

А. А. ВАСИЛЬЕВ, И. Н. КОМПАНЕЦ, А. В. ПАРФЕНОВ  
(Москва)

## ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИЗОБРАЖЕНИЙ: ПАРАМЕТРЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА

В последние годы достигнут значительный прогресс в области разработки и применения жидкокристаллических преобразователей изображений [1—3]. Эти многофункциональные и высокоэффективные оптоэлектронные приборы уже сейчас позволяют решать в реальном масштабе времени многочисленные задачи оптической обработки информации, а также хранения и отображения оптических сигналов. Данная работа представляет собой краткий обзор современного состояния в области исследования и разработки жидкокристаллических преобразователей изображений. Рассмотрены вопросы расширения их функциональных возможностей и указан ряд перспективных применений этих приборов в оптоэлектронных схемах обработки информации.

Конструктивно жидкокристаллические преобразователи изображений представляют собой многослойную структуру (рис. 1). Ее основными функциональными частями являются фоточувствительный (обычно полупроводниковый) и электрооптический (в данном случае жидкокристаллический) слои. Они располагаются между прозрачными электродами, к которым прикладывается переменное или импульсное напряжение.

По принципу действия эти преобразователи представляют собой пространственные модуляторы света, управляемые оптическим излучением, т. е. входным изображением [4, 5]. В соответствии с распределением интенсивности во входном изображении изменяются электрические свойства фотополупроводника и как следствие оптические свойства электрически последовательно соединенного с ним слоя жидкого кристалла (ЖК). В различных композициях ЖК, а также в зависимости от ориентации молекул ЖК в слое модуляция света может осуществляться

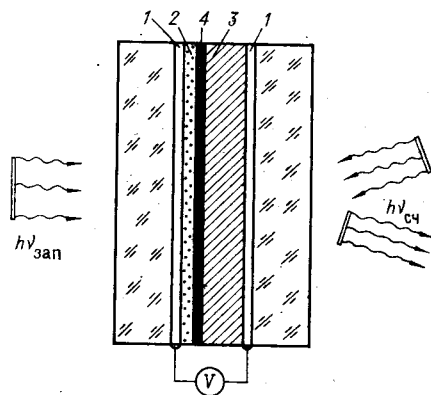
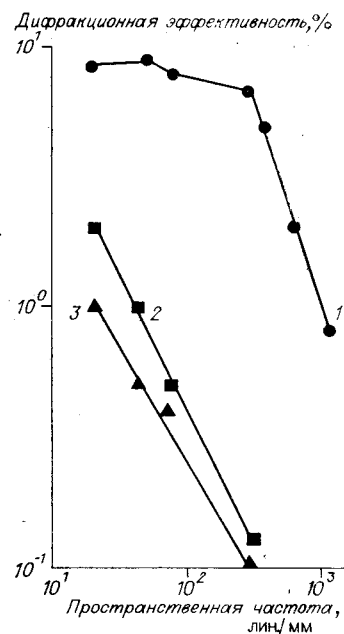


Рис. 1. Схема жидкокристаллического преобразователя изображений:

1 — прозрачные электроды; 2 — фотополупроводник; 3 — жидкий кристалл; 4 — диэлектрическое зеркало

Рис. 2. График функции передачи модуляции (кривая 1) преобразователя с кристаллом силикосилленина толщиной 800 мкм и смеси жидкого кристалла толщиной 3 мкм (диэлектрическая анизотропия 0,3): уровень шума на данной пространственной частоте при наличии входного сигнала (кривая 2) и в его отсутствие (кривая 3)



за счет изменения двулучепреломления слоя, его способности поворачивать плоскость поляризации света или рассеивать свет [5]. Прошедший через ЖК коллимированный световой пучок переносит (считывает) сформированное таким образом новое изображение, в общем случае преобразованное относительно входного по яркости, контрасту, длине волны, степени когерентности несущей и др.

Изображение стирается импульсом напряжения, а затем записывается другое с частотой смены изображений порядка сотен герц (чаще всего работают в телевизионном темпе) при напряжении питания не более 100 В (таблица). Скорость смены изображений здесь ограничена в основном процессами релаксации молекул ЖК, тогда как длительность регистрируемых световых импульсов (картин) может быть короче  $10^{-8}$  с.

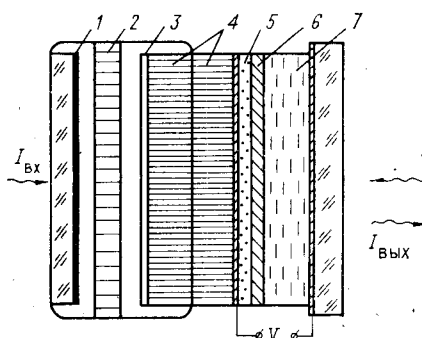
Число пространственно-разрешаемых элементов в изображении на рабочей апертуре прибора (обычно до  $30 \times 30$  мм<sup>2</sup>) достигает  $10^5 - 10^7$ . Важно, что высокая разрешающая способность сохраняется при достаточной большой эффективности использования модулируемого света (единицы и десятки процентов) и достигает  $100 - 300$  мм<sup>-1</sup> по полуспаду функции передачи модуляции [1, 3]. График функции (рис. 2), измеренной по голографической методике, иллюстрирует тот факт, что на уровне одного процента дифракционной эффективности модулятор с тонким слоем ЖК и высокоомным фотополупроводниковым кристаллом силикосилленита разрешает пространственные частоты до  $1000$  мм<sup>-1</sup>. В модуляторах с низкоомными полупроводниковыми кристаллами (например, кремнием), в которых существенно растекание носителей заряда, для сохранения разрешающей способности в  $30 - 50$  мм<sup>-1</sup> необходимо использовать режим возбуждения и считывания короткими световыми импульсами или питание высокочастотным ( $50 - 100$  кГц) напряжением [1, 6]. С другой стороны, в работе [7] такое же разрешение обеспечено при разделении поверхностного слоя кремниевой пластины на отдельные элементы (методом скрайбирования или создания в них встроенных диффузионных  $p - n$ -переходов). Последний вариант не приводит к ухудшению чувствительности преобразователя.

Спектральный диапазон чувствительности к экспонирующему изображению составляет  $0,3 - 1,3$  мкм и перекрывается преобразователями с разными фотополупроводниковыми слоями: силикосилленита, сульфида кадмия, селенида кадмия, фосфида индия, арсенида галлия, кремния. Это обеспечивает высокие значения чувствительности:  $10^{-7} - 10^{-11}$  Дж/см<sup>2</sup> или  $10^{-6} - 10^{-8}$  Вт/см<sup>2</sup> (по порогу оптического отклика) соответственно для импульсного и непрерывного излучения [1, 3]. Спектральный диапазон чувствительности может быть расширен далее в ИК- и микроволновую область при использовании вместо фотополупроводника пироэлектрических пленок или кристаллов [8], однако пока со значительной потерей чувствительности.

Возможно дальнейшее улучшение параметров модуляции света и расширение функциональных возможностей жидкокристаллических преобразователей изображений. Например, при сопряжении преобразователя с ЭЛТ или ЭОП через волоконно-оптический элемент (рис. 3) образуется комбинированный прибор с чувствительностью до  $10^{-11} - 10^{-12}$  Дж/см<sup>2</sup> и коэффициентом усиления яркости  $10^7 - 10^8$ , способный осуществлять в реальном масштабе времени обработку изображений [3]. Быстродействие жидкокристаллических преобразователей может быть увеличено до  $10^3 - 10^4$  кадр./с за счет использования комбинированных режимов питания и жидких кристаллов с низкочастотной дисперсией диэлектрической анизотропии [1, 3] или с сегнетоэлектрическими свойствами [9]. Жидкокристаллические преобразователи изображений позволяют осуществлять визуализацию и регистрацию изображений в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах, ввод их в оптические каналы хранения или обработки информации, усиление яркости изображений и проекционное их отображение на большой экран, в том числе с получением цветных изображений [1-5]. Использование в преобразовате-

Рис. 3. Схема комбинированного усилителя яркости изображений на основе ЭОПа и жидкокристаллического преобразователя:

1 — фотоэмиссионный катод; 2 — микроканальная пластина; 3 — люминесцентный экран; 4 — волоконно-оптический элемент; 5 — фотополупроводник; 6 — диэлектрическое зеркало; 7 — жидкий кристалл



лях специальных типов материалов обеспечило возможность динамического формирования ИК-полей с заданной конфигурацией в диапазоне длин волн 0,6—14,0 мкм при управлении с помощью оптических сигналов видимого спектра.

При необходимости непосредственно в преобразователях могут выполняться операции сложения и вычитания изображений, локальное по апертуре стирание записанной информации, выделение границ объектов и нестационарных (движущихся или мерцающих) частей в изображениях [1, 3, 10]. Эти функциональные свойства основываются на изменении зарядового рельефа на границе между фоточувствительным и жидкокристаллическим слоем в условиях накопления зарядов, подачи стирающего высокочастотного напряжения, задания соответствующей ориентации молекул ЖК, а также на использовании контактных явлений.

Последовательное соединение по электрическому и оптическому каналам фоточувствительного и электрооптического слоев в преобразователе обеспечивает фотоэлектрическую обратную связь [1, 3, 11—13]. В результате при прохождении только одного (экспонирующего) светового пучка через оба слоя в зависимости от уровня интенсивности во входном изображении обеспечиваются два устойчивых состояния пропускания света («закрыто» или «открыто»), соответствующие двум конечным ориентациям оптической оси слоя ЖК. Так реализуется пространственный бистабильный модулятор. Если оба указанных слоя заключены в интерферометр Фабри — Перо (рис. 4), то модулятор имеет несколько устойчивых уровней пропускания. Рассмотренные пространственные модуляторы с бистабильной или многостабильной характеристикой пропускания гистерезисного типа представляют интерес как по-

Характеристики жидкокристаллических преобразователей изображений

Характеристики модуляции света	Структуры поликристаллический фотопроводник — ЖК	Структуры с полупроводником			
		Силико-силениит	Сульфид кадмия	Арсенид галлия	Кремний
Область чувствительности, мкм	0,3—0,5	0,3—0,45	0,4—0,55	0,5—0,9	0,4—1,1
Чувствительность по максимально возможному уровню оптического отклика:					
энергетическая, Дж/см <sup>2</sup>	2·10 <sup>-6</sup>	5·10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	2·10 <sup>-8</sup>
по интенсивности, мкВт/см <sup>2</sup>	100	30	0,6	0,5	30
максимальный оптический контраст	100	100	100	100	100
максимальная эффективность	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Разрешение (по полуспаду ЧКХ), лин/мм	350	400	110	50—80	20—30
Питающее напряжение, В	30	100	100	100	100
Минимальное время включения, мс	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Минимальное время выключения, мс	1—2	1—2	1—2	1—2	1—2
Минимальное время цикла, мс	1—3	1—3	1—3	1—3	1—3
Максимальное время памяти, с	1—2	1—2	1—2	1—2	1—2
Способ стирания					

