или экспериментального описания электрооптических и оптических характеристик ЖКМ необходимо вычислить или измерить целый ряд их параметров (характеристик), к которым в первую очередь относятся:

- оптические характеристики (пропускание, контраст, угловые зависимости контраста и пропускания, цветовые координаты);
- электрооптические характеристики (вольт-контрастная характеристика, степень мультиплексирования);
- динамические характеристики (времена реакции и релаксации).

Для адекватного описания характеристик ЖКМ удобно использовать следующий набор их оптических характеристик [11, 12]: среднее по спектру или для определённых длин волн пропускание (отражение) для состояния «включено» («выключено»)  $T_{on}$  ( $T_{off}$ ); координаты цвета в цветовом треугольнике и ахроматичность изображения; средний по спектру контраст изображения или контраст для определённых длин волн; индикатриса среднего по спектру или на определённой длине волны контраста изображе-

ния. Под состоянием «включено» понимается состояние ЖК-затвора, когда на его управляющие электроды подано напряжение, превышающее пороговое значение. Когда управляющее напряжение на электродах ЖК-ячейки ниже порога, то это состояние соответствует состоянию «выключено».

В этом случае среднее по спектру пропускание устройства  $T_{\text{off}}$  для состояния «выключено» («включено»  $T_{\text{on}}$ ) зависит от пропускания ЖКМ в состоянии «выключено» («включено»)  $T_{\text{off(он)}}$  на длине волны  $\lambda$  спектрального распределения стандартного источника излучения  $D_{65}$  (или какого-либо другого источника излучения) и спектральной чувствительности глаза [12].

В частности, при работе ЖКМ в режиме ЖК-затвора между двумя его оптическими состояниями должен быть обеспечен требуемый контраст изображения. Для позитивных изображений (чёрный индекс на светлом фоне) справедливо соотношение  $T_{\text{off}} > T_{\text{on}}$ , а для негативных изображений (светлый индекс на тёмном фоне) –  $T_{\text{off}} < T_{\text{on}}$ . Средний по спектру контраст изображения  $C_{\text{pos}}$  для позитивного изображения вычисляется как

$$C_{\text{pos}} = T_{\text{off}} / T_{\text{on}},$$

а контраст  $C_{\text{neg}}$  для негативного изображения

$$C_{\text{neg}} = T_{\text{on}} / T_{\text{off}}.$$

Координаты цвета ( $x$ ,  $y$ ) ЖКМ в состоянии «включено» или «выключено» в цветовой системе координат ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) определяются с помощью стандартной методики [12, 13].

Следующей важной оптической характеристикой для чёрно-белого ЖКМ является ахроматичность изображения. Ахроматичность изображения обычно определяется как расстояние  $H$  текущей точки изображения с координатами цвета ( $x$ ,  $y$ ) от точки белого цвета  $D_{65}$  с координатами ( $x_{65}$ ,  $y_{65}$ ) [12]:

$$H = \sqrt{(x - x_{65})^2 + (y - y_{65})^2}.$$

Индикатриса контраста определяется как зависимость контраста изображения от угла  $\phi$  падения света и азимута  $\zeta$  плоскости падения света. При этом азимут  $\zeta$  плоскости падения света обычно отсчитывается от направления ориентации молекул ЖК на фронтальной поверхности ЖК-ячейки по часовой стрелке. Часто для характеристики угловой зависимости контраста ЖКМ вводят понятие угла  $\Psi$  обзора. В нашем случае углом обзора ЖКМ является угол между двумя азимутальными направлениями плоскости падения света при фиксированном угле  $\phi$  падения света, для которых контраст  $S$  изображения не ниже определённого уровня [12].

В связи со сложностью натурального моделирования нами для исследования характеристик и поиска оптимальных параметров ЖКМ использовалась система компьютерного моделирования *MOUSE-LCD* [8, 11].

### 1.2. Система компьютерного моделирования

Пакет программ *MOUSE-LCD* [8] предназначен для моделирования электрооптических, оптических и

эргономических характеристик следующих электрооптических эффектов и ЖК-структур на их основе:

- эффект двойного лучепреломления в ЖК сверхзакрученных нематических (*supertwist nematic – STN*) структурах;

- эффект двойного лучепреломления в ЖК двойных сверхзакрученных нематических (*double-layer supertwist nematic – DSTN*) структурах, наблюдаемый в двух расположенных последовательно друг за другом *STN*-структурах, помещённых между двумя скрещёнными поляризаторами;

- эффект двойного лучепреломления в тройной *STN*-структуре (в трёх последовательно расположенных *STN*-ячейках);

- эффект двойного лучепреломления в сверхзакрученной ЖК-структуре, за которой расположена фазовая система, состоящая из одной или более анизотропных полимерных плёнок, оптические оси которых ориентированы под углом друг к другу, и помещённых между двумя скрещёнными поляризаторами (*neutral twisted nematic – NTN*);

- твист-эффект (*twist nematic – TN*-структура);

- эффект «гость – хозяин» (“*guest-host*” – *GH* структура) в различных ориентационных структурах ЖК;

- «штопор»-эффект;

- эффект двойного лучепреломления в  $\pi$ -ячейках.

При этом пакет программ позволяет рассчитать следующие характеристики ЖКМ:

- цветовые координаты, спектры пропускания, среднее по спектру пропускание и пространственные характеристики, зависимости всех характеристик от управляющего электрического напряжения, упругих и диэлектрических постоянных ЖК-материала, углов закрутки структуры и преднаклона ЖК и от конструктивных особенностей ЖКМ (*TN*-, *STN*-, *DSTN*-, *NTN*- и *GH*-структуры);

- времена реакции и релаксации оптического отклика ЖКМ в зависимости от физических и конструктивных параметров модулятора и ЖК-вещества;

- пороговое напряжение возникновения полосовых диэлектрических доменов неустойчивости в закрученных ЖК-структурах;

- оптические характеристики ЖКМ в случае двумерной деформации ЖК-слоя в электрическом поле при различной конфигурации управляющих электродов.

