

УДК 681.7.064.844, 544.252.2, 544.252.4

В. М. Козенков¹, В. В. Беляев^{2,3}, Д. Н. Чаусов^{2,4}

**ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ПОЛЯРИЗАТОРЫ:
СВОЙСТВА, ТЕХНОЛОГИИ, ОСНОВНЫЕ ТИПЫ**

¹ АО НПО «Криптен», ул. Приборостроителей, д. 2, 141980 Дубна, Московская обл.

² Московский государственный областной университет,
ул. Радио, д. 10-а, 105005 Москва, Россия

³ Российский университет дружбы народов (РУДН),
ул. Миклухо-Маклая, д. 6, 117198 Москва, Россия

⁴ Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС»,
Ленинский пр-т, д. 4, 119049 Москва, Россия
E-mail: vic_belyaev@mail.ru

По технологии изготовления многих типов тонкопленочных поляризаторов и их применению они относятся к наукам о жидких кристаллах. В статье приведен аналитический обзор патентной и научно-технической литературы по разработке тонкопленочных (не более нескольких микрометров) линейных и циркулярных поляризаторов, основанных на разных физических принципах (дихроизм поглощения, анизотропная люминесценция, двойное преломление, отражение и рассеяние и использующих разнообразные конструкционные структуры и среды. В этом обзоре представлены такие структуры, как лиотропные и термотропные жидкие кристаллы, фотоанизотропные материалы, металлические целевые структуры, а также другие среды. Для создания картинных поляризационных структур с кинематическими цветовыми и/или стереоскопическими эффектами наибольший интерес представляют также лиотропные композиции в сочетании с фотоориентационным методом формирования таких структур, широко использующимся в настоящее время для фотоориентации термотропных жидких кристаллов.

Ключевые слова: тонкопленочные поляризаторы, жидкие кристаллы, лиотропные жидкие кристаллы, дихроизм поглощения, анизотропная люминесценция, двулучепреломление, фотоориентация, металлические целевые поляризаторы.

DOI: 10.18083/LCAppl.2021.2.5

V. M. Kozenkov¹, V. V. Belyaev^{2,3}, D. N. Chaurov^{2,4}

THIN FILM POLARIZERS: PROPERTIES, TECHNOLOGIES AND MAIN TYPES

¹Kripten, 2 Priborostroiteley St., Dubna, 141980, Moscow Region, Russia

²Moscow Region State University, 10-a Radio St., Moscow, 105005, Russia

³RUDN University, 6 Miklukho-Maklay St., Moscow, 117198, Russia

⁴National University of Science and Technology «MISIS»,

4 Leninskiy Av., Moscow, 119049, Russia

E-mail: vic_belyaev@mail.ru

According to manufacturing technology or application, many types of thin film polarizers belong to the liquid crystal science. This review summarizes patent, scientific and technological literature on the development of thin film (about few micrometers) linear and circular polarizers based on different physical effects (absorption dichroism, anisotropic luminescence, double refraction, reflection and scattering) and using a variety of constructional structures and environments. The review describes data on lyotropic and thermotropic liquid crystals, photoanisotropic materials, metal grid structures, etc. To create polarized patterned structures with kinematic color and/or stereoscopic properties, the lyotropic compositions are also very important. Such structures can be formed by a photoalignment method widely used for thermotropic liquid crystals.

Key words: *thin film polarizers, liquid crystals, lyotropic liquid crystals, absorption dichroism, luminescence anisotropy, birefringence, photoalignment, metal grid polarizer.*

1. Введение

Широко используемые в настоящее время поляризаторы представляют собой, как правило, ориентированную одноосным растяжением полимерную пленку толщиной 30–40 мкм, окрашенную в массу комплексными соединениями йода или органическими красителями [1, 2]. В качестве полимера используется в основном поливиниловый спирт (ПВС) [1]. Такие поляроиды имеют достаточно высокие поляризационные характеристики и в настоящее время находят широкое применение, например, при производстве жидкокристаллических индикаторов и дисплеев. Однако вследствие относительно большой толщины их использование в средствах защиты и/или идентификации товарной продукции в основном ограничено применением только в качестве внешних визуализаторов скрытых анизотропных изображений [3].

В настоящей работе проводится аналитический обзор патентной и научно-технической литературы по созданию, свойствам и применению других поляризационно-оптических структур.

2. Физические принципы, лежащие в основе формирования тонкопленочных поляризаторов

Действие поляризатора состоит в том, что он разделяет первоначальный пучок неполяризованного света на две компоненты, ортогональные по направлению поляризации, и при этом пропускает одну компоненту и поглощает (или отклоняет) другую.

Существует ряд оптических явлений, отвечающих за этот процесс: дихроизм поглощения, анизотропная люминесценция, двойное преломление (или двулучепреломление), отражение и рассеяние, причем первое явление играет наиболее существенную роль.

Большинство существующих в настоящее время поляризаторов (они же поляроиды, поляризующие светофильтры и т.д.) являются дихроичными. Они преимущественно пропускают одну форму поляризации и поглощают ортогональную с ней форму.

Традиционные пленочные дихроичные поляризаторы состоят из ориентированных в ориентированной полимерной матрице (как правило, это

поливиниловый спирт) микрокристаллов (*микрокристаллические* поляроиды) или дихроичных палочкообразных органических молекул (*молекулярные* поляроиды) [1].

Типичные двулучепреломляющие поляризаторы состоят, как правило, из двух склеенных вместе объемных призм, например, из исландского шпата. Такая комбинация разделяет падающий неполяризованный пучок света на две компоненты, пропуская одну и полностью отражая другую [1].

Отражающие поляризаторы работают при наклонном падении неполяризованного пучка света на поверхность, например, стеклянной пластины или матовой поверхности диэлектрика. При этом отраженный световой пучок становится частично поляризованным [1]. Эти поляризаторы не рассматриваются в настоящем обзоре.

Свет может поляризоваться и в результате рассеяния, как это наблюдается в поляризованном излучении голубого неба [1].

В ряде практических применений (например, для визуализации скрытых анизотропных изображений [3]), широко используются циркулярные (круговые) поляризаторы. Наиболее распространенным их вариантом является двухслойная структура, состоящая из линейного поляризатора и прозрачной фазовой пластины (фазосдвигающей пленки) с фазовой задержкой в четверть длины волны в заданной спектральной области (обычно эта длина волны находится в середине видимой области спектра и равна 540 нм). Эти два слоя склеиваются между собой изотропным слоем адгезива.

Кроме того, тонкие фазосдвигающие пленки и сами представляют несомненный интерес для разработки новых поляризационно-оптических элементов.

3. Оптические и технические характеристики поляризаторов и прозрачных анизотропных пленок

Тестирование оптических характеристик линейных поляризаторов

Качество поляризаторов, определяющих их практическую значимость, характеризуется такими параметрами, как поляризующая (поляризационная) эффективность E_p и среднее пропускание неполяризованного света T . Эти два параметра зависят от толщины слоя поляризующего покрытия,

а также параметра ориентационного порядка в нем S . Общей характеристикой молекулярного порядка S является дихроичное отношение Kd и степень поляризации получаемого поляризованного светового потока при прохождении или отражении через поляризатор неполяризованного света V [4–11].

В зависимости от цветовых характеристик поляризатора (монохромный или полихромный (серый или нейтральный)) измерения этих параметров производятся в максимуме его спектральных характеристик. В частности, для нейтрального поляризатора эти измерения проводятся на трех длинах волн: 450, 550 и 650 нм, соответственно, с усреднением значений, рассчитанных для трех точек спектра.

Как правило, оптимальные параметры этих характеристик зависят от области конкретного применения поляризующих покрытий и для широко применяемых в настоящее время листовых поляризаторов на основе йодированного (или пропитанного дихроичными красителями) поливинилового спирта [1] E_p должно быть более 99,95 %.

Вышеуказанные характеристики рассчитываются следующим образом.

Поляризационная эффективность (Polarizing efficiency), E_p :

$$E_p = [(T_{par} - T_{per}) / (T_{par} + T_{per})], \quad (1)$$

где T_{par} и T_{per} – оптическое пропускание поляризатора при ориентации электрического вектора полностью поляризованной измерительной световой волны параллельно (T_{par}) и перпендикулярно (T_{per}) оптической оси поляризатора.

Величина E_p изменяется в пределах от 0 (изотропная структура), до 1 (идеальная молекулярная ориентация).

Для отражательных поляризаторов поляризационная эффективность может быть определена как

$$E_p = [(R_{par} - R_{per}) / (R_{par} + R_{per})], \quad (2)$$

где R_{par} и R_{per} соответственно непоглощаемая и поглощаемая ортогонально-поляризованные компоненты отраженной световой волны.

Среднее пропускание неполяризованного света, T :

$$T = (T_{par} + T_{per}) / 2. \quad (3)$$

Параметр ориентационного порядка (order parameter), S :

$$S = (D_{par} - D_{per}) / (D_{par} + 2D_{per}), \quad (4)$$

где D_{par} и D_{per} – оптические плотности одного поляризатора при ориентации электрического вектора измерительной световой волны параллельно (D_{par}) и перпендикулярно (D_{per}) оптической оси поляризатора. Величина S изменяется в пределах от 0 (изотропная структура, до 1 (идеальная молекулярная ориентация).

Дихроичное отношение (Dichroic ratio), K_d :

$$K_d = D_{par}/D_{per}. \quad (5)$$

Контраст K :

$$K = T_{par}/T_{per}. \quad (6)$$

Величины K_d и K изменяются в пределах от 1 (изотропная структура) до теоретически бесконечности (идеальная молекулярная ориентация).

Степень поляризации (ϵ %), V :

$$V = 100 \times [(T_{par} - T_{per}) / (T_{par} + T_{per})]. \quad (7)$$

Величина V изменяется в пределах от 0 (изотропная структура) до 100 % (идеальная молекулярная ориентация).

Измерение двулучепреломления оптически прозрачных пленок

Величина фазовой задержки δ определяется выражением

$$\delta = 2\pi\Delta n d / \lambda, \quad (8)$$

где Δn и d – величина двулучепреломления и толщина оптически прозрачной пленки, соответственно, λ – длина волны измерительного света.

Таким образом, видно, что величина фазовой задержки определяется величиной двулучепреломления (ДЛП) используемого прозрачного материала и его толщиной.

В настоящее время в качестве материала в промышленно выпускаемых циркулярных поляризаторах для изготовления таких четвертьволновых фазовых пластин используются одноосно ориентированные полимерные пленки, полученные методом экструзии расплава полимерных гранул или механического растяжения исходно изотропных полимерных пленок, полученных методом полива из раствора (например, поливинилового спирта [12, 13]).

В последнее время широко ведутся исследования по применению для этих целей тонкопленочных твердотельных фазосдвигающих слоев на основе анизотропных веществ, проявляющих лиотропные ЖК-свойства [14–17].

Технические характеристики поляризаторов

Кроме указанных выше оптических и цветовых характеристик поляризационных структур, обеспечивающих их практическое применение, важными параметрами являются и такие технические характеристики, как:

- толщина поляризационного слоя,
- термическая устойчивость слоя,
- фотохимическая устойчивость слоя,
- химическая устойчивость слоя,
- атмосферостойкость слоя.

Типичная структура пленочного поляризатора приведена на рис. 1, а. В структуре оптических компенсаторов (рис. 1, б), кроме поляризационной, появляется еще фазовая пластина, задающая величину оптической задержки хода для определенного спектрального диапазона.



Рис. 1. Структура пленочного поляризатора (а) и оптического компенсатора (б)

Fig. 1. Structures of film polarizer (a) and optical compensator (b)

Среди промышленно выпускаемых поляризаторов наибольший уровень пропускания 44,5 % имеет поляризационная пленка японской компании Nitto. У нее степень поляризации 95,8 % (модель F1205DU, общее назначение). Наивысшую степень поляризации (99,96 %) имеют пленки

TEG1465DU с пропусканием 43,8 %. Типичный пример спектральной зависимости поляризационного контраста или экстинкция приведен на рис. 2. У некоторых видов поляризации в отдельных участках спектра это отношение может превышать 100 000:1.

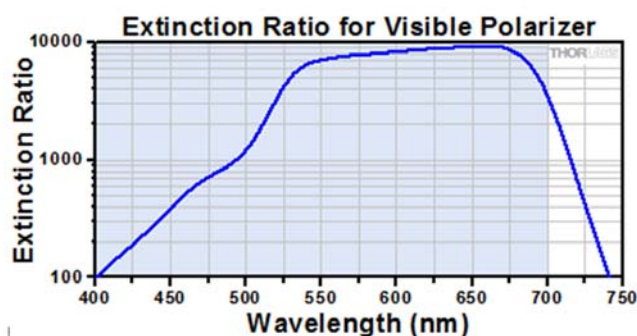


Рис. 2. Пример спектральной зависимости поляризационного контраста (экстинкции)

Fig. 2. An example of the polarization contrast (extinction) spectral dependence

Среди других производителей поляризаторов для разных спектральных диапазонов можно отметить американскую компанию *Thorlabs Inc.* [18].

Особый интерес вызывают применения поляризаторов не только для видимого диапазона спектра.

Фирмой Инфраспекс (<http://www.infra-specs.de/>) выпускаются высококонтрастные ИК-поляризаторы, покрывающие широкий диапазон спектра, включающий миллиметровый, терагерцовый, дальний и средний ИК-диапазоны (в англоязычной литературе *mm-waves*, *THz*, *fir*, *mir*) [19].

Поляризаторы для дальнего и среднего ИК-диапазона (от 2,5 мм до 2 мкм, что эквивалентно диапазону волнового числа от 4 до 5000 см^{-1} или в диапазоне частот от 120 ГГц до 150 ТГц) обеспечивают степень поляризации $> 99,99\%$.

4. Металлические «щелевые» поляризаторы (*wire-grid polarizers, WGP*)

Фирма *MOXTEK Inc. (USA)* разработала проволочные поляризаторы по технологии *ProFlux™* для видимой области спектра, которые, в частности, используются как поляризационные светоразделительные устройства в проекционных ЖК-дисплеях [20–24] с контрастом 15000:1 (проекционная система *JVC DLA-HD1*).

WGP поляризаторы выполняются в виде дифракционной решетки, состоящей из металлических полосок толщиной 100–200 нм и с периодом менее половины длины волны поляризуемого излучения. Так, для излучения с длиной волны 400 нм период должен быть 200 нм и менее. Если период оказывается больше этой величины, то

WGP работает как обычная дифракционная решетка и не проявляет поляризующих свойств по отношению к падающему на него в данном случае УФ-излучению.

Принцип работы таких поляризаторов заключается в том, что компонента электрического поля световой волны, падающей на них, с вектором поляризации, перпендикулярным направлению электропроводящих «проволочек», практически не создает электрического тока в них и проходит через такую структуру почти без ослабления. В то же время параллельная составляющая генерирует энергию в проводниках вследствие присущего в них сопротивления. Ускоренные электроны в проводниках излучают в обоих направлениях, при этом излучение, генерируемое вперед, тушится и остается только отраженная волна [20, 25–27].

Короче говоря, такой поляризатор работает как плохой диэлектрик для одной поляризации и как хорошее зеркало для другой [20, 28]. При этом, как и для сплошных металлических слоев, от 5 до 10 % падающего излучения обеих поляризаций поглощается решеточными элементами металлической структуры. Эти поляризаторы используются в диапазоне радиочастот более 115 лет. В последнее время они применяются как узкополосные поляризаторы в ИК- и видимой области спектра. Однако, используя высокоразрешающую литографическую технологию нанесения с последующим травлением слоев *Al* высокой чистоты (99,995) и многослойную структуру с использованием диэлектрических подслоев толщиной порядка 220 нм с низким показателем преломления, например, MgF_2 , фирма *MOXTEK Inc.* разработала широкополосные *WGP* для видимой области спектра [23].

Более подробное описание структуры таких *WGP* приводится в [29].

В [30] предложена технология реплицирования наномасштабных картин на подложки *nano-mold* (нанопечатным) методом и изготовления таким образом *WGP* поляризаторов для УФ- и видимой области спектра.

Действительно, известно, что *mold* (печатная форма) может быть из твердого материала типа металл или диэлектрик; нанокартинка получается электронным лучом или рентгеновской литографией с последующим травлением слоя. Этот процесс хорошо применим для малоразмерных изделий, но с трудом применим для изготовления изделий большого размера, при массовом их тиражировании, при получении листов большого размера с множеством малоразмерных элементов, а также разнообразных решеточных структур в биохимии и в разнообразных аналитических процессах. В литературе описаны методы получения наномасштабных картин, в частности, проволочных поляризаторов методом *mold imprinting* с использованием цилиндрических роликовых устройств.

В [30] показан проволочный поляризатор, в котором подложка делается, например, из стекла, а отражающие металлические полоски выполнены, например, из *Al*. Для получения высокоэффективных поляризаторов в заданной спектральной обла-

сти важное значение имеет показатель преломления подложки (обычное значение 1,52), а также ширина металлических полосок и период формируемой решетки.

Так, при периоде 50 нм теоретически контрастное отношение составляет 83:1 для длины волны 400 нм и 256:1 для 700 нм. Для двух одинаковых поляризаторов, расположенных параллельно друг другу, это отношение возрастает до величин 6889 и 65 536, соответственно. Теоретически коэффициенты пропускания при этом составляют 0,954 и 0,966, соответственно, для тех же длин волн, а для двух одинаковых поляризаторов, расположенных параллельно друг другу, они снижаются до 0,912.

Современные промышленно производимые по этой технологии поляризаторы представляют собой последовательность периодически расположенных металлических полос (проволок или ребер на подложках), сформированных методами фотолитографии, избирательного травления и/или вакуумного осаждения. Наиболее известные поляризаторы фирмы *Moxtek* [31] с нанопроволоками или ребрами шириной от 18 до 75 нм и шагом структуры 100, 120 или 144 нм (см. рис. 3), изготовленные по технологии *ProFlux® Ultra Broadband polarizers*, обеспечивают равномерное пропускание в диапазоне длин волн от 300 нм до 4 мкм с высоким поляризационным контрастом.

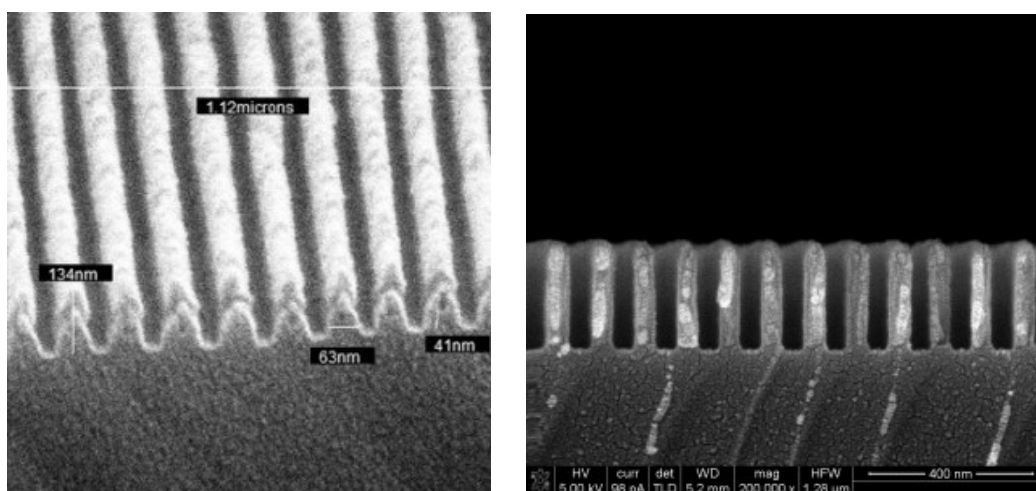


Рис. 3. Поляризаторы фирмы *Moxtek* [31] с нанопроволоками или ребрами

Fig. 3. *Moxtek* polarizers [31] with nanowires or nanoribs

В [30] показаны несколько вариантов реализации предложенной технологии с использованием цилиндрического вала (или барабана) и, в частности, УФ отверждаемого полимерного слоя. В других примерах использовался тонкий слой *alkanethiolates* ($\text{HS}(\text{CH}_2)_n\text{R}$ или *fluorosurfactant* типа *Zonyl RP* (Dupont Product).

Другие способы получения *WGP* описаны в [32, 33].

Упрощенной технологией изготовления *wire-grid polarizers* является термическое распыление в вакууме [34]. Такие слои при наклонном ($80\text{--}90^\circ$, оптимально 88°) напылении *Ag*, *Au* или *Cu* металлов поляризуют проходящее через них видимое или ближнее ИК-излучение при нормальном падении, подобно *wire-grid* поляризаторам. Очевидно, что эта технология не обеспечивает хороших поляризационных характеристик для использования, например, в ЖК-дисплеях и других высокоточных поляризационно-оптических устройствах, но, возможно, приемлема в средствах защиты, если она позволит наладить массовое производство поляризаторов по такой технологии.

5. Варианты тонкопленочных циркулярных поляризаторов

Как отмечено в разделе 3, в ряде практических применений (например, для визуализации скрытых анизотропных изображений [3]), широко используются циркулярные (круговые) поляризаторы. Наиболее распространенным их вариантом является двухслойная структура, состоящая из йодированного линейного поляризатора и прозрачной фазовой пластины (фазосдвигающей пленкой), склеенных между собой изотропным слоем адгезива.

В настоящем разделе описаны варианты формирования однослойных циркулярных поляризаторов, основанные на других физических принципах.

Широкополосные циркулярно поляризующие пленки (ЦПП)

В [35] описаны ЦПП на основе фотополимеризующихся смесей реактивных хиральных молекул (РХМ) и реактивных нематических ЖК (РНЖК). Длина волны отраженного света ЦПП зависит от соотношения концентраций молекул РХМ и РНЖК, смещаясь в голубую область с увеличением первых. Отражательная полоса ЦПП

пропорциональна величине двулучепреломления (ДЛП) ЖК и шага спирали. ДЛП типичных РЖК обычно меньше, чем 0,2 и, соответственно, отражательная спектральная полоса (ОСП) таких ЦПП обычно менее 100 нм. Конечно, формирование множества монохромных ЦПП с различными длинами волн отраженного света позволяет получать отражающие ЦПП с широкой ОСП. Но это понижает процент выхода годных ЦПП при их производстве и повышает цену.

Фотополимеризация РНЖК с высоким ДЛП и РХМ позволяет получать монослойные ЦПП с широкой полосой отражения (более 300 нм).

Широкополосные поляризаторы и отражатели на основе фотохимической рацемизации (photoracemization) [36]

Как правило, ЖК на основе хиральных структур с постоянным шагом спирали имеют достаточно узкую полосу селективного отражения в пределах 100 нм в видимой области спектра [37].

Значительное (в 2,4 раза) увеличение ширины полосы хирально-нематических ЖК-пленок может быть достигнуто введением градиента шага спирали, например, путем пространственной модуляции фотоиндуцированной (140 мкВт/см^2 , длина волны активации – 334 нм, время облучения – 2 часа, энергия облучения около 1 Дж/см^2) рацемизации хиральных примесей в мезофазе при температуре порядка 100°C с последующим «замораживанием» этого состояния при комнатной температуре [36]. Использовались пленки толщиной 22 мкм.

Циркулярные поляризаторы с холестерическими жидкими кристаллами

В конце 1980-х годов в НИИ органических полупродуктов и красителей были изобретены поляризаторы с круговым дихроизмом на основе холестерических жидких кристаллов (ХЖК) [38–40]. Принцип действия основан на том, что неполяризованный свет, проходя через слой ХЖК, разделяется на два пучка. Прошедший пучок становится циркулярно поляризованным с направлением вращения, соответствующим знаку холестерической спирали. При этом отраженный пучок становится тоже циркулярно поляризованным, но с противоположным направлением круговой поляризации. Если отраженный от слоя ХЖК пучок отразить от металлической пленки, то отраженный от нее пучок будет иметь направление круговой поляри-

зации такое же, как и направление закрутки холестерической спирали. Следовательно, второй пучок (отраженный от слоя ХЖК, а потом повторно отраженный от обычного зеркала) пройдет через слой ЖК без потерь на отражение. Таким образом, достигается почти полное (100 %) преобразование (конверсия) неполяризованного пучка в циркулярно поляризованный.

Поскольку ХЖК характеризуется эффектом селективного отражения с довольно узкой спектральной шириной отраженного пучка, для использования в полноцветных дисплеях надо иметь три последовательно расположенных слоя ХЖК с

разными неперекрывающимися диапазонами селективного отражения. Пример такой структуры и ее спектра пропускания в открытом и закрытом состояниях приведен на рис. 4 [41].

Аналогичные примеры широкозонных поляризаторов с ХЖК, в том числе включенным в состав полимерной сети и обеспечивающим градиент шага спирали ХЖК (рис. 4), описаны в [42, 43]. Пример использования такого поляризатора с ХЖК в пространственно-временном модуляторе света для оптической обработки информации приведен в [44].

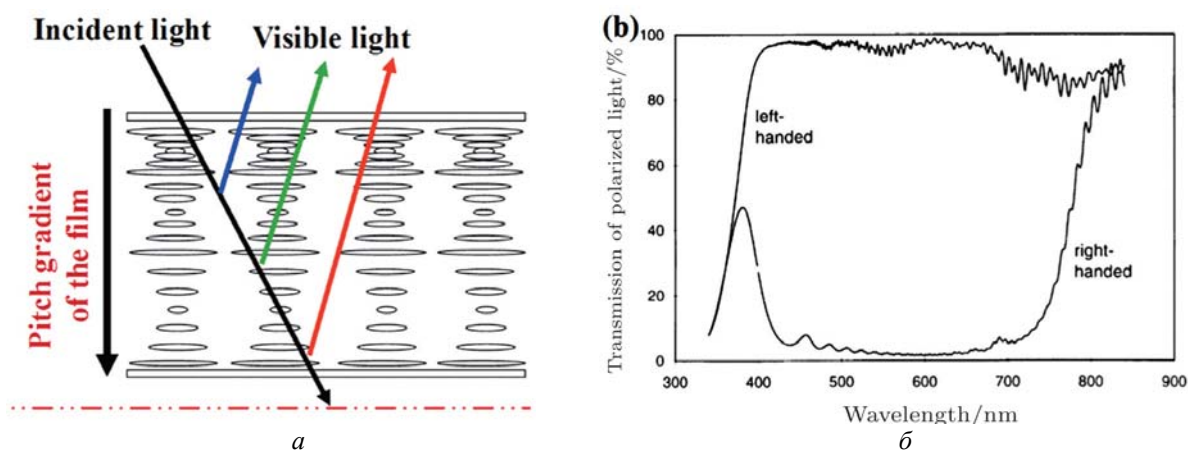


Рис. 4. Структура слоя ХЖК с градиентом шага спирали (а) и спектр пропускания широкозонного поляризатора с ХЖК для света с левой (верхняя линия) и правой (нижняя линия) круговой поляризацией (б)

Fig. 4. Structure of a cholesteric liquid crystal (ChLC) layer with a helix pitch gradient (a) and a transmission spectrum of a ChLC wide zone polarizer for the light beam with left (upper line) and right (bottom line) circular polarization (b)

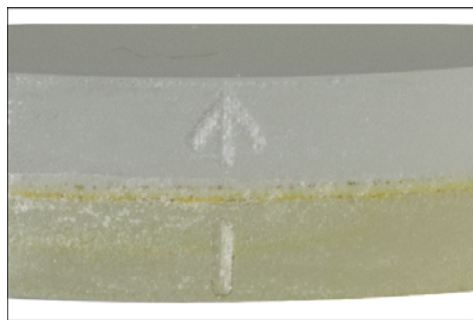


Рис. 5. Поперечный разрез пленки, конвертирующей линейно поляризованный или неполяризованный свет в циркулярно поляризованный (стрелка направлена к входной поверхности)

Fig. 5. Cross section of a film converting the linear polarized light beam to the circular polarized light beam (the arrow is directed to the input surface)

На рисунке 5 показан поперечный разрез пленки, конвертирующей (преобразующей) линейно поляризованный или неполяризованный свет в циркулярно поляризованный (стрелка направлена к входной поверхности), или наоборот, циркулярно поляризованный свет в линейно поляризованный [45].

6. Тонкопленочные картинные поляризационно-оптические структуры

Такие поляризационно-оптические структуры в тонкопленочном исполнении могут представлять несомненный интерес как одни из наиболее перспективных разработок элементов защиты.

Далее рассматриваются различные варианты получения таких структур.

Микрополяризационные структуры на основе йодированного (или допированного дихроичными красителями) поливинилового спирта

Одним из первых предложил конструкцию картинных поляризаторов изобретатель традиционных йодированных поляризаторов Лэнд (E. H. Land) [46].

Они могут быть выполнены более совершенно, например, из микрокусочков традиционных йодированных (или допированных дихроичными (как правило, азо-красителями) растянутых полимерных пленок, закрепленных на одной подложке таким образом, что оптические оси таких картинных микрополяризаторов взаимно перпендикулярны друг другу [47, 48].

Тем не менее из-за достаточно большой толщины их применение в качестве тонкопленочных структур весьма ограничено и требуются новые подходы, которые будут рассмотрены ниже.

Микрокартинные поляризующие элементы для трехмерных стереоскопических дисплеев

Считается, что трехмерные стереоскопические дисплеи являются одними из наиболее перспективных кандидатов для последующих поколений дисплейной техники. При этом также ожидается, что ЖК-дисплеи в сочетании с микрокартинными поляризующими элементами (МКПЭ) являются наиболее предпочтительными для создания бинокулярных стереоскопических дисплейных систем для персонального использования или относительно малочисленной группы пользователей.

Такие МКПЭ, выполненные в тонкопленочном варианте, могут быть весьма полезны и в качестве разнообразных защитных элементов.

Они также могут включать два типа микрополяризаторов с различными, например, взаимно ортогональными ориентациями оптических осей.

В [49–53] Фэрис (S. M. Faris) предложил несколько вариантов создания трехмерных графических изображений. Так, в [51, 52] описана система для получения стереоскопических картинок с выходом на специфический принтер и использованием картинных микрополяризаторов.

В [49, 50, 53] для поляризационного кодирования стереоизображений (для левого и правого глаза) он предложил использовать право- и лево вращающие поляризационные пигменты на основе

холестерических ЖК-полимеров. При этом получается полноцветная поляризационная стереоскопическая печать [49].

Обычная печать и крашение основаны на поглощающих красителях и неорганических пигментах. Эти материалы не чувствуют поляризацию света и, следовательно, не представляют интерес для стереоскопической печати или крашения.

В [54] заявлены оптически переменные чернила, обладающие поляризационным эффектом. Чернила изготовлены традиционными способами смешивания компонент на основе многослойных интерференционных пигментов, ЖК-пигментов, наполнителей на основе смол, наполнителя и чернильных добавок. Картинная печать с этими чернилами проявляет яркий цвет при действии поляризованного света. При подборе соответствующих свойств многослойных и ЖК-пигментов длины волн цветовых картинок, получаемых чернилами при действии поляризованного света, отличаются от цветов интерференционных длин волн самих чернил. Преимущество заявляемого изобретения – низкая цена и отличная защита.

Изобретение относится к пленкам, в особенности к штампованным пленкам, ламинирующимся или *sticker*-пленкам, которые имеют хотя бы один оптически анизотропный слой, включающий частично ориентированный ЖК-материал.

Холестерические ЖК-пигменты (ХЖКП) обеспечивают как угловую цветовую перестройку, так и их поляризационную зависимость. Они выполняются в виде чешуйчатых структур с цветопеременным эффектом на основе отражательного механизма в циркулярно-поляризованном свете (от УФ-до ИК-) [55, 56]. ХЖК полимерные пленки являются естественными отражающими поляризаторами.

ХЖКП изготавливаются на основе ХЖК-пленок, причем каждая из чешуек находится в пленке с оптимальными размерами около 5 мкм толщиной и 20–40 мкм в диаметре.

Холестерические ЖК-полимеры на основе фотополимеризующихся палочкообразных нематических ЖК с примесью хиральных молекул способны отражать падающий циркулярно поляризованный свет. В [49] в качестве ХЖКП были использованы холестерические материалы фирмы *Wacker Chemie* (Германия).

Микрополяризационные структуры на основе лиотропных жидких кристаллов

В качестве первых вариантов таких структур можно привести одни из первых патентов Дрейера (*J. F. Dreyer*) [57, 58], который получал картинные поляризаторы на основе лиотропных ЖК путем переноса твердого слоя поляроида с подложки донора на подложку – акцептор. Однако предложенный им метод не позволяет получать поляризационные картинные изображения с высоким разрешением.

В [59] описан способ получения твердотельных тонкопленочных дихроичных поляризующих мозаичных структур на основе веществ, проявляющих лиотропные ЖК-свойства. В таких структурах молекулярно ориентированные слои органических красителей на поверхности гибкой или жесткой подложки имеют непериодическую ориентацию в различных элементах (пикселях) мозаичной структуры. Каждый из них имеет различную ориентацию вектора поляризации и/или различную окраску. Подобная структура может быть многослойной, причем каждый из поляризующих мозаичных слоев может быть разделен промежуточными прозрачными или инфракрасно несущими слоями.

В заявке [60] описана весьма интересная конструкция и технологический принцип работы устройства по формированию мозаичных (картинных) твердотельных тонкопленочных дихроичных поляризующих структур на основе веществ, проявляющих лиотропные ЖК-свойства.

Микрополяризационные структуры на основе лиотропных жидких кристаллов и фотополимеризующихся клеев

Способ получения многослойных и многоцветных твердотельных микрополяризационных структур с произвольно заданной ориентацией оптической оси в каждом из «пикселей» на основе лиотропных жидких кристаллов предложен в [61, 62]. При этом для формирования такой многослойной структуры использовались изотропные жидкие или «квазитвердые» фотополимеризующиеся клеи.

Микрополяризационные структуры на основе фотоанизотропных материалов

Для получения таких структур можно использовать практически все материалы, механизм и свойства которых будут описаны в продолжении обзора в следующем выпуске журнала. Для краткости мы приведем только два варианта получения

таких структур в виде картинной решетки микрополяризаторов для CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*) сенсоров изображений с использованием дихроичного азо-красителя АД-1 [63] и в виде картинных микро-зеркальных устройств на основе холестерических ЖК с примесью азо-красителя метилового красного [64].

Микрополяризационные структуры на основе лиотропных и термотропных жидких кристаллов, ориентированных методом фотоориентации с помощью фотоанизотропных материалов

Метод фотоориентации (*photoalignment*) ТЖК или ЛЖК заключается в нанесении на подложку твердого изотропного слоя композиции фотоанизотропного материала, проявляющего эффект фотоиндуцированной оптической анизотропии при поглощении им поляризованного (или неполяризованного, но направленного) излучения. Наведенная ФИА является следствием формирования ориентированного молекулярного ансамбля как в объеме слоя, так и на его поверхности. В результате в ряде случаев поверхностные ориентированные молекулы приобретают свойство ориентировать ЖК [65]. Впервые этот эффект использовался для ориентации ТЖК, но в последние годы стал применяться и для ориентации ЛЖК [62, 66–71].

В [72] предложен оптический метод получения микрокартинных поляризующих элементов для стереоскопических эффектов с использованием твердотельных тонкопленочных поляризаторов на основе веществ, проявляющих свойства лиотропных ЖК, описанных в разделе 3.1.1 продолжения обзора.

В качестве лиотропного красителя был использован азо-краситель *C. I. Direct Blue 67* (B67, *Nippon Kayaki Co., Ltd*). Для улучшения свойств лиотропной композиции в ее состав были введены неионный *poly(oxyethylene) nonylphenyl ether* (*Emulgen 909*), *poly(oxyethylene) lauryl ether* (*Emulgen 108*) и *anionicpoly(oxyethylene) lauryl ether sodium sulphonate* (*Emal 120C*) как сурфактант (все из KAO Co.).

Для картинной ориентации использовался метод *photoalignment*, впервые обнаруженный одним из авторов настоящего обзора и широко используемый в настоящее время для ориентации термотропных ЖК [65]. В качестве фотоориентанта использовался полиамид с диметиламиноазобензольным заместителем.

В полученных в [72] микрокартинных поляризующих элементах величины дихроичного и контрастного отношений, параметра ориентационного порядка и степень поляризации составляли 18; 0,85 и 0,91, соответственно.

В [73, 74] предложен способ получения множества скрытых (латентных) изображений в фотоориентирующем слое поливинилциннамата толщиной 100 нм, визуализируемых в поляризованном свете с помощью ТЖК. Аналогичные результаты получены в [75]. Физические эффекты, определяющие спектральную фотосенсибилизацию оптической анизотропии в твердотельных пленках поли(винилциннамата), рассмотрены в [76].

Микрокартинная ориентация нематического ЖК на полиамидной поверхности исследована в [77].

В [78, 79] описаны поляризационно-чувствительные материалы для формирования микрокартинных поляризующих элементов и технология такого материала.

Более подробно оптически анизотропные и интерференционные средства защиты описаны в обзоре [80].

7. Микроструктурированное осветительное устройство для получения поляризованного излучения

Микроструктурированные осветительные устройства для получения поляризованного излучения представляют интерес при использовании фотоанизотропных материалов для изготовления на их основе однородных по поверхности линейных поляризаторов и/или картинных поляризационно-оптических защитных структур с кинематическими цветовыми и/или стереоскопическими эффектами, а также изготовления фотоориентирующих поверхностей для лиотропных и термотропных ЖК, применяемых с этой же целью.

Микроструктурированная осветительная система для получения поляризованного света предложена в [81], поляризационные структуры большого размера в [81, 82], поляризующие слои на основе дихроичных красителей в [83, 84], а дихроичный УФ-поляризатор на основе ТЖК описан в [85]. В [86] предложено ЖК-устройство, имеющее поляризационные области в виде радиально и концентрически ориентированных картин.

В [87] предложено микроструктурированное осветительное устройство для получения поляризованного излучения, в котором одна из

межслойных поверхностей имеет микроструктурный вид. Первый слой выполнен в виде волновода, облучаемого неполяризованным светом. Вторым анизотропный двулучепреломляющий слой содержит поверхностную микроструктуру в виде параллельных микроуглублений. На внешнюю поверхность анизотропного слоя нанесен третий прозрачный изотропный слой.

Часть падающего светового излучения в результате полного внутреннего отражения на микроструктурированной поверхности анизотропного слоя отражается в виде практически полностью линейно поляризованного пучка в направлении, приблизительно перпендикулярном плоскости многослойной структуры.

Другая конструкция устройства для получения поляризованного излучения с большой апертурой, используемого при экспонировании фотоанизотропных материалов, предложена в [88].

8. Пленочные усилители яркости

Одно из главных применений поляризационных пленок – их использование в жидкокристаллических дисплеях для формирования изображения при изменении поляризационно-фазового состояния жидкого кристалла в пикселе под действием управляющего электронного сигнала [89–92].

В ЖК-дисплеях для создания однородного поля интенсивности света от источника подсветки применяется ряд элементов. В результате с учетом поглощения света в матрице цветных фильтров, поляризаторах, ТПТ, системе электродов и потерь света в оптических элементах степень пропускания типичной активной ЖК-матрицы составляет всего около 3–4 %. В этом ЖК-дисплее проигрывают дисплеям на основе излучения света – плазменным и на органических светодиодах. Поэтому задача повышения эффективности использования света очень важна. Разработан ряд технических решений, позволяющих конвертировать поляризованный свет, т.е. преобразовать его так, чтобы интенсивность не снижалась или снижалась незначительно при многочисленных изменениях направления распространения света и пересечениях различных оптических элементов.

Самые известные решения – технологии BEF и DBEF (*Brightness Enhancement Film* и *Dual Brightness Enhancement Film*, или пленочный усилитель яркости и двукратный пленочный усилитель яркости) [93–95].

Элементы представляют собой световодные пластины с призматическим профилем, что способствует сохранению света внутри них и повторному его использованию (*recycling*) (рис. 6, 7). В элементе DBEF (рис. 7) происходит также преобразование направления поляризации после отражения от дополнительной поляризационной пленки, а при повторном прохождении первичного светового пучка его яркость увеличивается на 60 % при прямой подсветке и на 97 % – при торцевой (рис. 8).

Для расширения цветовой гаммы и повышения световой эффективности подсветки (а значит, и всего дисплея) ряд фирм разработали новые конструкции модулей с квантовыми точками (КТ). Например, американские компании – 3M, владею-

щая технологиями пленочных усилителей яркости BEF и DBEF, и *Nanosys* – разработали пленку с квантовыми точками (3M *Quantum Dot Enhancement Film*; 3M *QDEF*) [96]. В пленке яркий белый цвет формируется «зелеными» и «красными» КТ, диспергированными в слое полимера, который находится между двумя барьерными слоями (рис. 9).

Кроме квантовых точек поляризационные пленки модифицируются и другими видами наночастиц. Примеры управления поляризационными свойствами пленок за счет добавления углеродных нанотрубок, нановолокон, наночастиц кварца с наноструктурированной поверхностью описаны в [97–101].

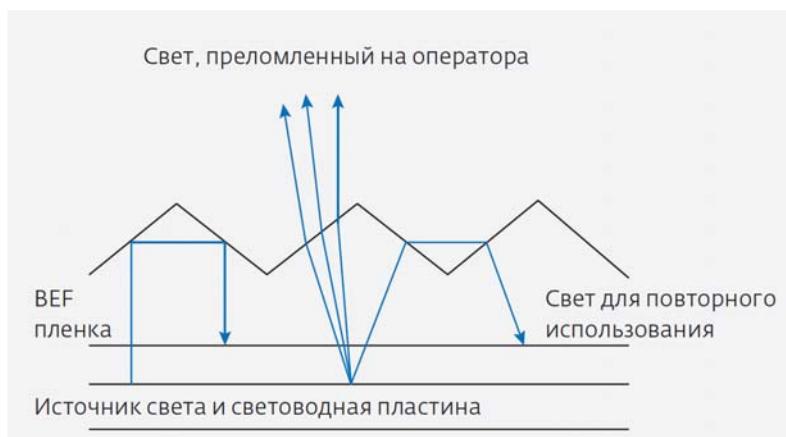


Рис. 6. Принцип работы пленки BEF (пленочный усилитель яркости)

Fig. 6. Operation principle of BEF (brightness enhancement film)

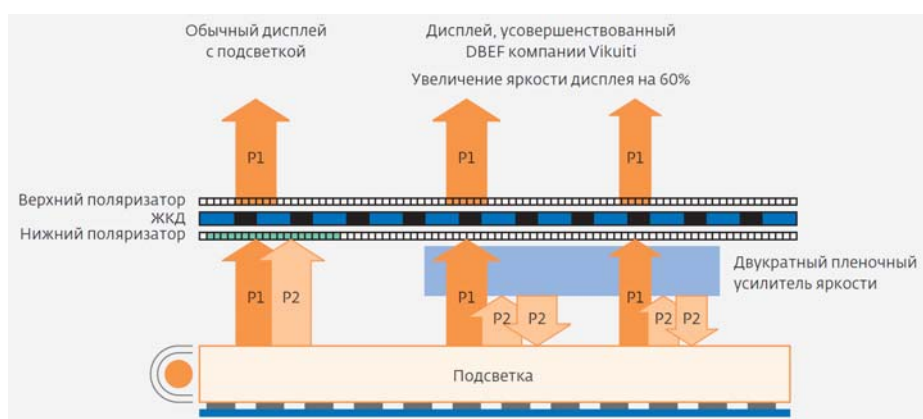


Рис. 7. Принцип работы пленки DBEF (двукратный пленочный усилитель яркости)

Fig. 7. Operation principle of DBEF (double brightness enhancement film)

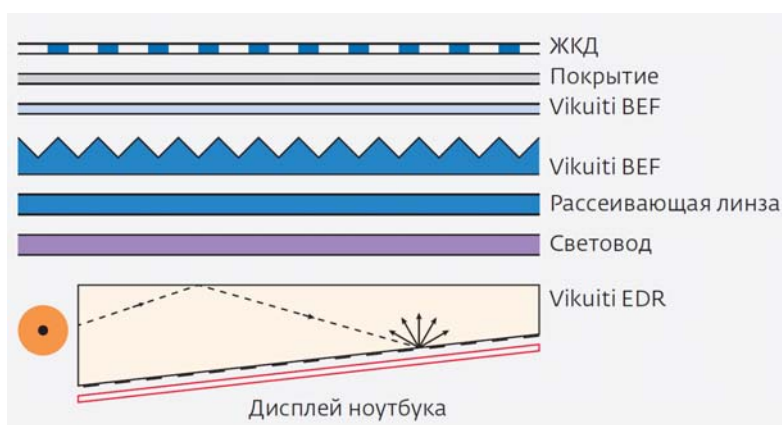


Рис. 8. Структура пленки DBEF с торцевой подсветкой

Fig. 8. DBEF film structure with edge backlight

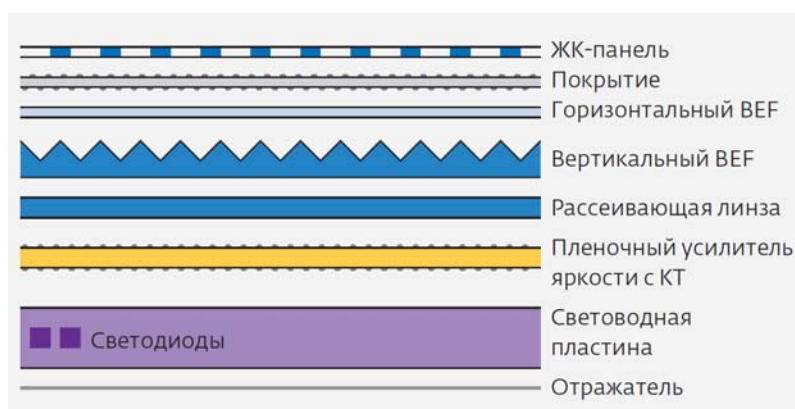


Рис. 9. ЖК-панель с подсветкой, в которой используется пленка с квантовыми точками (QDEF)

Fig. 9. LC-panel with a backlight comprising a film with quantum dots (QDEF)

Поляризационные характеристики некоторых типов тонкопленочных поляризаторов (сводная таблица)

Polarization characteristics of some types of thin-film polarizers (summary table)

№ пп	Тип поляризатора	Толщина, мкм	ДЛП	E_p	T	S	Kd	V , %
1.	Лиотропные ЖК-слои	0,2–2,0	0,3–0,8	0,8–0,90	0,35–0,42	0,8	28	96,2
2.	Фотоанизотропные фотохимически чувствительные материалы	1–20	0,001–0,01			0,2–0,35		
3.	Фотоанизотропные фотохимически стабильные материалы	0,2–2,0	0,2–0,4					
4.	Wire grid polarizers	100–300 нм					83–256	
5.	Термотропные ЖК-слои							
6.	Поляризаторы на основе анизотропного светорассеяния [102, 103]	1–30	> 0,3	> 0,95	> 0,35		1000	

9. Заключение

Проведен аналитический обзор патентной и научно-технической литературы по разработке тонкопленочных (не более нескольких микрон) линейных и циркулярных поляризаторов, а также картинных поляризационно-оптических структур, основанных на разных физических принципах (дихроизм поглощения, анизотропная люминесценция, двойное преломление, отражение и рассеяние, причем первый играет наиболее существенную роль) и использующих разнообразные конструкционные структуры и среды, такие как лиотропные и термотропные жидкие кристаллы, фотоанизотропные материалы, металлические щелевые структуры и ряд других сред.

В результате сделан вывод, что наибольший практический интерес применения таких поляризаторов для массового производства анизотропных оптических средств защиты разнообразных изделий от подделки и идентификации представляют поляризаторы и картинные поляризационно-оптические структуры на основе лиотропных жидких кристаллов, фотоанизотропные материалы на основе фотохимически стабильных веществ, металлических щелевых структур и других сред.

Для создания картинных поляризационных структур с кинематическими цветовыми и/или стереоскопическими эффектами наибольший интерес представляют также лиотропные композиции в сочетании с фотоориентационным методом формирования таких структур, широко используемых в настоящее время для фотоориентации термотропных жидких кристаллов [65].

Часть исследований, изложенных в обзоре по направлению «Фотоанизотропные материалы и эффекты в них», выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00201).

Часть исследований, изложенных в обзоре по направлению «Фазовые элементы с двулучепреломляющими материалами», выполнены при поддержке РФФИ, гранты № 20-57-00012 Бел_а, № 19-57-45011 ИНД_а и гранта Президента Российской Федерации МК-1330.2020.9.

Часть исследований, изложенных в обзоре по направлению «Поляризаторы для терагерцового и микроволнового излучения», выполнены при поддержке РФФИ, грант № 19-07-00602_а.

Part of the research presented in the review in the direction of "Photoanisotropic materials and their effects" was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project № 20-19-00201).

Some of the studies described in the review on "Phase elements with birefringent materials" were carried out with the support of the RFBR, grants № 20-57-00012 Bel_a, № 19-57-45011 IND_a and the grant of the President of the Russian Federation MK-1330.2020.9.

Part of the research described in the review in the direction of "Polarizers for terahertz and microwave radiation" was carried out with the support of the RFBR, grant № 19-07-00602_a.

Список литературы / References

1. Шерклифф У. Поляризованный свет: получение и использование / под ред. Н. Д. Жевандрова. Москва, Мир, 1965. 264 с. [Sherkliff U. Polarized light: getting and using it / ed. by N. D. Zhevandrova. Moscow : Mir, 1965, 264 p.].
2. Cael J.J., Nkwantah G., Trapani G. (Polaroid Co). High-durability KE polarizer for LCD applications: design considerations. *SID Intern. Symposium, Digest of Technical Papers*, 1997, **28**, 809–812.
3. Patent US № 6124970. Polymer materials with latent images visible in polarized light and methods for their production / Karasev A., Vannikov A., Kazarinov V., Karaseva L.; publ. 26.09.2000; Right holders: Karasev A.
4. Российский патент № RU 1753700. 3-хлориндантрон-4,4-дисульфокислота как основа для формирования сверхтонких термостабильных поляроидных пленок, селективных в области 620–680 нм / Хан И. Г., Шишкина Е. Ю., Попов С. И., Родина Н. А., Эль Ю. Ю., Ворожцов Г. Н., Быков В. А., Игнатов Л. Я., Корнюшина Е. И., Бобров Ю. А.; опубл. 20.07.1990; Бюл. № 20; правообладатель НИОПИК. [Russian Patent № RU 1753700. 3-chloredate-4,4-disulfonate as the basis for the formation of a thermally stable ultra-slim Polaroid films, selective in the 620-680 nm region / Han I.G., Shishkina E.Yu., Popov S.I., Rodina N.A., Jel' Yu.Yu., Vorozhcnov G.N., Bykov V.A., Ignatov L.Ya., Kornjushina E.I., Bobrov Yu.A.; publ. 20.07.1990; Bul. № 20; Right holders: NIOPiK].
5. Российский патент № RU 2155978. Дихроичный поляризатор и способ его изготовления / Игнатов Л. Я., Лазарев П. И., Бобров Ю. А.; опубл. 10.09.2000; Бюл. № 25; правообладатель Optiva. [Russian Patent № RU 2155978. Dichroic polarizer and method of manufacturing the same / Ignatov L.Ya., Lazarev P.I., Bobrov Yu.A.; publ. 10.09.2000; Bul. № 25; Right holders: Optiva].

6. Ignatov L., Lazarev P., Ovchinnikova N. Thin film polarizers: Optical and Color Characteristics, Thermostability. *SID Intern. Symposium, Digest of Technical Papers*, 2000, **31** (1), 834–837. DOI: 10.1889/1.1833083.
7. Laboratory procedure for the application of Optiva TM liquid crystal polarizer (LC Polarizer) coating on glass and plastic. *OPTIVA information sheet*, 1999.
8. Ванюрихин А. В., Герчановская В. П. Оптико-поляризационные устройства. Киев : Техника, 1981. 23 с. [Vanjurihin A.V., Gerchanovskaja V.P. Polarization-sensitive devices. Kiev : Tekhnika, 1981, 23 p. (in Russ.)].
9. Дитчберн Р. Физическая оптика. М. : Наука, 1965. 637 с. [Dichbern R. Physical optics. Moscow : Nauka, 1965, 637 p. (in Russ.)].
10. Борбат А. М., Горбань И. С., Охрименко Б. А., Суббота-Мельник П. А., Шайкевич И. А., Шишловский А. А. Оптические измерения. Киев : Техника, 1967. 418 с. [Borbat A.M., Gorban' I.S., Ohrimenko B.A., Subbota-Mel'nik P.A., Shaikевич I.A., Shishlovsky A.A. Optical measurements. Kiev : Tekhnika, 1967, 418 p. (in Russ.)].
11. Patent WO № 1997019374A1. Polarizer films comprising aromatic liquid crystalline polymers comprising dichroic dyes in their main chains / Shen S.S., Yoon H.N., Tien T.-P., Polis D.W.; publ. 1996; Right holder: Hoechst Celanese Corporation.
12. Патент РФ № 2226286. Оптически анизотропная пленка и способ ее получения / Бобров Ю. А.; опубл. 2004; Оптима Инк. [Russian Patent № 2226286. Optically anisotropic film and method of its fabrication / Bobrov Yu.A.; publ. 2004; Right holder: Optiva Inc.
13. Патент СССР № SU 102938. Способ изготовления двух преломляющих пленок / Лейкин М. В., Година Д. А., Иоффе С. Б.; опубл. 01.01.1956; Бюл. № 1; правообладатель Лейкин М. В. [USSR patent № SU 102938. Method for making two refractive films / Leykin M.V., Godina D.A., Ioffe S.B.; publ. 01.01.1956; Bul. № 1; Right holder: Leykin M.V.].
14. Hasebe H., Kuwana Y., Nakata H., Takeuchi K., Takatsu H. High quality patterned retarder for transflective LCDs. *DIC Technical Review*, 2008, 14, 35.
15. Lazarev P.I., Manko A.A., Remizov S.V., Palto S.P., Lazarev A.P. Thin coatable birefringent film. *SPIE*, 2006, 6286A.
16. Patent WO № 0164413. A method for the processing of ultra-thin polymeric films / Nordal P.E., Johansson N.; publ. 2001; Right holders: thin film electronics ASA.
17. Patent WO № 2008138512. Method for the production of a crosslinked liquid crystal layer, and apparatus for carrying out said method / Katschorek H., Brehm L.; publ. 2008; Right holders: Leonhard Kurz Stiftung & Co. KG.
18. URL: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7081 (дата обращения: 17.01.2021).
19. URL: <http://www.infraspecs.de/> (дата обращения: 17.01.2021).
20. Arnold S., Gardner E., Hansen D., Perkins R. An Improved polarizing beamsplitter LCOS projection display based on wire-grid polarizers. *SID Intern. Symposium, Digest of Technical Papers*, 2001, **32** (1), 52.3, 1282–1285. DOI: 10.1889/1.1831795.
21. Yu X.J., Kwok H.S. Application of wire-grid polarizers to projection displays. *Appl. Opt.*, 2003, **42**, 6335.
22. Zhou L., Wen L. Broadband polarizing beam splitter with an embedded metal-wire nanograting. *Opt. Letter.*, 2005, **30**, 1434.
23. Hansen D., Gardner E., Perkins R., Lines M., Robbins A. The Display Applications and Physics of the ProFlux™ Wire Grid Polarizer. *SID Intern. Symposium, Digest of Technical Papers*, 2002, **33**, 730–733.
24. <https://rus.legatronics.com/transition-from-spectrum-filter-polarizer-metallic-nano-slit-array-13640797>.
25. Patent US № 20080037101. Wire grid polarizer / Jagannathan R., Rao Y.Q., Mi X.D.; publ. 2005; Right holders: Eastman Kodak Co.
26. Hecht E., Zajac A. Optics. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1987, 676 p.
27. Xu M., Urbach H.P., de Boer D.K.G., Cornelissen H.J. Wire-grid diffraction gratings used as polarizing beam splitter for visible light and applied in liquid crystal on silicon. *Opt. Express*, 2005, **13**, 2303.
28. Yu Z., Deshpande P., Wu W., Wang J., Chou S.Y. Reflective polarizer based on a Stacked double-layer subwavelength metal grating structure fabricated using nanoimprint lithography. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**, 927.
29. Patent US № 6,122,103. Broadband wire grid polarizer for the visible spectrum / Perkins R.T., Hansen D.P., Gardner E.W., Thorne J.M., Robbins A.A.; publ. 2000; Right holders: Moxtek, Inc.
30. Patent US № 6,375,870. Replicating a nanoscale pattern / Visovsci N.J., Wang D.D.; publ. 2002; Right holders: Corning Incorporated.
31. <https://moxtek.com/optics-product/visible-polarizers/>
32. Patent US № 7,351,346. Non-photolithographic method for forming a wire grid polarizer for optical and infrared wavelength / Little M.J.; publ. 2008; Right holders: Agoura Technologies Inc.
33. Patent US № 6788461. Wire grid polarizer / Kurtz A., Ramanujan S., Mi X.-D.; publ. 2004; Right holder: Moxtek Inc.
34. Slocum R.E. Evaporative thin metal films as polarizers. *Proc. SPIE: Polarizers and Applications*, 1982, **0307**, 7 p. DOI: 10.1117/12.965901.
35. Luh L.S., Hu W., Jan J.D., Ou J.Y. A broadband circularly polarized film. *J. of the SID*, 2003, **11**, 457.

36. Chen S.H., Mastrangelo J.C., Jin R.J. Glassy liquid crystal films as broadband polarisers and reflectors via spatially modulated photoracemization. *Adv. Mater.*, 1999, **11**, 1183.
37. Chen S.H., Shi H., Mastrangelo J.C., Ou J.J. Thermotropic chiral nematic side-chain polymers and cyclic oligomers. *Progress in Polymer Science*, 1996, **21** (6), 1211–1233.
DOI: 10.1016/S0079-6700(96)00018-4.
38. Patent № EP 0407830A2. Illuminating devices providing polarised light, e.g., by converting a polarisation component into another one / Barnik M.I., Belyaev S.V., Fünfschilling J., Malimonenko N., Schadt M., Schmitt K.; publ. 1990; Right holders: F. Hoffmann-La Roche Ltd.
39. Patent № EP 0961138A1. Polarisers / Belyaev S.V., Karpov I.N., Khan I.G., Malimonenko N.V., Miroshin A.A., Shishkina E.Yu., Vorozhtsov G.N.; publ. 1990; Right holders: F. Hoffmann-La Roche Ltd.
40. Belayev S.V., Schadt M., Barnik M.I., Fünfschilling J., Malimonenko N.V., Schmitt K. Large aperture polarized light source and novel liquid crystal display operating modes. *Japanese J. Appl. Phys.*, 1990, **29**, L634–L637.
41. Zhang Lan-Ying, Gao Yan-Zi, Song Ping, Wu Xiao-Juan, Yuan Xiao, He Bao-Feng, Chen Xing-Wu, Hu Wang, Guo Ren-Wei, Ding Hang-Jun, Xiao Jiu-Mei, Yang Huai. Research progress of cholesteric liquid crystals with broadband reflection characteristics in application of intelligent optical modulation materials. *Chinese Physics B*, 2016, **25** (9), 096101.
42. Broer D. J., Lub J. & Mol G. N. Wide-band reflective polarizers from cholesteric polymer networks with a pitch gradient. *Nature*, 1995, 378, 467–469.
DOI: 10.1038/378467a0.
43. Ying Zhou. Cholesteric liquid crystal photonic crystal lasers and photonic devices : Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. University of Central Florida, Orlando, Florida. 2006.
44. АС СССР № 1775711. Устройство для преобразования черно-белых изображений в псевдо-цветные / В. В. Беляев, Ю. Д. Думаревский, Н. Ф. Ковтонюк, Л. В. Медведева, В. А. Овечкин, Е. Н. Сальников; приор. 17.12.90; опубл. БИ № 42 15.11.92; правообладатель ЦНИИ «Комета». [Author Certificate USSR № 1775711. Device for converting black-and-white images into pseudo-color / V.V. Belyaev, Yu.D. Dumarevsky, N.F. Kovtonyuk, L.V. Medvedeva, V.A. Ovechkin, E.N. Salnikov; prior. 17.12.90; publ. BI № 42, 15.11.1992; copyright holder of the Central Research Institute «Kometa», (in Russ.)].
45. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10498
46. Patent № US 2402166. Plastic sheet and method of manufacture / Land E.H.; publ. 1946; Right holder: Polaroid Corp.
47. Faris S.M. 3-D stereo devices. *SID Intern. Symposium, Digest of Technical Papers*, 1991, **22**, 840.
48. Cardillo L., Swift D., Meritt J. Advancements in 3-D stereoscopic display technologies: micropolarizers, improved LC shutters, Spectral Multiplexing, and CLC Inks. *J. Imaging Sci. Technol.*, 1998, 42, 300.
49. Faris S.M., Jiang Y., Ma K., DiNollo B., Lu Z., Kane S., Li L., Korenic E., Jacobs S.D. Novel full-color stereoscopic printing and painting. *SID Intern. Symposium, Digest of Technical Papers*, 1997, **28**, 627.
50. Patent № US 5457554. 3-D printing technology based on selective reflecting polarizing media / Faris S.M.; publ. 1995; Right holder: Reveo Inc.
51. Patent № US 5121343. 3-D stereo computer output printed / Faris S.M.; publ. 1992; Right holder: Reveo Inc.
52. Patent № US 5165013. 3-D stereo pen plotter / Faris S.M.; publ. 1992; Right holder: Reveo Inc.
53. Patent № US 5364557. Aligned cholesteric liquid crystal inks / Faris S.M.; publ. 1991; Right holder: Reveo Inc.
54. Patent WO № 2006131034. Optically variable ink having polarization effect / Wang Hongbo, Wu Yafu, Jin Jie, Zhang Shifan, Hua Ying; publ. 2006; Right holder: Shanghai Banknote Printing Co., Ltd.
55. Jiang Y., Wilson B., Hochbaum A., Carter J. Novel pigment approaches in optically variable security inks including polarizing cholesteric liquid crystal (CLC) polymers. Optical security and counterfeit deterrence techniques IV. *SPIE*, 2002, 4677.
56. Schmitt G., Giesa R., Schmidt H.-W. New nematic diacrylates with a calamitic core of four to six aromatic rings for the preparation of cholesteric networks. *Freiburger Arbeitstagung Flüssigkristalle*, 2000, 29, 10.
57. Patent № US 2524286. Flexible noncrystalline self-contained polarizing films and methods of making and using the same / Dreyer J.F.; publ. 1946; Right holder: J.F. Dreyer.
58. Patent № US 3658616. Method of making light polarizing patterns / Dreyer J.F.; publ. 1968; Right holder: J.F. Dreyer.
59. Patent № US 6049428. Dichroic light polarizers / Khan I.G., Bobrov Yu.A., Ignatov L.Ya., Shishkina E.Yu., Lazarev P.I., Kurbatov A.V.; publ. 1995; Right holder: Optiva Inc.
60. Patent № EP 1174738A3, US 20060215080. Technological machinery for production of polarizers / Bobrov Yu.A.; publ. 2002; Right holder: Optiva Inc.
61. Patent № US 6630289. Photo-patterned light polarizing film / Kwok H.S., Yip W.C., Chigrinov V.G., Kozenkov V.M.; publ. 2003; Right holder: HongKong University of Science & Technology.
62. Yip W.C., Kwok H.S., Kozenkov V.M., Chigrinov V.G. Photo-patterned e-wave polarizer. *Displays*, 2001, **22**, 27.

63. Zhao X., Boussaid F., Bermak A., Chigrinov V.G. Thin photo-patterned micropolarizer array for CMOS image sensors. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**, 805.
64. Lin T.H., Huang Y., Zhou Y., Fuh A.Y.G., Wu S.T. Photo-patterning micro-mirror devices using azo dyedoped cholesteric liquid crystals. *Optics Express*, 2006, **14**, 4479.
65. Chigrinov V.G., Kozenkov V.M., Kwok H.S. Photoalignment of liquid crystals: properties and application. A John Wiley @ Sons, Ltd., Publication, 2008. ISBN: 978-0-470-06539-6.
66. Ruslim C., Hashimoto M., Matsunaga D., Tamaki T., Ichimura K. Optical and Surface Morphological Properties of Polarizing Films Fabricated from a Chromonic Dye by the Photoalignment Technique. *Langmuir*, 2004, **20**, 95–100.
67. Ichimura K., Momose M., Fujiwara T. Photoimages Formed Lyotropic Liquid Crystals. *Chem. Letters*, 2000, **29** (9), 1022–1023. DOI: 10.1246/cl.2000.1022.
68. Ichimura K., Fujiwara T. Surface-assisted photoalignment control of lyotropic liquid crystals. Part 2. Photopatterning of aqueous solutions of a water-soluble anti-asthmatic drug as lyotropic liquid crystals. *Chemistry Letters*, 2002, **12**, 3387–3391. DOI: 10.1039/B208311F.
69. Ichimura K., Fujiwara M., Momose M., Matsunaga D. Surface-assisted photoalignment control of lyotropic liquid crystals. Part 1. Characterisation and photoalignment of aqueous solutions of a water-soluble dye as lyotropic liquid crystals. *J. of Mater. Chem.*, 2002, **12**, 3380–3386. DOI: 10.1039/B208310H.
70. Patent № US 6686980. Anisotropic film containing a copolymer including a monomer containing a dichroic dye and liquid crystal display containing the anisotropic film / Ichihashi M.; publ. 2004; Right holder: Fuji Photo Film Co.
71. Ruslim C., Hashimoto M., Matsunaga D., Tamaki T., Ichimura K. Optical and Surface Morphological Properties. *Langmuir*, 2004, **20**, 5.
72. Matsunaga D., Tamaki T., Akiyama H., Ichimura K. Photofabrication of micro-patterned polarizing elements for stereoscopic displays. *Advanced Materials*, 2002, **14**, 1477.
73. Yamaguchi R. Security applications of liquid crystal film with plural latent images. *Proceedings SPIE*, 2009, **7232**, 76232. DOI: 10.1117/12.805229.
74. Yamaguchi R., Mizutori R., Sato S. Latent image forming by exposure, development and fixing on LC cells. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2005, **438**, 101/1080.
75. Patent WO № 2010046708. Security device and method / Drinkwater K.J.; publ. 2010; Right holder: Yeadon IP Limited.
76. Козенков В. М., Спахов А. А., Беляев В. В., Чаусов Д. Н., Чигринов В. Г. Спектральная фотосенсибилизация оптической анизотропии в твердотельных пленках поли(винилциннамата) // *Журн. техн. физики*. 2018. Т. 88, вып. 4. С. 592–596. [Kozenkov V.M., Spakhov A.A., Belyaev V.V., Chaushov D.N., Chigrinov V.G. Spectral photosensitization of optical anisotropy in solid-state poly(vinylcinnamate) films). *J. of Techn. Phys.*, 2018, **88** (4), 592–596. DOI: 10.21883/JTF.2018.04.45729.2263].
77. Oo T.N., Bansho R., Tanaka N., Kimura M., Akahane T. Investigation of alignment of nematic LC on micropatterned polyimide surface. *Japanese J. of Appl. Phys.*, 2006, **45**, 4176.
78. Патент № RU 2683873. Способ формирования поляризационно-чувствительного материала, поляризационно-чувствительный материал, полученный указанным способом, и поляризационно-оптические элементы и устройства, включающие указанный поляризационно-чувствительный материал / Козенков В. М., Чаусов Д. Н., Беляев В. В., Спахов А. А.; опубл. 2019; Правообладатель: Московский государственный областной университет. [Patent № RU 2683873. A method for forming a polarization-sensitive material, a polarization-sensitive material obtained by this method, and polarization-optical elements and devices including the specified polarization-sensitive material / Kozenkov V.M., Chaushov D.N., Belyaev V.V., Spakhov A.A.; publ. 2019; Right holder: MRSU.
79. Патент № RU 2707990. Поляризационно чувствительный материал / Козенков В. М., Чаусов Д. Н., Беляев В. В., Спахов А. А., опубл. 2019; Правообладатель: Московский государственный областной университет. [Patent № RU 2707990. Polarizing sensitive material / Kozenkov V.M., Chaushov D.N.; publ. 2019; Right holder: MRSU.
80. Козенков В. М., Спахов А. А., Беляев В. В., Чаусов Д. Н. Оптически анизотропные и интерференционные средства защиты: свойства, технология, применение // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2016. Т. 16, № 4. С. 9–21. [Kozenkov V.M., Spakhov A.A., Belyaev V.V., Chaushov D.N. Optically anisotropic and interference protection devices: properties, technology, application. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2016, **16** (4), 9–21, (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2016.4.9].
81. Patent WO 03/027568, US 20030058383. Microstructured illumination system for providing polarized light / Hendrik J.B.; publ. 2003; Right holders: H.J.B. Jagt, C. Bastiaansen, H.J. Cornelissen, D.J. Broer.
82. Patent US № 20020141059. Large scale polarizer and polarizer system employing it / Choi J.B., Song B.D., Yoon K.H.; publ. 2002; Right holders: LG Electronics Inc.

83. Patent US № 5340504. Light-polarizing films containing dichroic dyes / Claussen U.; publ. 1994; Right holders: Bayer AG.
84. Suzuki M. Reflective polarizer sheet on the backlighting unit. *SID Intern. Symposium, Digest of Technical Papers*, 1997, **27**, 813.
85. West J.L., Magyar G.R., Kelly J.R., Kobayashi S., Imura Y., and Yoshida N. Dichroic ultraviolet absorption of thin liquid crystal films. *Applied Physics Letters*, 1995, **67**, 155.
86. Patent US № 5434687. Liquid crystal display device having polarization areas in radial or concentric ring pattern / Kawata Y., Sunohara K., Kizu Y., Sakamoto W., Kawasaki M.; publ. 1995; Right holder : Toshiba KK.
87. Patent № US-7265800-B2 (WO03027568). Micro-structured illumination system for providing polarized light / Jagt H.J.B., Bastiaansen C., Cornelissen H.J., and Broer D.J.; publ. 2007; Right holders : Koninkl Philips Electronics NV, Stichting Dutch Polymer Institute.
88. Patent US № 6639720. Large scale polarizer and polarizer system employing it / Beom C.J., Duck S.B., Hyuk Y.K.; publ. 2003; Right holder : LG Electronics Inc.
89. Беляев В. В., Чилая Г. С. Жидкие кристаллы в начале XXI века : монография. М. : ИИУ МГОУ, 2017. 142 с. [Belyaev V.V., Chilaya G.S. Liquid crystals at the beginning of the XXI century : *monograph*. Moscow: Information and Publishing Department MRSU, 2017. 142 p. ISBN 978-5-7017-2785-2.
90. Беляев В. В. Перспективные применения и технологии жидкокристаллических устройств отображения информации и фотоники // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2015. Т. 15, № 3. С. 7–27. [Belyaev V.V. Promising applications and technologies of liquid crystal display devices and photonics. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2015, **15** (3), 7–27 (in Russ.)].
91. Беляев В. В. Жидкокристаллические дисплеи. Технологии настоящего и будущего. Ч. 1: От пикселя до гибкой подложки // *Электроника : Наука, технология, бизнес*. 2015. Т. 148, № 8. С. 36–47. [Belyaev V.V. Liquid crystal displays. Technologies of the present and future. Part 1: From pixel to flexible substrate. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2015, **148** (8), 36–47 (in Russ.)].
92. Беляев В. В. Жидкокристаллические дисплеи. Технологии настоящего и будущего. Ч. 2: Новые технологии и области применения ЖК-дисплеев. // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2015. Т. 150, № 10. С. 124–131. [Belyaev V.V. Liquid crystal displays. Technologies of the present and future. Part 2: From pixel to flexible substrate. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2015, **150** (10), 124–131 (in Russ.)].
93. https://www.3m.com/3M/en_US/industrial-manufacturing-us/display-enhancement-and-protection-films-industrial-manufacturing/display-enhancement-films/.
94. Display Enhancement Films [Electronic resource] // 3M, 2015. URL: http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/IndustrialFilms/Home/Products/DisplayEnhancementFilms/.
95. 3M Vikuiti Dual Brightness Enhancement Film // 3M, 2015. URL: <http://www.3m.com/product/information/Vikuiti-Dual-Brightness-Enhancement-Film.html>.
96. Chen J., Hartlove J., Hardev V., Yurek J., Lee E., Gensler S. High Efficiency LCDs using Quantum Dot Enhancement Films. *SID Intern. Symposium, Digest of Technical Papers*, 2014, **45**, 1428–1431.
97. Каманина Н. В., Лихоманова С. В., Васильев П. Я., Студёнов В. И., Чернозатонский Л. А., Ваганов В. Е., Мишаков И. А. Изменение поверхностных свойств тонкопленочных поляризаторов с углеродными наноструктурами // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 24. С. 49–52. [Kamanina N.V., Likhomanova S.V., Studenov V.I., Vasiliev P.Ya., Chernozatonskiy L.A., Vaganov V.E., Mishakov I.A. Change of surface properties of thin film polarizers with carbon nanostructures. *Pis'ma v ZhTF (Technical Physics Letters)*, 2011, **37** (24), 49–52. (in Russ.)].
98. Каманина Н. В., Студенов В. И., Ткачёв А. Г. Тонкопленочные поляризаторы света: структурирование объема среды и модификация поверхности // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2020. Т. 20, № 4. С. 69–74. [Kamanina N.V., Studenov V.I., Tkachev A.G. Thin film light polarizers, structuring of medium bulk and surface modification. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2020, **20** (4), 69–74. (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2020.4.69].
99. Патент RU № 2426157 C1. Поляризационные пленки для видимого диапазона спектра с наноструктурированной поверхностью на основе углеродных нанотрубок / Каманина Н. В., Васильев П. Я., Студёнов В. И.; опубли. 2010; Правообладатели: авторы. [Patent RU № 2426157 C1. Polarization films for visible spectrum range with nanostructured surface based on carbon nanotubes / Kamanina N.V., Vasiliev P.Ya., Studenov V.I.; publ. 2010; Right holder: authors.
100. Патент RU № 2498373 C2. Поляризационные пленки для видимого диапазона спектра с наноструктурированной поверхностью на основе углеродных нанотрубок и нановолокон / Каманина Н. В., Васильев П. Я., Студёнов В. И.; опубли. 2013; Правообладатель: «НПК «Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова». [Patent RU

-
-
- № 2498373 C2. Polarization films for visible spectrum range with nanostructured surface based on carbon nanotubes and nanofibers / Kamanina N.V., Vasiliev P.Ya., Studenov V.I.; publ. 2013; Right holder: Vavilov State Optics Institute].
101. Патент RU № 2697413 C1. