

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 771.36

ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА НА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ ДЛЯ ЗАЩИТЫ НАБЛЮДАТЕЛЯ ОТ СЛЕПЯЩИХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2004 г. М. Г. Томплин*, доктор техн. наук; В. В. Данилов**, доктор физ.-мат. наук

* ВНИИ "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова". Санкт-Петербург

** НИИ лазерной физики. Санкт-Петербург

Рассмотрены ослабители света на электрооптических и нелинейных оптических эффектах в нематических, немато-хиральных и сегнетоэлектрических жидкокристаллических системах, предназначенные для защиты глаз наблюдателя от слепящих воздействий. Обсуждены характеристики ослабителей, работающих как по всему полю зрения, так и с локальной модуляцией.

Коды OCIS: 140.3360, 230.0230.

Поступила в редакцию 06.06.2003.

Введение

Для наблюдательных приборов (телескопов, биноклей, дальномеров, визиров, прицелов, микроскопов и др.) и регистрирующих устройств (теле-, фото-, кино- и видеоаппаратуры) актуальна защита глаз наблюдателя или фотоприемника от слепящих объектов или мощных источников излучения. Особенно нежелательны внезапные световые воздействия, возникающие, например, при сварочных работах, лазерных засветках и управлении транспортными средствами, когда слабо освещенные объекты наблюдаются на фоне слепящих. Наибольшую опасность представляет повреждение сетчатки глаза. Характер повреждения зависит от длины волны, энергии, длительности, размера и зоны воздействия светового импульса. Для импульсного лазерного излучения с малым сечением пучка и длительностью импульса 10^{-9} с допустимая пороговая мощность составляет 1–2 мкДж, а импульсы с длительностью более 10^{-9} с приводят к ожогам сетчатки [1].

Первоначально для защиты глаз использовались статические ослабители: закопченные стекла, цветные или нейтральные фильтры, поляризационные очки, снижающие яркость источников на постоянную величину независимо от уровня и распределения освещенности в поле зрения. Они обеспечивают ослабление воздействия, но создают дискомфорт при его отсутствии из-за низкого контраста слабо освещенных объектов.

Этого недостатка лишены динамические ослабители, заменившие статические: они включаются пороговым устройством, настроенным на определенный уровень освещенности. Известны динамические ослабители на основе фотохромных стекол,

электрооптической керамики и жидких кристаллов (ЖК) [2]. Инерционность фотохромных стекол [3] и потребность в высоковольтных источниках для сегнетокерамики [4] дают преимущество ослабителям на основе жидкокристаллических элементов (ЖКЭ).

Обозначившийся в последнее время интерес к проблеме светового ограничения вызван появлением новых сред с нелинейными оптическими эффектами. Для них характерно резкое падение прозрачности при росте интенсивности воздействующего излучения. Такими эффектами являются нелинейное поглощение, обусловленное протекающими в возбужденном состоянии фотореакциями, и изменение траектории пучка, вызванное индуцированным искажением фазового профиля системы (самодифракция, вынужденное рассеяние, самодефокусировка). Перспективны примесные ЖК, проявляющие нелинейные свойства в мезофазе, твердых пленках и пористых структурах. Они имеют более низкие пороги возникновения нелинейных эффектов, чем все известные нелинейные материалы [5].

Динамические ослабители на основе ЖК с модуляцией излучения по всему полю зрения

Первые динамические ослабители на ЖК использовали твист-эффект [6], характеризующийся большим быстродействием по сравнению с фотохромными стеклами и меньшей величиной управляющего напряжения по сравнению с сегнетокерамикой. На основе твист-эффекта изготовлен ряд светозащитных шлемов для сварки (рис. 1а), характеристики которых приведены в табл. 1. Принцип работы показан

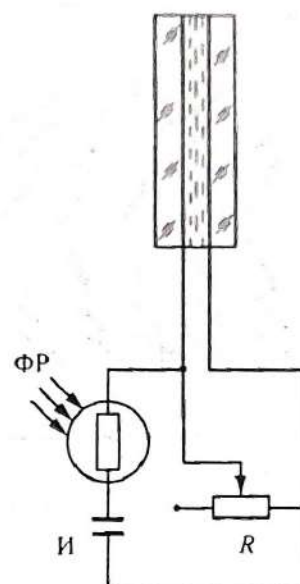
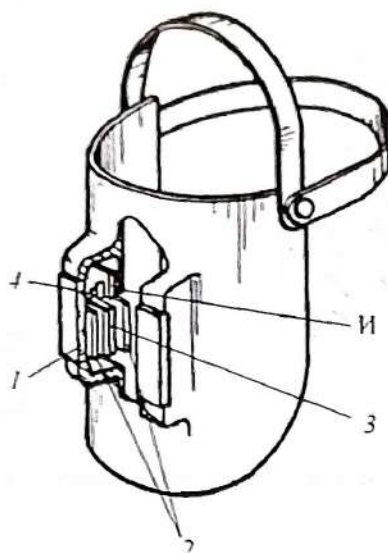


Рис. 1. а – шлем для сварки фирмы “Тесла” на основе ЖКЭ с твист-эффектом, осуществляющим модуляцию излучения по всему полю зрения; б – основные элементы: 1 – защитное стекло, 2 – поляризаторы, 3 – ЖКЭ, 4 – фоторезистор ФР. И – источник питания; в – схема управления.

на рис. 1б. 1в. Светозащитный блок содержит защитное стекло 1, поляризаторы 2, ЖКЭ 3, фоторезистор 4 и источник питания 5. Схема управления состоит из источника питания И, фоторезистора ФР и переменного сопротивления R для регулировки яркостного порога включения ЖКЭ.

Недостатками устройств являются невысокое быстродействие и модуляция не селективно слепящих источников, а всего поля зрения. Их можно устранить использованием быстродействующих модуляторов и устройств с локальной модуляцией излучения.

Быстродействующие модуляторы на основе π -ячейки и эффекта деформации спирали геликоида

Наибольшим быстродействием обладают π -ячейки и ячейки с эффектом деформации спирали геликоида.

В π -ячейке углы наклона молекул ЖК на верхней и нижней подложках имеют противоположное направление (рис. 2) [9]. Это увеличивает симметричный угол обзора и уменьшает обратный поток ЖК.