Первоначальная версия пакета программ («ЭЛЕКТРООПТИКА – М») была разработана для универсальных ЭВМ серии ЕС в конце 80-х годов [14]. Несколько позже была реализована версия комплекса программ для персональных компьютеров для операционной системы *MS DOS* версии 3.0 [15]. Расчётные модули программ, входящие в комплексы, написаны на свободно распространяемой версии языка программирования *Fortran 77* (95), и их перекомпиляция в операционной системе семейства *Linux* позволяет использовать эти программные комплексы в этой операционной системе. Более того, отдельные программные модули могут быть использованы самостоятельно от

других модулей для решения самостоятельных подзадач (например, для расчёта двумерной упругой деформации ЖК или динамики деформации ЖК в электрическом поле). Таким образом, при реализации этих программных комплексов использован принцип блочного построения, согласно которому для решения самостоятельной задачи используется самостоятельный программный блок, оформленный в виде отдельного исполняемого модуля или отдельного объектного модуля. При этом связь между отдельными программными модулями осуществляется только через файлы данных. Такой подход к моделированию электрооптических и оптических характеристик позволяет рассматривать произвольные конструкции ЖКМ, в которых используется эффект интерференции поляризованных лучей или эффект «гость – хозяин» или оба этих эффекта совместно. Само устройство при этом может состоять как из одной классической ЖК-ячейки, так и из их комбинации.

Пакет программ выполняет пошаговое моделирование характеристик ЖКМ в следующей последовательности:

- расчёт статического поля конфигурации ЖК-директора в электрическом поле. Описание методов решения задачи представлено в работах [11, 16, 17];

- расчёт статического оптического отклика ЖКМ на управляющее электрическое напряжение. Описание методов решения задачи представлено в работах [11, 18, 19];

- расчёт динамики переориентации ЖК-директора при переключении управляющего электрического напряжения. Описание методов решения задачи представлено в работах [11, 20];

- расчёт времён реакции и релаксации оптического отклика ЖКМ при переключении рабочего напряжения. Описание методов решения задачи представлено в работах [11, 18, 19];

- расчёт порогового напряжения возникновения диэлектрических полосовых доменов неустойчивости в структуре ЖК слоя ЖКМ. Описание методов решения задачи представлено в работах [21].

При компьютерном моделировании основной моделью является модель ЖК-ячейки, которая представляет из себя сэндвич. Обычно такая структура состоит двух стеклянных подложек, на внутренние стороны которых последовательно нанесены проводящие и ориентирующие слои, а зазор между ними заполнен ЖК. Все поверхности параллельны друг другу. Если используется ЖКМ с одним поляризатором, то на одну из стеклянных пластин с внешней стороны помещается поляризатор (например, ЖКМ на эффекте «гость – хозяин» с одним поляризатором). В конструкции ЖКМ с двумя поляризаторами ЖК-ячейка помещена между двумя поляризаторами (например, ЖКМ на твист-эффекте).

Скажем несколько слов о математических методах, которые положены в основу комплекса программ. На первом этапе моделирования для вычисления статических деформаций ЖК в электрическом

поле используются дифференциальные уравнения теории упругости ЖК [7], решение которых подробно описано в работах [11, 16, 17]. На втором этапе моделирования характеристик ЖК-устройств вычисляются их оптические характеристики с помощью различных методов матричной оптики, подробно описанных в работах [11, 18, 19]. Если необходимо моделировать динамику переключения ЖК из одного состояния в другое, то для этой цели используются дифференциальные уравнения теории Лесли–Эриксона [7], методика решения которых представлена в работах [11, 20]. В этом случае расчёт динамики оптического отклика ЖК-устройства осуществляется так же с помощью методов матричной оптики [11, 18, 19].

Сравнение экспериментальных и расчётных данных для ЖКМ на твист-эффекте и на эффекте «гость-хозяин» показало, что величина расхождения экспериментальных и расчётных оптических характеристик  $\Sigma$  для указанных типов ЖКМ находится в пределах погрешности эксперимента. Если угол падения света на устройство изменяется от  $0^0$  до  $45^0$ , то для ЖКМ на твист-эффекте  $\Sigma \leq 10\%$ , а для ЖКМ на эффекте «гость – хозяин»  $\Sigma \leq 6\%$ . Следовательно, разработанные программные средства обеспечивают количественно правильное описание электрооптических и оптических характеристик ЖКМ как на твист-эффекте, так и на эффекте «гость – хозяин».

### 1.3. Конструктивные особенности и материалы

Нами рассматривались следующие основные структуры ЖКМ на эффекте «гость – хозяин»:

- планарная ЖК-структура с различными углами закрутки ЖК ( $\Phi_T$ ) с поляризатором;

- планарная ЖК структура с различными углами закрутки ЖК без поляриоида;

- гомеотропная ЖК-структура без поляриоида.

Планарной ЖК-структурой называется структура с любым углом закрутки ЖК молекул, но с углами  $\theta_0$  их преднаклона на ориентирующей подложке, находящимися в пределах от  $1^0$  до  $30^0$ . Гомеотропной структурой называется структура, у которой угол наклона молекул ЖК на ориентирующей подложке находится в пределах от  $85^0$  до  $90^0$ . Заметим, что в планарной структуре используются ЖК-вещества с положительной диэлектрической анизотропией ( $\Delta\epsilon > 0$ ), а в гомеотропной структуре используются ЖК-материалы с отрицательной диэлектрической анизотропией ( $\Delta\epsilon < 0$ ).

Существует большое число конструктивно-технологических и физических параметров ЖКМ, которые определяют его оптические характеристики [9, 11]. В данной работе рассмотрены следующие конструктивные параметры ЖКМ: толщина  $d$  ЖК-слоя; угол  $\Phi_T$  закрутки планарной структуры или отношение  $d/p_0$  толщины  $d$  ЖК-слоя к шагу  $p_0$  холестерической спирали для гомеотропной структуры; угол  $\theta_0$  преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках для планарной структуры ЖК. В качестве физических параметров ЖКМ рассмотрены: величина

анизотропии  $\Delta n$  показателей преломления ЖК; концентрация  $c$  красителя, растворённого в ЖК; величины  $\Delta\epsilon$  диэлектрической анизотропии ЖК.

При моделировании электрооптических характеристик ЖКМ с планарной структурой использовались физические параметры для ЖК-вещества типа ZLI 4756/2 (фирма Merck, Германия):  $K_{11} = 10,5 \cdot 10^{-6}$  дин,  $K_{22} = 6,9 \cdot 10^{-6}$  дин,  $K_{33} = 16,8 \cdot 10^{-6}$  дин,  $\epsilon_{\perp} = 4,8$ ,  $\epsilon_{\parallel} = 16,54$ ,  $\Delta n$  (436 нм) = 0,104,  $\Delta n$  (546 нм) = 0,1;  $\Delta n$  (633 нм) = 0,096 [22]. Для случая гомеотропной ориентации ЖК в модуляторе использовались физические параметры для ЖК-вещества типа ZLI 3200 (фирма Merck, Германия):  $K_{11} = 9,5 \cdot 10^{-6}$  дин,  $K_{22} = 6,9 \cdot 10^{-6}$  дин,  $K_{33} = 10,8 \cdot 10^{-6}$  дин,  $\epsilon_{\perp} = 11,3$ ,  $\epsilon_{\parallel} = 6,54$ ,  $\Delta n$  (436 нм) = 0,046,  $\Delta n$  (546 нм) = 0,044,  $\Delta n$  (633 нм) = 0,042 [22]. Во всех расчётах эти физические параметры оставались постоянными, а в качестве поляризатора использовалась плёнка NPF – F 1205 DU. В качестве красителя использовалась смесь MIB 9 (фирмы Merck, Германия) [23] со следующими оптическими параметрами: концентрация красителя  $c = 1\%$ , рабочая толщина ЖК-слоя  $d = 9$  мкм, дихроичное отношение  $D = 11,7$ .

В расчётах также использовались следующие технологические параметры ЖКМ: 1-й пассивирующий слой с толщиной 0,11 мкм и с показателем преломления 1,45; электродный слой с толщиной 0,06 мкм и с показателем преломления 2,0; 2-й пассивирующий слой с толщиной 0,11 мкм и с показателем преломления 1,45; ориентирующий слой с толщиной 0,02 мкм и с показателем преломления 1,4.

Известно [9], что электрооптические характеристики ЖКМ на эффекте «гость–хозяин» в основном определяются изменением оптической плотности рабочего вещества от максимального значения  $D_{\parallel}$  до минимального значения  $D_{\perp}$ . При этом сами оптические плотности зависят от конструктивных и физических параметров ЖКМ следующим образом:

$$D_{\parallel} = \alpha_{\parallel} cd, D_{\perp} = \alpha_{\perp} cd,$$

где  $\alpha_{\parallel}$  и  $\alpha_{\perp}$  – соответственно максимальный и минимальный коэффициенты экстинкции рабочего вещества;  $c$  – концентрация красителя, которая обычно не превышает 3 %;  $d$  – толщина ЖК-слоя.

Кроме этого, на характеристики ЖКМ на эффекте «гость – хозяин» существенную роль оказывает зависимость максимального поглощения красителя от управляющего напряжения. Поэтому в качестве исследуемых характеристик нами выбраны зависимость среднего по спектру контраста  $S$  изображения и среднего по спектру пропускания  $T_{\text{он}}$  в состоянии «включено» от физических параметров ЖКМ (концентрация  $c$  красителя, анизотропия  $\Delta n$  показателей преломления ЖК-слоя, диэлектрическая анизотропия  $\Delta\epsilon$  ЖК-слоя) и от его конструктивных параметров (толщина  $d$  ЖК-слоя, угол  $\Phi_{\Gamma}$  закрутки структуры ЖК для планарной ориентации ЖК-слоя, отношение  $d/p_0$  толщины  $d$  ЖК слоя к шагу  $p_0$  холестерической

добавки для гомеотропной ориентации ЖК, угол  $\theta_0$  преднаклона ЖК молекул на ориентирующих подложках для планарной ориентации ЖК). Кроме этого исследовались времена оптического отклика ЖКМ в зависимости от этих же параметров.

Заметим, что одной из основных оптических характеристик ЖКМ является индикатриса контрастного отношения [7, 9 – 11]. Однако, как было показано ранее [9], угловые зависимости контраста изображения ЖКМ на эффекте «гость – хозяин» выражены слабо, а форма индикатрис контраста близка к окружности. При этом значения контраста изображения для углов падения в пределах  $10^{\circ} - 70^{\circ}$  отличаются от значений контраста для нормального падения (максимальное значение контраста) не более чем на 20 % [9]. Поэтому в данной работе данные по угловым зависимостям контраста изображения от различных параметров ЖКМ не приведены.

В следующих разделах статьи приведены результаты компьютерного моделирования для ЖКМ на эффекте «гость – хозяин» для трёх типов ЖК-структур:

- планарная ЖК-структура с одним поляризатором при различных углах закрутки;
- планарная ЖК-структура без поляризатора с различными углами закрутки;
- гомеотропная ЖК-структура без поляризатора.

Заметим, что первые две конструкции обеспечивают негативное изображение, а третья конструкция – позитивное.

## 2. Результаты и обсуждение

### 2.1. ЖКМ на планарной структуре с одним поляризатором

На рис. 1 представлена зависимость контраста изображения, формируемого ЖКМ, от анизотропии  $\Delta n$  показателя преломления ЖК для различных толщин  $d$  ЖК-слоёв с углом закрутки ЖК молекул  $90^{\circ}$ . Видно, что в таком ЖКМ следует использовать ЖК с большой величиной  $\Delta n$ , так как малая величина  $\Delta n$  приводит к нарушению волноводного режима Могена [7, 9] и, как следствие, к уменьшению поглощения света в состоянии «включено». Во то же время для состояния «включено» этой зависимости нет, так как в этом состоянии ЖК изотропен. Поэтому с ростом анизотропии  $\Delta n$  показателя преломления ЖК-контраст  $S$  изображения тоже растёт.

На рис. 2 представлены концентрационные зависимости контраста  $S$  изображения для ЖКМ на структуре с углом закрутки  $90^{\circ}$ . Как следовало ожидать, ЖКМ с более высокой концентрацией  $c$  красителя имеет более высокие оптические характеристики. Это связано с тем, что величина  $T_{\text{он}}$  слабее зависит от концентрации  $c$ , чем  $T_{\text{офф}}$ . Зависимость  $T_{\text{офф}}(c)$  является сильной и монотонно убывающей. При этом с увеличением толщины  $d$  в соответствии с законом Бугера величина  $T_{\text{офф}}$  пропускания ЖКМ в состоянии «включено» изменяется от 38 % до 29 % при изменении концентрации  $c$  красителя от 1 до 3 %. Аналогичное поведение показывает и зависимость контраста  $S$

изображения от толщины  $d$  слоя ЖК. Это можно легко понять, если вспомнить, что оптическая плотность красителя  $D_{//\perp}$  зависит от произведения  $cd$ . При этом величина  $T_{on}$  слабо зависит от толщины, в то время как зависимость  $T_{off}(d)$  является сильной и монотонно убывающей.

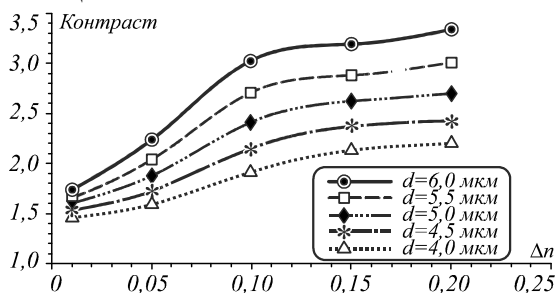


Рис. 1. Зависимость контраста  $S$  изображения от анизотропии  $\Delta n$  показателя преломления ( $c = 1,1\%$ ,  $\Phi_T = 90^\circ$ )

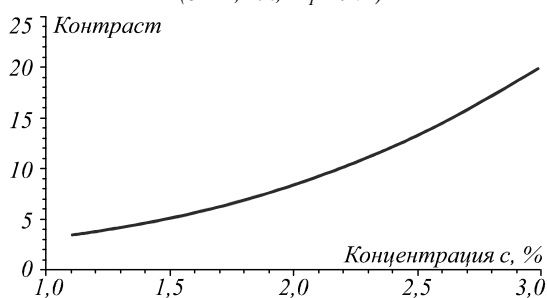


Рис. 2. Зависимость контраста  $S$  изображения от концентрации  $c$  красителя ( $d = 6$  мкм,  $\Delta n = 0,2$ ,  $\Phi_T = 90^\circ$ )

Зависимости контраста изображения и величины пропускания ЖКМ в состоянии «включено» от диэлектрической анизотропии ЖК крайне слабы. Это объясняется тем, что в состоянии «выключено» (когда управляющее напряжение ниже порогового) пропускание ЖКМ не зависит от  $\Delta\epsilon$ , а в состоянии «включено» управляющее напряжение существенно превышает пороговое значение и пропускание в этом состоянии так же слабо зависит от  $\Delta\epsilon$  [9].

На рис. 3 представлена зависимость контраста  $S$  изображения ЖКМ от угла  $\Phi_T$  закрутки ЖК-структуры. При изменении  $\Phi_T$  в пределах от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  эта зависимость слабая, а при дальнейшем увеличении  $\Phi_T$  контраст падает, так как для состояния «выключено» нарушается режим Могена. Это приводит к увеличению величины  $T_{off}$  пропускания ЖКМ, в то время как его пропускание  $T_{on}$  практически не зависит от угла закрутки ЖК-структуры. Поэтому контраст  $S$  изображения при увеличении  $\Phi_T$  падает.

Аналогичное поведение показывает и зависимости контраста  $S$  изображения и пропускания  $T_{on}$  от угла  $\theta_0$  преднаклона молекул ЖК на подложках ЖКМ. Значение  $T_{on}$  от  $\theta_0$  практически не зависит, так как управляющее напряжение в этом состоянии существенно превышает пороговое значение и не зависит от угла  $\theta_0$  преднаклона. Зависимость  $S(\theta_0)$  слабо убывающая, так как пропускание  $T_{off}$  в состоянии «выключено» в указанных пределах изменения угла  $\theta_0$  преднаклона слабо растёт [9].

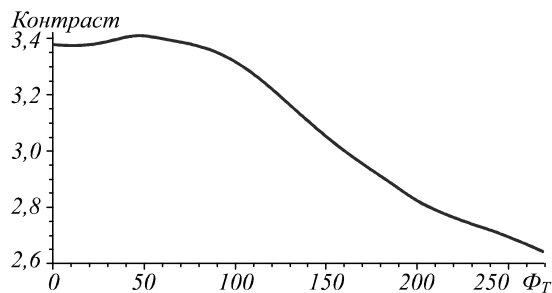


Рис. 3. Зависимость контраста  $S$  изображения от угла  $\Phi_T$  закрутки структуры ЖК ( $d = 6$  мкм,  $\Delta n = 0,2$ ,  $c = 1,1\%$ )

## 2.2. ЖКМ на планарной структуре без поляризатора

Конструкция ЖКМ на эффекте «гость – хозяин» без поляроида имеет свои достоинства и недостатки. К плюсам можно отнести высокий уровень пропускания в состоянии «включено», а к минусам – малый контраст изображения. Однако если использовать различные закрученные ЖК-структуры, то можно одновременно получить пропускание на уровне 50–60 % и контраст на уровне 5 : 1. На рис. 4 представлена зависимость контраста  $S$  изображения от анизотропии  $\Delta n$  показателя преломления ЖК. В отличие от конструкции с поляридом, в этой конструкции для обеспечения максимального контраста изображения необходимо использовать ЖК с минимальным значением  $\Delta n$ , так как в этом случае для обеспечения максимального поглощения света в состоянии «выключено» необходимо нарушить режим Могена.

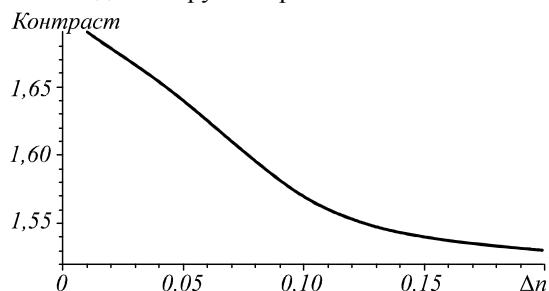


Рис. 4. Зависимость контраста  $S$  изображения от анизотропии  $\Delta n$  показателя преломления ЖК ( $\Phi_T = 90^\circ$ ,  $d = 6$  мкм,  $c = 1,1\%$ )

Зависимости ( $S$ ,  $T_{on}$ ) оптических характеристик ЖКМ от толщины  $d$  ЖК-слоя и концентрации  $c$  красителя повторяют аналогичные зависимости для ЖКМ с поляридом. Отличие заключается только в уровне контраста изображения, а объяснение поведения этих кривых точно такое же.

На рис. 5 представлена зависимость контраста изображения от угла  $\Phi_T$  закрутки планарной ЖК-структуры. Как видно, максимальный контраст изображения достигается при  $\Phi_T = 180^\circ$ . Это объясняется тем, что в состоянии «включено» пропускание ЖКМ практически не зависит от угла закрутки, так как значение управляющего напряжения существенно превышает пороговое. В состоянии «выключено» максимальное поглощение света соответствует  $\Phi_T = 180^\circ$ , так как этот угол закрутки соответствует всевозможным линейным состояниям поляризации света, которые могут быть по-

глощены молекулами красителя, ориентированными максимальной осью поглощения вдоль направления поляризации падающего излучения.

Как и для ЖКМ с поляроеидом, величина  $T_{on}$  не зависит от  $\theta_0$ , так как управляющее напряжение в этом состоянии существенно превышает пороговое значение и не зависит от угла  $\theta_0$  преднаклона. Зависимость  $C(\theta_0)$  слабо убывающая, так как пропускание в состоянии «выключено» в указанных пределах изменения угла преднаклона слабо растёт [9].

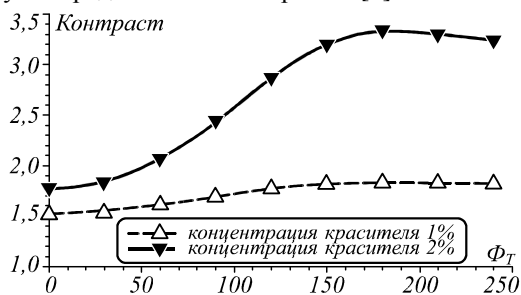


Рис. 5. Зависимость контраста  $C$  изображения от угла  $\Phi_T$  закрутки ЖК-структуры ( $\Delta n = 0,01, d = 6$  мкм)

Приведённые зависимости контраста  $C$  изображения и пропускания  $T_{on}$  от диэлектрической анизотропии  $\Delta\epsilon$  полностью повторяют такие же зависимости, как для ЖКМ с поляроеидом, только величина контраста  $C$  приблизительно в 2 раза ниже за счёт более высоких значений  $T_{off}$  пропускания.

В заключение этого раздела обсудим временные характеристики ЖКМ на основе планарной структуры. Динамика ЖКМ определяется в основном физическими параметрами конструкции и не зависит от наличия или отсутствия в конструкции поляризатора, поэтому все данные, приведённые ниже, относятся к обеим конструкциям ЖКМ. Основными конструктивными параметрами ЖКМ, которые существенным образом влияют на времена включения  $\tau_p$  и выключения  $\tau_{pl}$ , являются толщина  $d$  ЖК-слоя и отношение  $d/p_0$  [7, 9]. В соответствии с известными аналитическими зависимостями [9]  $\tau_p$  и  $\tau_{pl}$  возрастают с ростом толщины  $d$

$$\tau_p, \tau_{pl} \propto Gd^2,$$

где  $G$  – постоянная, которая для заданной величины управляющего напряжения зависит только от физических постоянных ЖК-вещества.

В силу этого ЖКМ с 4-микронной толщиной ЖК-слоя при прочих равных условиях быстрее (примерно в 2,5 раза) устройства с 6-микронной толщиной ЖК-слоя.

Влияние угла закрутки  $\Phi_T$  на время отклика ЖКМ представлено в табл. 1 только в виде качественной зависимости, так как для определения точных количественных связей необходим полный набор физических и технических параметров, которые для большинства устройств вообще неизвестны.

Влияние физических параметров ЖК-вещества на время отклика ЖКМ хорошо описывается известными аналитическими соотношениями [9]

$$\tau_p \propto \gamma / \Delta\epsilon, \tau_{pl} \propto \gamma / k,$$

где  $\gamma$  – коэффициент вязкости,  $k$  – средний коэффициент упругости ЖК-вещества. Поэтому для получения малых времён оптического отклика необходимо иметь ЖК-вещество с малой вязкостью и большим значением диэлектрической анизотропии и коэффициентов упругости.

Табл. 1. Качественная зависимость времени отклика ЖКМ от угла  $\Phi_T$  закрутки ЖК-структуры

$\Phi_T$ , град.	90	180	210	225	240
$\tau = \tau_p + \tau_{pl}$ , мс	195	195	195	250	300

### 2.3. ЖКМ на гомеотропной структуре без поляризатора

Как показали исследования, все функциональные зависимости оптических характеристик ЖКМ на эффекте «гость – хозяин» на основе гомеотропной структуры без поляризатора повторяют аналогичные зависимости ЖКМ на основе планарной структуры без поляризатора и имеют то же объяснение. Только следует иметь в виду, что в случае гомеотропной структуры роль угла  $\Phi_T$  закрутки структуры играет отношение  $d/p_0$ , и равновесный угол  $\Phi_T$  закрутки ЖК-структуры определяется соотношением:

$$\Phi_T = (d/\pi p_0)180.$$

Все функциональные зависимости оптических характеристик от физических и технических параметров ЖКМ на основе гомеотропной структуры представлены на рис. 6, 7 и 8.