Высокочастотным электрическим полем

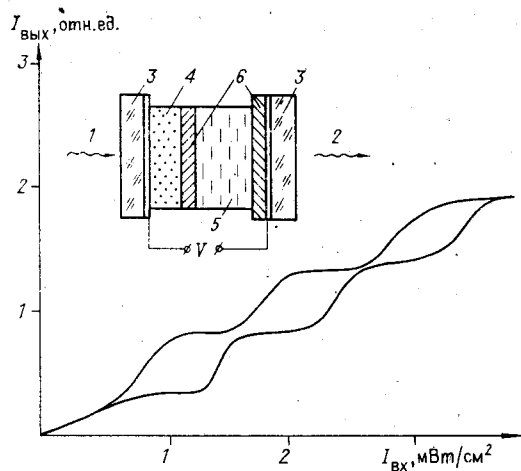


Рис. 4. Преобразователь изображения с жидким кристаллом в интерферометре Фабри — Перо и график его пропускания в зависимости от интенсивности падающего света: 1 — падающий свет; 2 — прошед- 1 — падающий свет; 2 — прошед- ки; 4 — фотопроводник; 5 — жидкий кристалл; 6 — зеркало

тенциальные многоканальные логические оптические элементы и приборы, способные выделять уровни интенсивности в анализируемых изображениях.

Перспективно применение жидкокристаллических преобразователей изображений в интерферометрии. В частности, такой прибор был употреблен в схеме спекл-интерферометра для получения экспресс-информации о параметрах колебаний пластины [14]. Фазовые модуляторы могут быть использованы для коррекции волновых фронтов в устройствах адаптивной оптики, в том числе в адаптивных интерферометрах для измерения малых деформаций, перемещений и колебаний удаленных объектов [15]. Новые возможности улучшения качества изображений дает применение преобразователей в качестве динамической голограммы в схеме обращения волнового фронта [16]. Недавно был обнаружен эффект перефокусировки оптической системы, включающей фазовый жидкокристаллический модулятор [17]. Он заключается в образовании на выходе системы двух изображений, расположение которых относительно плоскости геометрического изображения может изменяться в зависимости от параметров модулятора и интенсивности экспозиции. Эффект обусловлен созданием на границах освещенного и неосвещенного участков в слое ЖК оптических линз и может быть использован в задачах перефокусировки оптических, в том числе фотографических, систем и анализа изображений.

Весьма плодотворной областью использования жидкокристаллических преобразователей изображений является обработка и распознавание изображений в реальном масштабе времени. Известно множество когерентно-оптических схем для спектрального и корреляционного анализа, в которых жидкокристаллические преобразователи выполняют роль устройств ввода информации и перестраиваемой фильтрации, в том числе динамических согласованных фильтров и регистрирующих сред [1—5]. Наиболее широко представлены схемы обработки и распознавания телевизионных изображений и радиолокационных сигналов. В последнем случае весьма эффективно использование преобразователей с ПЗС-фоточувствительной матрицей [2].

На практике следует учитывать, что корреляторы на основе схем Ван дер Люгта и совместного преобразования входного и эталонного изображений критичны к изменению угла ориентации и масштаба входного изображения относительно эталонного. Известные предложения [18] по использованию в корреляторах преобразований координат оказываются с этой точки зрения малоэффективными, и поиск путей преодоления указанного ограничения продолжается. В частности, представляется перспективным метод распознавания, основанный на выделении в изображениях признаков симметрии [19]. Для этого используется то свойство симметричных фигур, что они совпадают сами с собой при выпол-