Таблица 1. Основные характеристики сварочных масок различных фирм

Параметр	“Спидглас”, “Хёрнелл”, Швеция	“Соларматик”, “Оптел”, Швейцария	“Тесла”, Чехословакия	“Хамелеон”, ИЛит, Россия [7]	НИИ “Волга”, Россия [8]
Размер светового окна, мм	110×48 90×12 150×175	95×40	92×35	94×42	99×47
Глубина модуляции, ед. DIN	5–13	7–13	5–10 (11)	8–14	9–13
Исходное светопропускание, %					
$\lambda = 212\text{--}365$ нм		$< 3.5 \times 10^{-6}$		$< 1 \times 10^{-4}$	
780–1400 нм		$< 6 \times 10^{-3}$		$< 1 \times 10^{-2}$	3×10^{-2}
400–650 нм		$< 6 \times 10^{-3}$		$< 8 \times 10^{-3}$	
Время срабатывания, мс					
при -5°C	1.4	8		1.5	
23 $^\circ\text{C}$	0.9	2		0.5	1
55 $^\circ\text{C}$	0.6	< 1		0.3	0.3
Температурный диапазон, $^\circ\text{C}$	$-5 \dots +65$	$-5 \dots +65$	$+10 \dots +50$	$-5 \dots +55$	$-5 \dots +55$
Вес ЖК-модулятора, г	450 (650)	390		400 (500)	
Напряжение питания, В	12		9	3	9

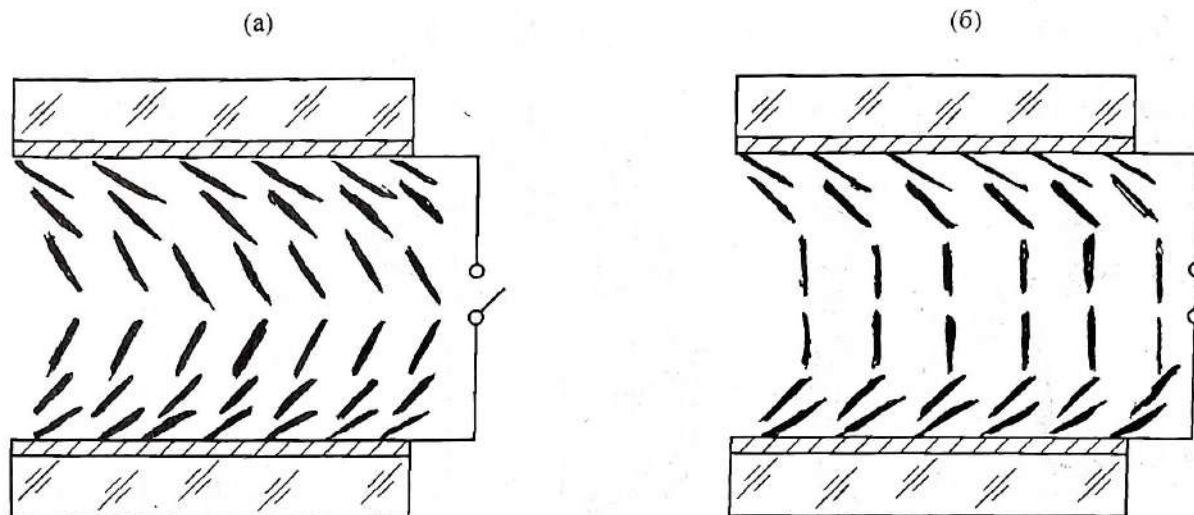


Рис. 2. Схема π -ячейки с антипараллельными наклонами молекул на границе с подложкой. а – $U = 0$; б – $U > U_{\text{н}}$.

Последнее обстоятельство способствует повышению быстродействия. Так, при комнатной температуре получены времена переключения 1–1,5 мс. В настоящее время в НИИ “Волга” (Саратов) ведутся работы по созданию “пушпульных” π -ячеек [10]. Такая ячейка содержит два ЖК-слоя со взаимно ортогональными направлениями ориентации молекул, причем один из слоев является идеальным оптическим компенсатором для другого, в том числе и для случая одновременной релаксации. Это значит, что время переключения пушпульной системы равно времени реакции одинарного слоя. Быстродействие таких ЖК-модуляторов составляет 0,2–0,5 мс при контрастном отношении 50:1 [11]. Триплексный

модулятор с центральной пластиной, общей для обоих слоев, при размере диагонали 36 см имеет контрастное отношение 75:1 и быстродействие менее 0,1 мс.

Другой тип быстродействующих модуляторов основан на эффекте деформации спирали геликонда сегнетоэлектрических ЖК (С*ЖК) [12]. Двухлучепреломление наводится за счет деформации спирали геликонда, когда толщина ячейки (d) много больше шага геликонда (P_0) (рис. 3).

Время отклика $\tau = Y_{\varphi} P_0^2 / k_{11} \pi^2$ (где Y_{φ} – вращательная вязкость, k_{11} – константа упругости) составляет 100–200 мкс при напряжении питания ~1 В. Оно не зависит от величины поля и характера поляризации.

Наиболее быстродействующим из всех электрооптических эффектов в ЖК является электроклинный эффект в С*ЖК [13]. Он состоит в изменении угла наклона молекул (Θ) в электрическом поле и характеризуется линейной зависимостью $\Theta = e_c E$, где $\Theta_{\text{max}} = 11,25^\circ$, e_c – электроклинный коэффициент.

Время отклика $\tau_{\Theta} = \frac{Y_{\Theta}}{A}$ не зависит от величины поля и составляет ~0,6–5 мкс. Электроклинный эффект имеет сильную зависимость Θ от температуры и низкий контраст. Рассмотренные эффекты претендуют на использование в устройствах защиты от слепящих источников.

Динамические ослабители на основе ЖКЭ с локальной модуляцией

Обычно требуется ослаблять интенсивность излучения слепящих источников, в то время как другие объекты желательно не затемнять. На рис. 4 приведен пример решения этой задачи [14]. Противоослепляющие очки содержат пару фильтров 1, размещенных в оправе 5. Каждый фильтр представляет собой

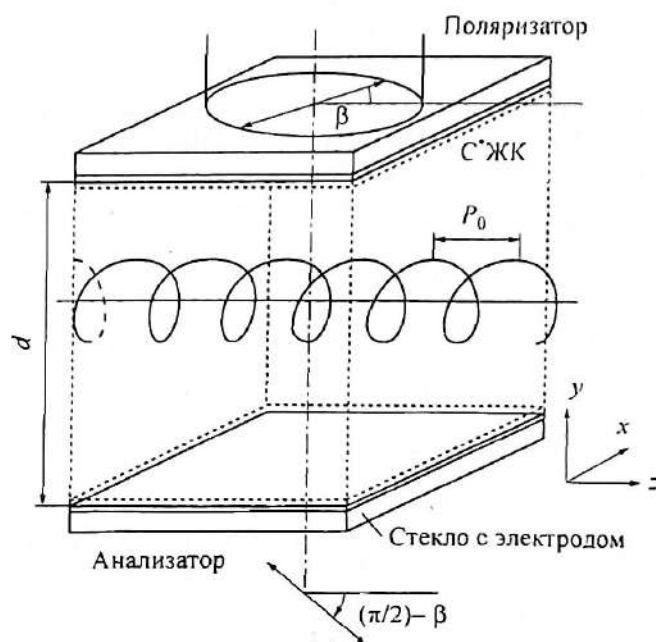


Рис. 3. Схема ячейки с эффектом деформации спирали геликонда С*ЖК.