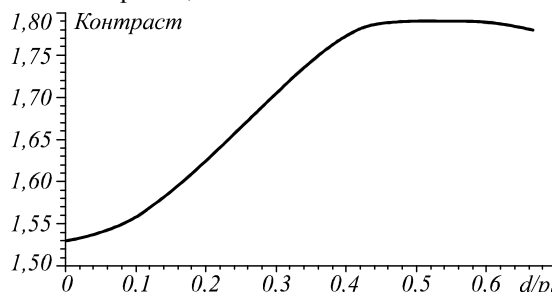


Рис. 6. Зависимость контраста  $C$  изображения от отношения  $d/p_0$  ( $\Delta n = 0,01, d = 6$  мкм,  $c = 1,1$  %)

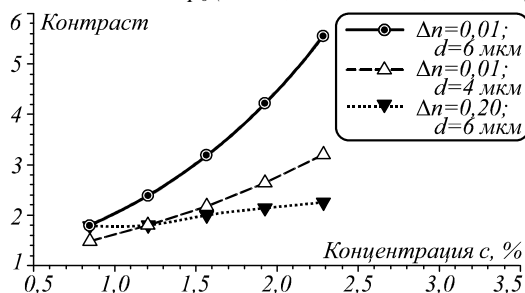


Рис. 7. Зависимость контраста  $C$  изображения от концентрации  $c$  красителя ( $\Delta n = 0,01, d = 6$  мкм,  $d/p_0 = 0,5$ )

### Заключение

На основе проведённого компьютерного моделирования оптических характеристик ЖКМ на эффекте «гость – хозяин» можно сделать следующие выводы.

1. При малых концентрациях ( $c \sim 1\%$ ) красителя ЖКМ с одним поляризатором имеет несущественные преимущества в оптических характеристиках по сравнению с неполяроидным ЖКМ.
2. При увеличении концентрации красителя до допустимо возможной ( $c \leq 3\%$ ) ЖКМ с одним поляризатором начинает существенно выигрывать в контрасте изображения по сравнению с неполяроидным ЖКМ. При этом во всех указанных случаях для увеличения контраста изображения следует использовать ЖК-структуру с углом закрутки  $180^\circ$ .
3. Для ЖКМ с поляризатором необходимо использовать ЖК с большим значением  $\Delta n$ . Для неполяроидного ЖКМ следует использовать ЖК с крайне малым значением  $\Delta n$ .
4. По оптическим характеристикам неполяроидный ЖКМ на основе планарной структуры не отличается от ЖКМ на основе гомеотропной структуры, только первый даёт негативное изображение, а второй – позитивное.
5. По оптическим характеристикам ЖКМ с тонкими ЖК-слоями ( $d \sim 4$  мкм) примерно в 1,5 раза хуже, чем с более толстыми слоями ( $d \sim 6$  мкм). При этом быстродействие первых выше быстродействия вторых примерно в 2 раза. Поэтому для максимизации быстродействия оптимально использовать ЖКМ с более тонкими ЖК-слоями при максимально возможных значениях концентрации красителя.

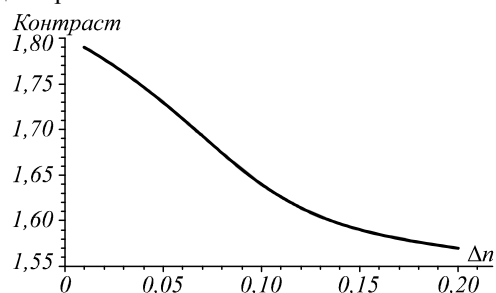


Рис. 8. Зависимость контраста  $C$  изображения от анизотропии  $\Delta n$  показателя преломления ( $c = 1,1\%$ ,  $d/p_0 = 0,5$ ,  $d = 4$  мкм)

#### Благодарности

Данная работа осуществлялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (грант № RFMEFI60414X0032).

#### Литература

1. **Bahman, Taheri** Adaptive Liquid Crystal Windows. Final technical report / T. Bahman – Kent: AlphaMicron, Inc., 2011. – 50 p.
2. Guest–host interaction in ferroelectric liquid crystal–nanoparticle composite system / Dharmendra Pratap Singh, Swadesh Kumar Gupta, Satya Prakash Yadav, P K Sharma, A C Pandey, Rajiv Manohar // *Bulletin Materials Science*. – 2014. – Vol. 37 (3). – P. 511–518. – ISSN 0250-4707.
3. **De Smet, Herbert** Curved Guest-Host LCD used as a dynamic artificial iris / Herbert De Smet, Jelle De Smet, Pieter De Backer, Pankaj Joshi, Esmā Islamaj, Xiaobing Shang and Dieter Cuypers [Электронный ресурс]. – 2014.

4. **Kim, Gi Heon** Plastic-based dye-doped guest-host liquid crystal displays / Gi Heon Kim, Won-Jae Lee, Na Young Han [Электронный ресурс]. – 2014. – URL: <http://plato.fea.ugent.be/firw/files/P114.033.pdf> (дата обращения 17.03.2015).
5. **Lueder, Ernst** Liquid Crystal Displays: Addressing Schemes and Electro-Optical Effects / Ernst Lueder – Chichester: John Wiley & Sons, 2010. – 516 p.
6. **Deng-Ke** Fundamentals of Liquid Crystal Devices / Deng-Ke, Yang Shin-Tson Wu – Chichester: John Wiley & Sons, 2014. – 592 p.
7. **Chigrinov, V.G.** Liquid crystal devices. Physics and applications / V.G. Chigrinov. – Boston-London: Artech House, 1999. – 359 p.
8. **Yakovlev, Dmitiy A.** LCD- design: universal system for computer simulation and optimization of electrooptical devices on the base of liquid crystal / D.A. Yakovlev, G.V. Simonenko, V.I. Tsoy, V.G. Chigrinov, N.A. Khokhlov, Yu.B. Pdyachev [Электронный ресурс]. – 2002. – URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=884283> (дата обращения 17.03.2015).
9. **Сухарнер, А.С.** Жидкокристаллические индикаторы / А.С. Сухарнер. – М.: Радио и связь, 1991. – 256 с.
10. Дисплеи / под ред. Ж. Панкова; пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 320 с. (Display Devices / Edited by J.I. Pankove. – Berlin: Springer-Verlag, 1980.)
11. **Симоненко, Г.** Оптические характеристики жидкокристаллических и биологических сред. / Г.Симоненко, В. Тучин, Д. Зимняков – Leipzig: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG., 2010. – 210 с.
12. **Симоненко, Г.В.** Анализ различных конструкций оптического жидкокристаллического затвора / Г.В. Симоненко // *Оптический журнал*. – 2014. – Т. 81, № 10. – С. 50 – 55.
13. Основы светотехники: учебник для вузов / А.Б. Пашлов, Р.М. Уварова, А.В. Чуркин – М.: Из-во МГУП, 2002. – 280 с.
14. **Чигринов, В.Г.** Универсальный комплекс ЭВМ программ для оптимизации проектирования жидкокристаллических дисплеев / В.Г. Чигринов, Г.В. Симоненко, Д.А. Яковлев, В.И. Цой, Н.А. Хохлов, Ю.Б. Подьячев // *Информат. Сер. Средства отображения информации / ВНИИ межотрасл. инф.* – 1993. – № 2. – С. 90–94.
15. The optimization of LCD electrooptical behavior using MOUSE – LCD software. / V.G. Chigrinov, G.V. Simonenko, D.A. Yakovlev, Yu.B. Podjachev // *Molecular Crystal Liquid Crystal*. – 2000. – Vol. 351. – P. 17 – 25. – ISSN 1542-1406.
16. **Симоненко, Г.В.** Метод вычисления углов ориентации оптической оси жидкого кристалла, находящегося во внешнем электрическом поле / Г.В. Симоненко, В.И. Цой, Д.А. Яковлев // *Компьютерная оптика*. – 2001. – № 21. – С. 88 – 99. – ISSN 0134-2452.
17. **Миронов, А.А.** Оптический отклик твист-индикатора при двумерной упругой деформации жидкого кристалла, вызванной электрическим полем, в зависимости от физических и конструктивных параметров устройства / А.А. Миронов, Г.В. Симоненко // *Компьютерная оптика*. – 2006. – № 30. – С. 74 – 80. – ISSN 0134-2452.
18. **Цой, В.И.** Тезисы докладов 5-й Конференции социалистических стран по жидким кристаллам: в 4 т. – Одесса: Из-во Одесского государственного университета, 1983. – Т. 2. – С. 84-84.
19. **Симоненко, Г.В.** Моделирование жидкокристаллических индикаторов на основе матриц когерентности и

- Джонса / Г.В. Симоненко, Д.А. Яковлев, В.И. Цой, А.Г. Финкель, Г.И. Мельникова // Электронная техника. Сер. 4. – 1988. – № 2. – С. 36-41.
20. **Сухарьер, А.С.** Особенности динамических характеристик ЖК-ячеек на STN-структуре / А.С. Сухарьер, И.С. Линькова, В.И. Цой, Г.В. Симоненко // Электронная техника. Сер. 4. – 1992. – № 4. – С. 9-11.
21. Dielectric stripes in pretilted supertwisted layers/ V.I. Tsoy, G.V. Simonenko, V.G. Chigrinov // Liquid Crystal. – 1993. – Vol. 13. – P. 227-231. – ISSN 0267-8292.
22. **Merck**, Merck prospect: Liquid Crystal Mixtures for Electro-Optic Displays / **Merck**, Darmstadt: Merck & Co, October 1994. – 50 p.
23. **Ivashchenko, A. V.** Dichroic Dyes for Liquid Crystal Displays / A.V. Ivashchenko – Boca Raton: CRC Press, 1994. – 236 p.
- Pleshko p, Sussman A. Display Devices. Edited by J.I. Pankove. Berlin: Springer-Verlag, 1980.
- [11] Simonenko G, Tuchin V, Zimnyakov D. Optical characteristics of liquid crystalline and biological media. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG.; 2010.
- [12] Simonenko GV. Analysis of various liquid-crystal optical-shutter designs. J Opt Tech 2014; 81(10): 594-8.
- [13] Shashlov AB, Uvarova RM, Churkin AV. Lighting engineering bases: The textbook for higher education institutions [In Russian]. Moscow: MGUP Publisher; 2002.
- [14] Chigrinov VG, Simonenko GV, Yakovlev DA, Tsoy VI, Khokhlov NA, Podyachev YuB. Computer universal complex of programs for optimization of designing of liquid crystal displays [In Russian]. Information. Series: Means of information display 1993; № 2: 90 -4.
- [15] Chigrinov VG, Simonenko GV, Yakovlev DA, Podjachev YuB. The optimization of LCD electrooptical behavior using MOUSE – LCD software Molecular Crystal Liquid Crystal 2000; 351: 17-5.
- [16] Simonenko GV, Tsoy VI, Yakovlev DA. Method of computation of orientation angles of an optical axis of the liquid crystal which is in an external electric field [In Russian] Computer Optics 2001; 21: 88-9.
- [17] Mironov AA, Simonenko GV. Optical response a twist indicator in case of the two-dimensional elastic deformation of a liquid crystal caused by an electric field depending on physical and design data of the device [In Russian]. Computer Optics 2006; 30: 74-80.
- [18] Tsoy VI. Theses of reports of the 5th conference of the Socialist countries on liquid crystals: in 4 volumes [In Russian]. Odessa: Publishing house of Odessa State University; 1983: 2; 84-4.
- [19] Simonenko GV, Yakovlev DA, Tsoy VI, Finkel AG, Melnikova GI. Simulation of liquid crystal indicators on the basis of matrixes of coherence and Johnes [In Russian]. Electronic Technique. Series 4 1988; 2: 36-4.
- [20] Sukharier AS, Linkova IS, Tsoy VI, Simonenko GV. Features of response characteristics of LCD cells on STN – structure [In Russian]. Electronic Technique. Series 4 1992; 4: 9-11.
- [21] Tsoy VI, Simonenko GV, Chigrinov VG. Dielectric stripes in pretilted supertwisted layers. Liquid Crystal 1993; 13: 227 - 231.
- [22] Merck. Merck prospect: Liquid Crystal Mixtures for Electro-Optic Displays. Darmstadt: Merck & Co, 1994.
- [23] Ivashchenko AV. Dichroic Dyes for Liquid Crystal Displays. Boca Raton: CRC Press; 1994.

### References

- [1] Taheri B. Adaptive Liquid Crystal Windows. Final technical report Kent: AlphaMicron, Inc., 2011.
- [2] Pratap SD, Kumar GS, Prakash YS, Sharma PK, Pandey AC, Rajiv M. Guest–host interaction in ferroelectric liquid crystal–nanoparticle composite system Bulletin Materials Science 2014; 37 (3): 511–518.
- [3] De Smet H, De Smet J, De Backer P, Joshi P, Islamaj E, Shang X, Cuypers D. Curved Guest-Host LCD used as a dynamic artificial iris. Source: (<http://hdl.handle.net/1854/LU-4358419>).
- [4] Kim GH, Lee WJ, Young HN. Plastic-based dye-doped guest-host liquid crystal displays. Source: (<http://plato.fea.ugent.be/firw/files/P114.033.pdf>).
- [5] Lueder E. Liquid Crystal Displays: Addressing Schemes and Electro-Optical Effects. Chichester: John Wiley & Sons; 2010.
- [6] Deng-Ke, Wu YST. Fundamentals of Liquid Crystal Devices. Chichester: John Wiley & Sons; 2014.
- [7] Chigrinov VG. Liquid crystal devices. Physics and applications. Boston-London: Artech House; 1999.
- [8] Yakovlev DA, Simonenko GV, Tsoy VI, Chigrinov VG, Khokhlov NA, Pdyachev YuB. LCD-design: universal system for computer simulation and optimization of electrooptical devices on the base of liquid crystal. Source: (<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=884283>).
- [9] Sukharier AS. Liquid crystal devices [In Russian]. Moscow: “Radio i svyaz” Publisher; 1991.
- [10] Channin DJ, Crandall RS, Criscimagna TN, Dalisa AL, Faughnan BW, Johnson EO, Nuese CJ, Pankove JJ,

## ANALYSIS OF OPTICAL CHARACTERISTICS OF VARIOUS DESIGNS OF A CLASSICAL “GUEST – HOST” LC MODULATOR

G.V. Simonenko<sup>1</sup>, S.A. Studentsov<sup>2</sup>, V.A. Ezhov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>N.G. Chernyshevskiy Saratov State University,

<sup>2</sup>Scientific and Production Enterprise “Photon” Ltd.,

<sup>3</sup>A. M. Prokhorov Institute of the General Physics of the RAS.

### Abstract

Using computer modeling, the analysis of optical characteristics of a “guest –host” liquid crystal (LC) modulator is conducted. In the article, classical LC modulator designs realized on the basis of a planar cell with various LC twist angles with and without polaroid are considered. Besides, a polaroid-free LC modulator design with homeotropic LC orientation is analyzed. Practical recommendations concerning finding optimum LC modulator designs for various specific purposes are made.

**Keywords:** computer simulation, optical characteristics, LC modulator, “guest – host” effect.

**Citation:** Simonenko GV, Studentsov SA, Ezhov VA. Analysis of optical characteristics of various designs of a classical “guest – host” LC modulator. Computer Optics 2015; 39(3): 376-4



**Сведения об авторах**

**Симоненко Георгий Валентинович**, 1960 года рождения, в 1983 году окончил Саратовский государственный университет (СГУ) им. Н.Г. Чернышевского по кафедре оптики. Профессор кафедры оптики и биофотоники СГУ им. Н.Г. Чернышевского. Область научных интересов: матричная оптика, оптика анизотропных неоднородных сред и биотканей, оптика систем отображения информации на жидких кристаллах.

E-mail: [gvsim1960@hotmail.com](mailto:gvsim1960@hotmail.com).

**Georgy Valentinovich Simonenko** (b.1960). In 1983 graduated from Optics department of Saratov State University. Professor of Optics and Biophotonics department of Saratov State University. Area of scientific interests: matrix optics, optics of the non-isotropic non-uniform mediums and biofabrics, optics of display systems of information on liquid crystals.

**Студенцов Сергей Александрович**, 1952 года рождения. В 1974 г. окончил физический факультет Саратовского государственного университета по специальности «оптика». В настоящее время заместитель директора НПП «Фотон». Научные интересы: жидкокристаллические дисплеи (исследования, разработка и внедрение в серийное производство).

E-mail: [lcspectrum@mail.ru](mailto:lcspectrum@mail.ru).

**Sergey Alexandrovich Studentsov** (b. 1952). Education of Physics department of Saratov State University, specialty "Optics", 1974. Presently is deputy director of Research and Production Enterprise "Photon". Research interests include liquid crystal displays (research, development and mass production organization).

**Ежов Василий Александрович**, 1953 года рождения, в 1974 окончил Московский институт электроники и математики по специальности «Квантовая электроника». Старший научный сотрудник института общей физики им. А.М. Прохорова РАН. Область научных интересов: разработка систем отображения и обработки информации.

E-mail: [ezhov@3dstereo.ru](mailto:ezhov@3dstereo.ru).

**Vasiliy Alexandrovich Ezhov** (b. 1953). In 1974 he graduated from the Moscow Institute of Electronics and Mathematics (MIEM) with a degree of "Engineer of Quantum Electronics". Senior research associate of the Institute of the General Physics of A.M. Prokhorov of the Russian Academy of Sciences. Area of scientific interests: development of systems of display and information processing.

---

*Поступила в редакцию 2 апреля 2015 г.  
Окончательный вариант – 6 июня 2015 г.*