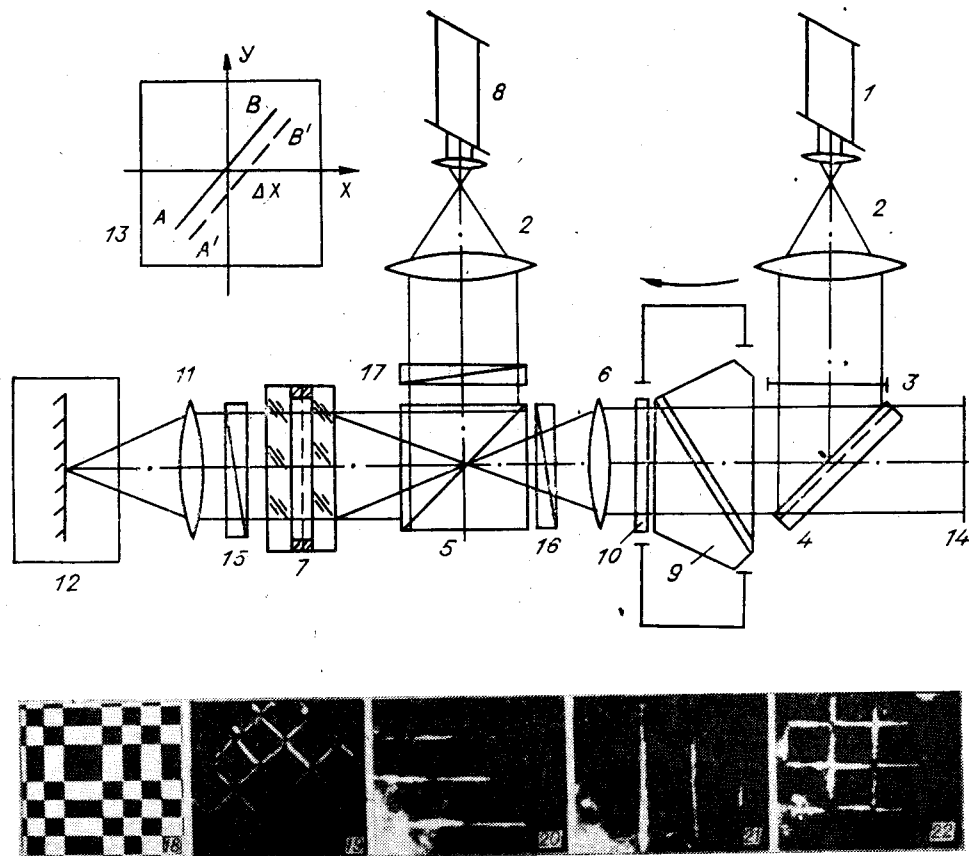


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для выделения прямых линий в изображениях:

1 — гелий-кадмиевый лазер; 2 — расширитель светового пучка; 3 — слайд с входным (анализируемым) изображением; 4 — селективное зеркало; 5 — расщепитель; 6, 11 — проекционные линзы; 7 — преобразователь изображения; 8 — гелий-неоновый лазер; 9 — вращающаяся призма; 10 — четвертьволновая пластинка; 12 — оптическая схема преобразования (показана условно); 13 — прямые линии во входном и трансформированном изображениях; 14 — выходная плоскость; 15—17 — поляризаторы; 18 — входное изображение; 19 — выделение контуров в изображении на выходе преобразователя изображений; 20—22 — выделенные прямые линии и центр симметрии

нении над ними преобразований (сдвиг, поворот, зеркальное отражение и др.), соответствующих их симметрии. Опознаваемое изображение преобразуется в жидкокристаллическом преобразователе и простой оптической схеме (рис. 5), а затем преобразованное изображение сравнивается с исходным с целью выделения в них совпадающих фрагментов. В результате на выходе схемы появляются только объекты и детали, инвариантные к преобразованиям симметрии. Далее они регистрируются и анализируются с помощью ЭВМ, которая осуществляет и управление всем оптико-электронным комплексом. Проведены эксперименты по выделению симметричных фигур в бинарных изображениях с использованием жидкокристаллического преобразователя, выполнявшего функции ввода изображений, выделения в них контуров и сравнения оконтуренного изображения с преобразованным по признаку симметрии. Отсутствие жесткого эталона делает предложенный метод нечувствительным к изменению масштаба и ориентации распознаваемых объектов. Поскольку большинство изображений, подлежащих распознаванию, содержат имеющие определенную симметрию детали или черты, данный метод может найти применение при решении многих практически важных задач распознавания образов в навигации, робототехнике, в автоматизированных системах классификации и поиска и т. п.

**Заключение.** Разработанные к настоящему времени жидкокристаллические преобразователи изображений обладают целым рядом рекордных для данного класса приборов параметров таких, как чувствительность к экспонирующему излучению (доли мкВт/см<sup>2</sup>), быстродействие (частота смены изображений до сотен герц) и разрешающая способность (до 1000 пар лин/мм). Такие характеристики позволяют создавать на их основе новые типы эффективных систем визуализации, отображения и обработки изображений.

- sing // Laser Focus.— 1983.— N 10.— P. 111—120.
3. Vasiliev A. A., Kompanets I. N., Parfenov A. V. Advances in development and applications of optically-controlled liquid crystal space light modulator // Optik.— 1984.— Bd 67, N 3.— S. 223.
  4. Касасент Д. Пространственные модуляторы света // ТИИЭР.— 1977.— Т. 65, № 1.
  5. Компанец И. Н. Управляемые транспаранты // Зарубеж. радиоэлектрон.— 1977.— № 4.
  6. Думаревский Ю. Д., Ковтонюк Н. Ф., Компанец И. Н. и др. Структура металл — диэлектрик — полупроводник — жидкий кристалл: влияние параметров управляющих сигналов на характеристики пространственной модуляции света // Квантовая электрон.— 1984.— Т. 11, № 4.
  7. Efron U., Broatz P. O., Little M. J. e. a. Silicon liquid crystal light valves status and issues // Opt. Eng.— 1983.— V. 22, N 6.— P. 682—686.
  8. Вaшуpин П. В., Дepгачев В. И., Компанец И. Н. и др. Пространственно-временной модулятор света на основе структуры «пироэлектрик — жидкий кристалл». — М., 1985. (Препринт/АН СССР, ФИ; 248).
  9. Clark N. A., Lagerwall S. T. Submicrosecond bistable electrooptic switching in liquid crystals // Appl. Phys. Lett.— 1980.— V. 36, N 11.— P. 899—901.
  10. Парфенов А. В., Компанец И. Н., Попов Ю. М. Пространственная модуляция света в высоко разрешающих структурах МДП с жидким кристаллом // Квантовая электрон.— 1980.— Т. 7, № 2.
  11. Васильев А. А., Компанец И. Н., Парфенов А. В. Бистабильные свойства жидкокристаллической ячейки с обратной связью // Микроэлектроника.— 1980.— Т. 9, вып. 1.
  12. Компанец И. Н., Парфенов А. В., Попов Ю. М. Многостабильность в оптическом пропускании пространственного модулятора света с внешней обратной связью // Микроэлектроника.— 1981.— Т. 10, вып. 4.
  13. Kompanets I. N., Parfenov A. V., Popov Yu. M. Bistable properties of spatial light modulator with internal feedback // Opt. Comm.— 1981.— V. 36, N 5.— P. 415—416; Multistability in optical transmittance of spatial light modulators with internal feedback // Opt. Comm.— 1981.— V. 36, N 5.— P. 417—418.
  14. Takemory T., Ueha S., Tsujiuchi J. Real-time in plane vibration measurement by speckle interferometry with the aid of liquid crystal light valve // Opt. Comm.— 1980.— V. 32.— P. 24—27.
  15. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики.— М.: Наука, 1985.
  16. Gabriyan O. V., Kompanets I. N., Parfenov A. V. e. a. Optical phase conjugation by microwatt power of reference wave via liquid crystal light valve // Opt. Comm.— 1981.— V. 38, N 1.— P. 67—70.
  17. Думаревский Ю. Д., Ковтонюк Н. Ф., Компанец И. Н. и др. Эффект перефокусировки: механизм формирования изображения в оптических схемах с фазовым пространственным модулятором света // Краткие сообщения по физике.— 1984.— № 8.
  18. Касасент Д., Псалтис Д. Новые методы оптических преобразований для распознавания образов. // ТИИЭР.— 1977.— Т. 65, № 1.
  19. Vasiliev A. A. Recognition of symmetrical patterns in images. // 7th Intern. Conf. on Pattern Recognition, v. 2.— Monreal (Canada); IEEE Computer Society Press.— 1984.— P. 1027—1029.

Поступила в редакцию 11 июня 1985 г.