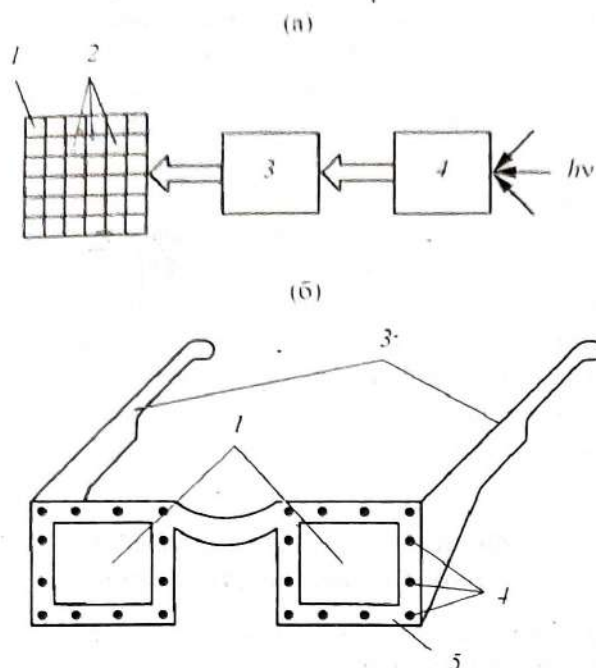


Рис. 4. Матричные очки на ЖК с локальной модуляцией излучения [14]. а – принципиальная электронная схема; б – наружный вид: 1 – фильтр, 2 – матрица ЖК-элементов, 3 – блок управления, 4 – фотоприемники, 5 – оправа.

матрицу ЖКЭ 2. Блок управления 3 контролирует работу каждого ЖКЭ в зависимости от сигналов фотоприемников 4, расположенных на оправе 5. Чем выше освещенность на каком-либо из фотоприемников, тем больше ослабление на ближайшем по расположению ЖКЭ. Устройство является простым, но технически не обеспечивает защиту наблюдателя от слепящих источников при их относительном движении. Для эффективного решения задачи были разработаны автоматические защитные очки с локальной модуляцией излучения, основанные на использовании в схеме пространственно-временного модулятора света (ПВМС). Подбором рабочего напряжения ПВМС настраивают на пороговую освещенность, выше которой осуществляется локальная модуляция света. При этом остальные зоны остаются незатемненными. ПВМС может содержать прозрачные для определенных длин волн или непрозрачные фотопроводники. Это определяет особенности устройств, работающих на просвет или отражение [15].

Оптические системы с ПВМС, работающие на просвет

На рис. 5 показана оптическая схема защитных очков с локальным автоматическим ослаблением интенсивности излучения. Это бинокулярная телескопическая система прямого изображения с однократным увеличением, состоящая из объектива 1, пентапризмы 2, коллективной линзы 3, ПВМС 4,

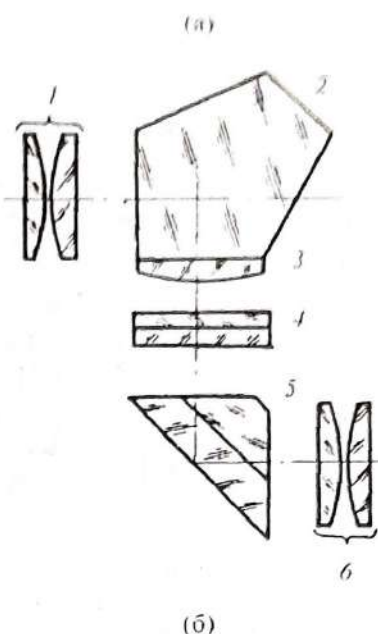


Рис. 5. Оптическая схема и общий вид светозащитных очков с локальным ослаблением интенсивности излучения. 1 – объектив, 2 – пентапризма, 3 – коллективная линза, 4 – ПВМС на основе ЖК, 5 – прямоугольная призма, 6 – окуляр.

прямоугольной призмы 5 и окуляра 6 [2]. ПВМС располагается в фокальной плоскости объектива телескопической системы. Фотопроводниками были монокристаллические слои GaP, а также монокристаллические и поликристаллические слои ZnSe [16, 17]. Использовался ЖК807 с оптически активными добавками на основе производных l-ментола и тигогенинкапропата [2], а также нематическая смесь ЖК1282 разработки НИИОПик [17]. Основные параметры смеси: $\Delta\epsilon = 9,9$; $\Delta n = 0,189$.

Исследования макетного образца подтвердили эффективность принципа, но выявили два недостатка. Во-первых, использование двух ПВМС превысило допустимую стоимость для массового коммерческого продукта. По сведениям фирмы "Meadow Lark Optics" (США) стоимость одного ПВМС в конце 90-х годов составляла 9500 долларов США. К тому же разброс параметров не обеспечивал без регулировки идентичности модуляции для левого и правого глаза по быстрдействию и контрасту. Во-

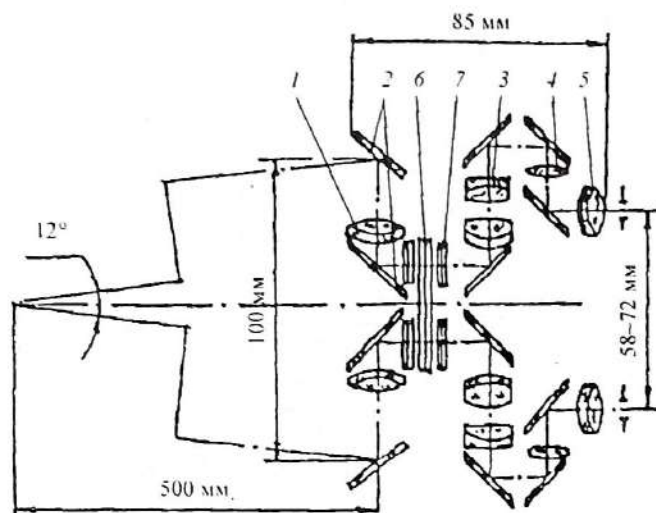


Рис. 6. Модификация оптической схемы модулятора с одним ПВМС, работающим на просвет. 1 – объектив, 2 – система зеркал, 3 – линзовая оборачивающая система, 4 – линза, 5 – окуляр, 6 – ПВМС, работающий на просвет на два оптических канала, 7 – поляризаторы.

вторых, твист-эффект не обладает нужным быстродействием, что вызывает ослепление наблюдателя в первый момент вспышки и послеракурсовый смаз при движении слепающего объекта.

В новой модификации очков идентичность работы каналов обеспечивается одним ПВМС (рис. 6). Для создания прямого изображения оптическая схема построена по принципу зрительной трубы и содержит объектив 1, систему зеркал 2, линзовую оборачивающую систему 3, линзы 4 и окуляр 5. ПВМС, работающий одновременно на два канала, располагается в фокальной плоскости объектива 1 между полярида-

ми 7. Схема позволила исключить пентапризму, облегчить конструкцию и уменьшить габариты.

Повышение быстродействия почти на порядок достигается использованием С*ЖК с эффектом электрически деформируемого геликоида, когда при превышении порогового напряжения полностью раскручивается спираль [18, 19]. Оптическую ось С*ЖК в раскрученном состоянии совмещают с направлением плоскости поляризации поляризатора, а анализатор повернут на угол $\pi/2$. Основные характеристики ПВМС с различными типами фотопроводников, используемых для работы на просвет и на различных эффектах в ЖК, приведены в табл. 2 [20].

Оптические системы с ПВМС, работающие на отражение

Для надежной защиты глаз наблюдателя от незапного воздействия лазерного излучения по соображениям безопасности более предпочтительны ПВМС, работающие на отражение. Примером служит схема, содержащая объектив 1, волоконно-оптический конвертор 2, ПВМС 3, работающий на отражение, и полупрозрачное зеркало 4 [21] (рис. 7). Все элементы размещены на шлеме 5. ПВМС содержит фотопроводник 6 на основе кремния и диэлектрическое зеркало 7 [22]. Объектив 1 фокусирует излучение на слой 6 и формирует электростатический рельеф, который визуализируется слоем НЖК и считывается от внешнего излучения.

Недостатками системы являются искусственность в изображении наблюдаемых сцен, формируемых дополнительным источником, и значительные габариты и вес. Последнее обстоятельство может

Таблица 2. Основные характеристики просветных ПВМС с различными типами фотопроводников

Параметр	Монокр. ZnSe	Поликр. ZnSe	Поликр. ZnSe	Поликр. ZnSe	Полимер. ФП
Тип ЖК	ПЖК	ПЖК	С*ЖК	С*ЖК	С*ЖК
λ , запущен, нм	530	530	белый		
λ , считывания, нм	633 (белый)	633 (белый)	белый		
Порог светочувств., Вт/см	10^{-7}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}
Дифракц. эффект, $\eta_{\max}, \%$	10	10	—		30
Разрешение при $\eta = 0,1 \text{ мкм}^{-1}$	> 100	150	> 100	при 50 Гц	100
$0,5 \text{ мкм}^{-1}$	40	45	40	70	
Время включения, мс	10	20	2		
Время выключения, мс	20	100–500	20		
Контраст	100:1	100:1	100:1	$> 100:1$	
Эффект	S-эффект	S-эффект	SSFLC	DHP	DHP
Режим управления	Синусоидальный	Пост. напр.	Менандр	$\pm 20 \text{ В}$, 0–200 Гц	

* Подполикристаллический ZnSe – нанопленка в квазизамкнутом объеме квазиморфная структура, обеспечивающая работу ПВМС в большей части видимого диапазона длин волн и позволяющая согласовать работу с С*ЖК по всем параметрам.

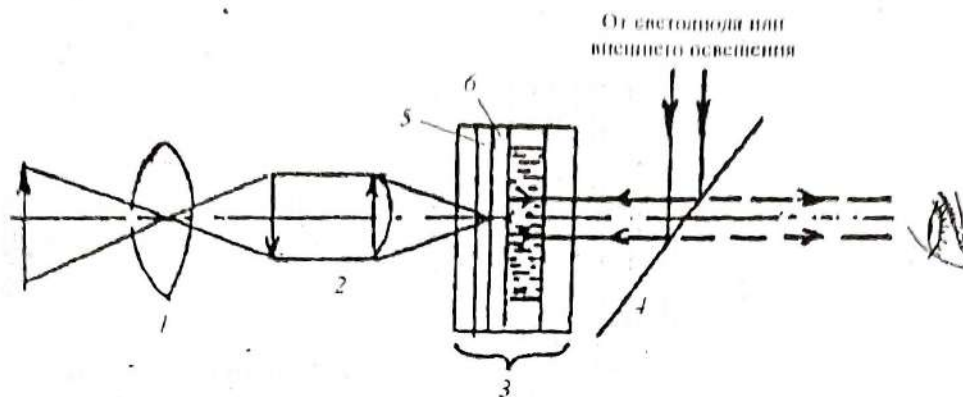


Рис. 7. Оптическая система, работающая на отражение. 1 – объектив, 2 – волоконно-оптический конвертор, 3 – ПВМС, работающий на отражение, 4 – полупрозрачное зеркало, 5 – фотопроводниковый слой, 6 – диэлектрическое зеркало [22].

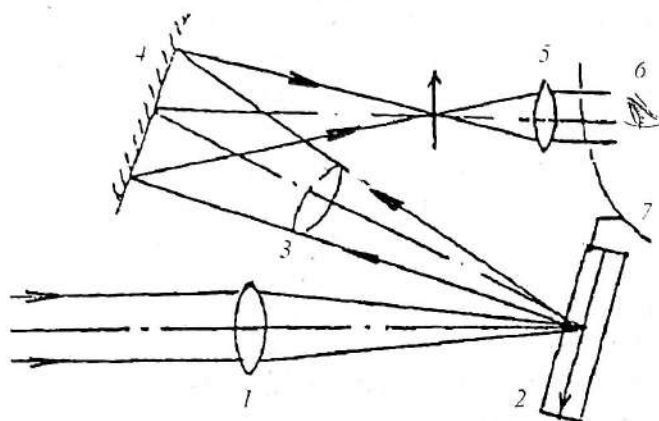


Рис. 8. Модифицированная схема со "свернутой оптикой". 1 – объектив, 2 – ПВМС, размещенный на шлеме; 3 – оборачивающая линза, 4 – вогнутое зеркало, 5 – окуляр, 6 – глаз, 7 – шлем.

быть в значительной степени устранено за счет модификации схемы (рис. 8) [23]. Такая схема содержит объектив 1, ПВМС 2, работающий на отражение, оборачивающую линзу 3, вогнутое зеркало 4 и окуляр 5, размещаемые на шлеме. Использование "свернутой оптики" повышает компактность, увеличивает базу бинокулярного зрения и повышает за-

щищенность от внезапных излучений. Для облегчения конструкции можно использовать голографические зеркала. Характеристики модифицированных очков с локальной модуляцией излучения приведены в табл. 3 [24].

Анализ параметров показал существенное уменьшение времен включения и выключения ПВМС на основе С*ЖК, однако выявил малую величину его светопропускания (10–15%), объясняемую малыми углами переключения С*ЖК. В лучшем случае углы переключения составляют $\pm 45^\circ$ для закрученной структуры с малым шагом и большой величиной спонтанной поляризации. Использование поляризованного света вызывает оптические потери, превышающие 50%. Поэтому представляет интерес локальная модуляция неполяризованного излучения.

Оптические системы с ПВМС, осуществляющие локальную модуляцию неполяризованного излучения

Оптическая схема устройства с ПВМС, осуществляющего локальную модуляцию неполяризованного излучения, приведена на рис. 9. Входной неполяризованный луч света 3 от слабо освещенного объекта 2 и слепящего объекта 1 падает на поляризационный расщепитель, лучей 5 и создает изображения этих объектов с помощью линзы 4 в фокальной плоскости 15. Проходя через блок 5, луч 3 разделяется на лучи 6 и 7 с ортогональной поляризацией света. После отражения зеркалами 8 и 9 лучи распространяются параллельно, проходя через модулятор 12 и оптически управляемый ПВМС, содержащий слой С*ЖК 13 и фотопроводниковый слой 14. Отразившись от зеркала 16, оба луча вторично проходят через ПВМС и модулятор 12, после чего сходятся в расщепителе 5. Отражатели 8 и 9 осуществляют полное внутреннее отражение, причем

Таблица 3. Параметры защитных очков с локальной модуляцией излучения

Увеличение, крат	1
Поле зрения, град	24
Угловое разрешение, угл. мин	1
Напряжение/ток, В/мкА	15/5
Исходное светопропускание	> 0.1
Светопропускание при напряжении 15 В	0.001
Спектральный диапазон светочувствительности, мкм	0.4–0.6
Спектральный диапазон светопропускания, мкм	0.5–2
Пороговая освещенность, люкс	5
Время вкл./выкл. при 20 °С, 15 В и освещенности 100 люкс, с	0.001/0.05

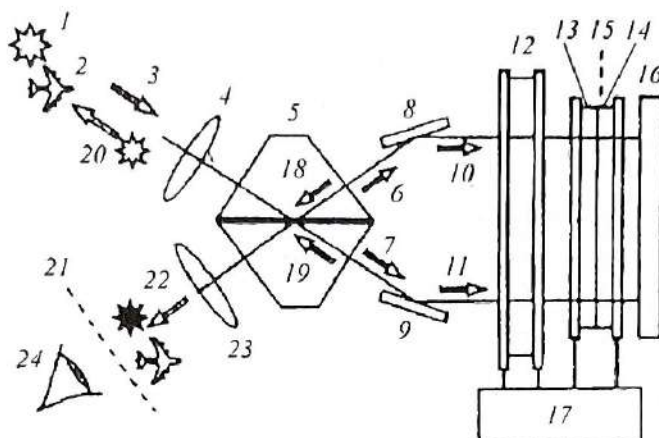


Рис. 9. Оптическая схема устройства с ПВМС, осуществляющим локальную модуляцию неполяризованного излучения. 1 – слепящий объект, 2 – слабо освещенный объект, 3 – луч света от объектов, 4 – линза, 5 – поляризационный расщепитель лучей; 6, 7 – лучи с ортогональной поляризацией; 8, 9 – зеркала; 10, 11 – лучи, поляризованные в плоскостях, расположенных под углом 45° друг к другу; 12 – модулятор; 13, 14 – слои С*ЖК и фотопроводника ПВМС; 15 – зеркало; 16 – источник питания; 17 – смешиваемые лучи света; 18, 19 – смешиваемые лучи света; 20 – направление распространения луча от слепящего объекта; 21 – фокальная плоскость линзы 23; 22 – направление распространения луча от слабо освещенного объекта; 24 – наблюдатель.

выходные лучи падают нормально к поверхности призмы Дове. Лучи 10 и 11 оказываются поляризованными в плоскостях, расположенных под углом 45° друг к другу. Как показано в работе [25], оба луча после смешивания в расщепителе 5 распространяются в направлении 20, если слои С*ЖК 12 и 13 имеют соответственно оптическую задержку $\lambda/2$ и $\lambda/4$, а директор этих слоев ориентирован либо в плоскости рисунка, либо отклонен от нее соответственно на углы $-22,5^\circ$ или $+45^\circ$. Это возможно, если оптически адресуемый ПВМС имеет угол переключения директора молекул $\pm 22,5^\circ$, а ячейка 12 – угол переориентации своего директора $\pm 11,25^\circ$. При высоком уровне освещенности в фокальной плоскости 15, совпадающей с фотопроводниковым слоем 14, переменный электрический сигнал, приложенный к обоим С*ЖК-слоям от источника 17, вызывает полное переключение директора в слое 13 благодаря перераспределению напряжения в сильно освещенных зонах. При низком уровне освещенности и условии, что слой 13 обладает электрооптическим эффектом деформации спирали, директор переориентируется на угол $+22,5^\circ$ относительно плоскости рисунка. В этом случае лучи 18 и 19 смешиваются в расщепителе так, что результирующий неполяризованный луч идет в направлении 22, создавая изображения обоих объектов в фокальной плоскости 21 линзы 23. В результате луч от сильно освещенного

объекта возвращается по направлению 20, в то время как луч от слабо освещенного объекта направляется к наблюдателю, не ослепляя его. Этим осуществляется селекция при наблюдении слабо освещенного объекта на фоне слепящего объекта. При использовании электроклинического эффекта была показана возможность управления модулятором с частотой 50 кГц [26].

Локальная модуляция излучения с использованием нелинейных эффектов в ЖК

В последнее время интерес вызывает использование композитных материалов, в том числе на основе ЖК, содержащих в качестве примеси фуллерены и красители [27, 28]. Упрощенная диаграмма энергетических уровней таких примесей приведена на рис. 10. В этих средах удачно сочетаются малое время жизни состояния S_1 , высокая скорость интерконверсии в триплетное состояние (переходы S_1-T_1) и его большое время жизни, высокие значения сечений поглощения из возбужденных состояний S_1-S_n и T_1-T_n , превышающие сечения поглощения из основного состояния S_0 , т. е. $\sigma_{ex}^S \approx \sigma_{ex}^T > \sigma_0^S$. Это значит, что поглощение света возрастает с ростом воздействующего излучения и увеличением заселенности возбужденных состояний, т. е. наступает процесс так называемого “обратного насыщаемого

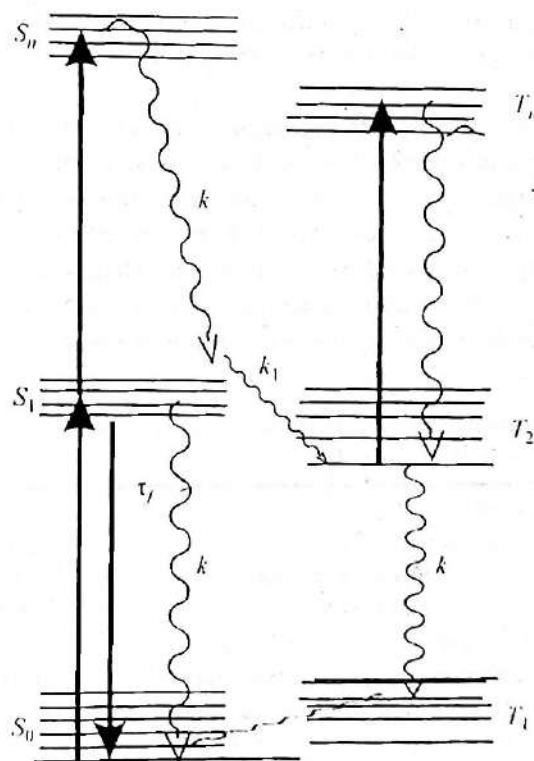


Рис. 10. Упрощенная диаграмма электронных состояний примесных центров. Прямые стрелки – переходы при поглощении и излучении света. Волнистые стрелки – безызлучательные переходы.

поглощения". Эти качества нелинейно поглощающих добавок могут быть реализованы при использовании и других растворителей. Преимущества ЖК обусловлены наличием в них сразу нескольких типов нелинейности: светондущимой модуляции показателя преломления (нелинейная оптическая восприимчивость $\chi^{(3)}$ в ЖК достигает 10^{-10} ед. СГСЭ [29]), термической нелинейности в диапазоне времен от 10^{-9} до 10^{-7} , флуктуации плотности, обусловленной линейным или нелинейным поглощением, приводящим к электрострикционным эффектам или бриллюэновскому рассеянию. Вызванное этими эффектами дополнительное светорассеяние приводит к усилению ограничения. Так, раствор C_{60} в нематике показывает практически то же снижение порога оптического ограничения, что и в α -хлорнафталине. В НЖК с красителем Метилловым красным излучение мощностью 140 мВт ослабляется до 5 мВт. Чем выше интенсивность излучения, тем меньше времена переключения.

Отдельно следует выделить использование двухфотонного поглощения, сочетающего высокую исходную прозрачность среды с возможностью создания высоких концентраций поглощающих центров. Вероятность двухфотонного поглощения зависит от квадрата мощности падающего излучения, поэтому эффективность этого принципа при защите от сравнительно мощного излучения не вызывает сомнения [30, 31]. В [32] сообщается о двухфотонном поглощении в ЖК, диспергированном в полимерной матрице, с добавкой фуллерена, вызывающем ослабление оптического сигнала примерно на порядок. Высоким порогом обладает и нелинейное светорассеяние в ЖК, диспергированном в полимерной матрице [33]. Проблему достижения порога ограничения 10^{-6} – 10^{-7} Дж/см² не удастся решить прямым использованием известных эффектов. Для подавляющего числа физических механизмов порог не опускается ниже 10^{-1} – 10^{-2} Дж/см².

В литературе указываются только два способа, дающие требуемые значения порогов ограничения, первый из которых – использование телескопической схемы, где ячейка с ограничителем располагается вблизи сопряженного фокуса телескопа [34]. Особого внимания заслуживают работы [29, 35, 36], авторы которых близко подошли к реализации идей низкопорогового ограничения. В качестве ограничителя использована микроканальная шайба, выполненная из оптических капилляров, заполненных ЖК в изотропной фазе, и помещенная в фокальной плоскости телескопической системы (рис. 11). В этой схеме эффективно использование примесных ЖК в качестве световых ограничителей при наносекундном и более длительном световом воздействии, где ограничение возникает за счет светорассеяния на

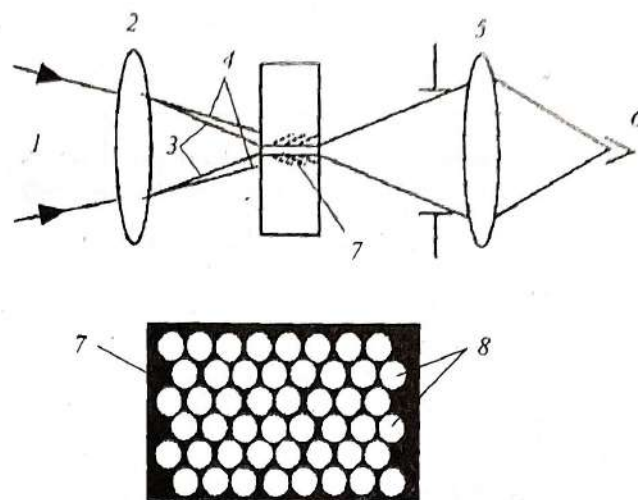


Рис. 11. Нелинейный защитный оптический элемент в системе передачи изображения. 1 – входное излучение от лазера и объектов наблюдения, 2 – входная линза, 3 – излучение от лазера, 4 – излучение от объектов наблюдения, 5 – коллективная линза, 6 – приемник излучения, 7 – непрозрачный корпус, 8 – оптические капилляры, заполненные ЖК в изотропной фазе.

центрах, образованных благодаря большой термической нелинейности ЖК. Характерные для этого варианта решения приведены в работе [37]. В рабочей композиции раствора фуллерена C_{60} и нигрозина в ЖК реализуются обратное насыщаемое поглощение и термическая дефокусировка, обеспечивающие на выходе энергию 0,36 мкДж/см².

Иное устройство низкопорогового ограничения, выполненное по традиционной телескопической схеме, приведено в [38]. В нем низкопороговое ограничение достигается преобразованием изображения (рис. 12). Роль телескопической системы состоит в снижении лучевой нагрузки не на органе зрения, а на светочувствительном слое транспаранта. Ограничитель выполнен в виде волоконной шайбы, заполненной ЖК с красителем. Однако использование в ограничителях обычных линзовых систем громоздко и дорого [39]. В работе [40] для умень-

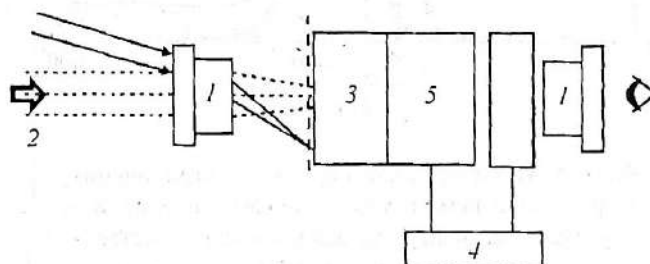


Рис. 12. Нелинейный оптический преобразователь на основе ЖК ПВМС как устройство для защиты глаз наблюдателя. 1 – телескоп, 2 – падающее излучение, 3 – микроканальная пластина и ЖК, 4 – блок управления, 5 – ЖК ПВМС.

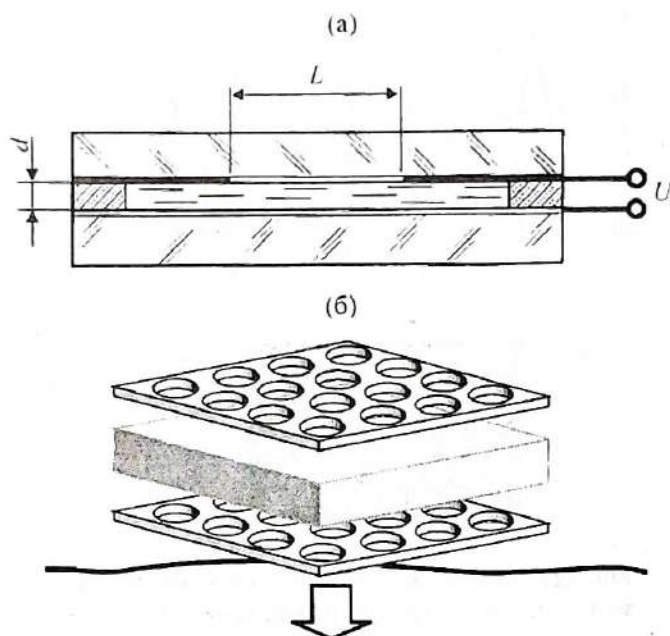


Рис. 13. Схема ЖК-микролинзовой системы. а – единичная микролинза, б – телескопическое устройство из растров ЖК-линз.

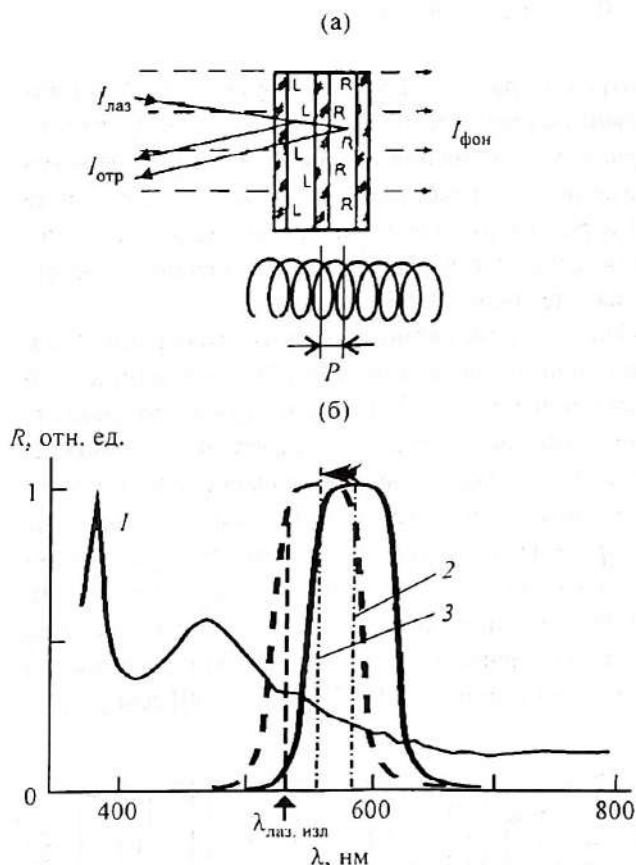


Рис. 14. Механизм низкопорогового ограничения в примесной немато-хиральной ЖК-системе, а – схема работы ячейки Бормана, P – шаг холестерической спирали. $I_{\text{лаз}}$ – луч лазера, $I_{\text{отр}}$ – селективное отражение, $I_{\text{фон}}$ – прошедшее фоновое излучение. б – спектральное положение полос поглощения и селективного отражения в ячейке Бормана; спектр C_{70} (1), несмещенный (2) и смещенный (3) центры полосы селективного отражения.

шения габарита предложено использовать в качестве фокусирующих элементов растры жидкокристаллических микролинз (рис. 13). Они представляют собой оптические устройства с электроуправляемым фокусным расстоянием, работающие при малых управляющих напряжениях и небольшой потребляемой мощности и отличающиеся технологичностью и невысокой стоимостью [41, 42].

В работе [5] для низкопорогового ограничения было предложено использовать быструю керровскую нелинейность в поглощающих хиральных ЖК-средах. В основе работы такого устройства положена бормановская ячейка (рис. 14). Она представляет собой немато-хиральную ЖК-структуру с примесью молекул, поглощение которых резонансно с частотой падающего лазерного излучения и имеет край полосы селективного отражения вблизи частоты воздействующего излучения. В этом случае при поглощении произойдет фотоиндуцированное изменение показателя преломления ЖК-системы, условия Вульфа-Брэгга будут выполнены для другой длины волны: $\Delta \bar{n}r = \Delta \lambda = \lambda_{\text{лаз. изл}}$ – и область селективного отражения вследствие фотоиндуцированного изменения показателя преломления переместится на длину волны падающего света. Возникает эффект динамического оптического гистерезиса, когда весь падающий свет отражается. Эти условия впервые были реализованы при использовании в качестве примеси молекул красителей кетоцианинов и фуллерена C_{70} [5, 42]. Эти вещества входили в состав немато-хиральной композиции с полосой селективного отражения при $\lambda_{\text{max}} \sim 540$ нм. Планоориентированный ЖК помещался в плоскую кварцевую кювету с зазором 1–5 мкм при воздействии импульсного линейно поляризованного излучения второй гармоники лазера на калий-гадолиниевом вольфраме ($\lambda = 532$ нм). Во всех случаях излучение попадало в область перекрытия полос поглощения примеси и отражения холестерика. Особенностью предложенных систем является чрезвычайно низкий порог проявления эффекта. Так, для кетоцианина порог составил ~ 250 мкДж/см² [5], для фуллерена C_{70} он оказался ниже – 10^{-6} – 10^{-7} Дж/см² [43]. Это наиболее низкие из известных значений порога оптического ограничения в настоящее время.

Заключение

Приведенные в обзоре оптические системы с локальной модуляцией излучения представляют собой новый коммерческий продукт и развивают новые тенденции в наблюдательных и регистрирующих приборах с использованием оптически управляемых ПВМС. Они могут применяться альпинистами, пациентами с дефектами зрения, в эргономических ис-

следованиях для сохранения уровня освещенности на сетчатке глаза при изменяющихся условиях и при изучении функций бокового зрения.

Новые устройства, не требующие использования датчиков освещенности и источников питания, также могут найти применение при выполнении сварочных работ, в устройствах космической связи и для защиты водителей от слепящих источников. На новом принципе предполагается создать зеркало заднего обзора со светоблокировкой. Для новых модуляционных сред пригодны схемы, разработанные для ПВМС.

В заключение авторы выражают признательность А.П. Онохову за ряд предоставленных информационных источников и обсуждение материала.

ЛИТЕРАТУРА

- Hollins R.C. Goals, architectures, and materials for broadband eye protection // *Mol. Cryst. Liq. Cryst. S&T*. 2001. V. 27. P. 1–11.
- Ицелева Л.Н., Полушкин Д.Ю., Сихарулидзе Д.Г. и др. Светозащитные очки на основе жидких кристаллов // *ОМП*. 1990. № 1. С. 38–40.
- Барачевский В.А., Лашков Г.И., Цехомский В.А. Фотохромизм и его применение. М.: Химия, 1977. 279 с.
- Клотиньш Э.Э., Круминь А.Э., Брант А.Э. Электрооптическая керамика // *Сб. научн. тр. Рига: Латв. ГУ*, 1977. С. 214–220.
- Danilov V.V., Smirnov V.A., Fedorov S.V. The doped chiral liquid crystal systems as photolimiters // *Proc. SPIE*. 1998. V. 3488. P. 6.
- Блинов Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978. 384 с.
- Беорин А.Г., Бубнов И.А., Дорофеев В.Т. и др. Автоматические светофильтры типа "хамелеон" для маски сварщика // *Сварочное производство*. 1995. № 5. С. 36–37.
- Брежнев В.А., Горфинкель Б.И., Долгополый Ю.Е. и др. Перспективы пассивно-матричных ЖК экранов и быстродействующих затворов // *Электронная промышленность*, 2002. № 1. С. 14–24.
- Bos P.J., Koehler K.R. The π -cell: a fast liquid crystal optical switching device // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1984. V. 113. P. 329.
- Haven T. True 3D imaging techniques and display technologies // *Proc. SPIE*. 1987. V. 761. P. 23–27.
- Lipton L. Stereoscopic displays and applications // *Proc. SPIE*. 1991. Part 2. V. 1457. P. 247–282.
- Beresnev L.A., Chigrinov V.G., Dergachev D.I. et al. // *Liq. cryst.* 1989. V. 5. P. 1171.
- Патент Великобритании № 2128362А, 1984 // *Бюлл. ВНИИПИ*. 1984. 107–12–84.
- Tomilin M.G., Onokhov A.P., Firsov N.T. Новые схемы очков с локальной светозащитой от слепящих объектов // *Оптический журнал*. 1997. Т. 64. № 5. С. 102–106.
- Tomilin M.G., Onokhov A.P., Polushkin D.Yu. Safety goggles with local-space modulation // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1992. V. 222. P. 119–124.
- Tomilin M.G., Onokhov A.P., Firsov N.T. A new modification of LC goggles with local spatial modulation of blinding objects // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1997. V. 331. P. 255–259.
- Onokhov A.P., Tarnakin I.N., Tomilin M.G. Image presentation optical systems with local spatial modulation of blinding objects // *Proc. Int. Conf. Japan Display'92*, Hiroshima. 1992. P. 543–545.
- Onokhov A.P., Beresnev L.A., Dultz W. et al. Optically addressed spatial light modulators using deformed helix ferroelectric liquid crystals // *Abstract book of 16th ILCC*. Kent, Ohio, 1996. P.140. C1P.60.
- Beresnev L.A., Dultz W., Onokhov A.P., Haase W. Optical limiting devices based on photoaddressed spatial light modulators using ferroelectric liquid crystals // *Abstract book of 16th ILCC*. Kent, Ohio, 1996. P.141. C1P.61.
- Ivanova N.A., Onokhov A.P., Chaika A.N. et al. Liquid crystal spatial light modulators for adaptive optics and image processing // *Proc. Conf. "Advances in Optical Information Processing VII", "Aerosense'96"*, Orlando, 1996.
- Европатент № 0436845, 1989 // *Бюлл. ВНИИПИ*. 1989. 91–07–17. № 29.
- Efron U. et al. The silicon liquid crystal light valve // *J. Appl. Phys.* 1985. V. 57. № 4. P. 1356–1368.
- Plummer W.T. Unusual optics of the Polaroid SX-70 Land camera // *Appl. Opt.* 1982. V. 21. № 2. P. 196–202.
- Beresnev L.A., Dultz W., Onokhov A.P., Haase W. Local optical limiting devices based on photoaddressed spatial light modulators, using ferroelectric liquid crystals // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1997. V. 304. P. 285–293.
- Beresnev L.A., Dultz W., Shenoy D., Shashidhar R. Device for local attenuation of non-polarized light using FLC optically addressed spatial light modulator // *Proc. SPIE*. 2002. P2-2. P. 158.
- Beresnev L.A., Shashidhar R., Dultz W. et al. Ferroelectric liquid crystals electro-optical modulator for non polarized light // *Book of Abstracts. 16 JLCC*. Kent, USA, 1996. C1. P. 60.
- Deschenaux R. Liquid-crystalline fullerenes: design, synthesis, and properties // *Book of Abstr. 19th ILCC* 2002. Edinburgh. 2002. I 16.
- Грязнова М.В., Данилов В.В., Рыльков В.В. и др. Межмолекулярные взаимодействия в системе жидкий кристалл–фуллерен C_{70} // *Опт. и спектр.* 2000. Т. 89. № 2. С. 257–260.
- Danilov V.V., Sosnov E.N., Chistyakova O.V. et al. Nonlinear Optics. 2001. V. 27. P. 279–285.

30. Belousova I.M., Belousov V.P., Danilov O.B. et al. Photodynamic of optical limiting of power laser radiation // *Nonlinear Optics*. 2001. V. 27. P. 233–248.
31. Subramaniam G., Andras J., Brodhead J. et al. Synthesis of two-photon LC materials // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2001. V. 365. № 8. P. 33–42.
32. Kamanina N.V., Kaporskii L.N. Fullerene-doped polymer-dispersed liquid crystal films as effective optical power limiting materials // *Nonlinear Optics*. 2001. V. 27. P. 339–346.
33. Sebbah P., Sixou P., Vanneste C., Guillard H. Nonlinear scattering and optical power limitation in direct and inverse polymer dispersed liquid crystals // *Nonlinear Optics*. 2001. V. 27. P. 377–383.
34. Justus B.L. // US Patent № 5,491,579, issued 2/1966.
35. Khoo I.C., Li H., Liang Y. et al. Nonlinear optical phenomena in fullerene-doped liquid crystal films and fibers // *Proc. SPIE*. 1995. V. 2530. P. 134.
36. Khoo I.C., Wood M.V., Chen P. et al. Self-defocusing and optical limiting of nanowatt cw laser and image processing at watt/cm² intensity with nematic liquid crystals // *Proc. SPIE*. 1998. V. 3475. P. 143.
37. Justus B.L., Kafafi Z.H., Huston A.L. Excited-state absorption-enhanced thermal optical limiting in C₆₀ // *Optics Letters*. 1993. V. 18. P. 1603.
38. Wu S.-T., Wu C.S., Lim K.C., Hsu T.Y. US Patent № 5,760,852, issued 6/1998.
39. Khoo C., Wood M.V., Guenther B.D. Nonlinear liquid crystal fiber structures for passive optical limiting of short laser pulses // *Opt. Lett.* 1996. V. 21. P. 1625.
40. Грязнова М.В., Данилов В.В., Рыльков В.В. и др. Микролинзы в системе оптического ограничения // *Письма в ЖТФ*. 2001. Т. 27. В. 2. С. 24–29.
41. Nose T., Sato S. Liquid crystal microlens obtained with non-uniform electric field // *Liq. Cryst.* 1989. V. 5. P. 1425–1433.
42. Грязнова М.В., Данилов В.В., Беляева М.А. и др. Оптические ограничители на базе жидкокристаллических микролинз // *Опт. и спектр.* 2002. Т. 92. № 4. С. 671–675.
43. Gryaznova M.V., Danilov V.V., Kamanina N.V. Borrmann cells as optical switches // *Opt. and Spectrosc.* 1998. V. 85. P. 938.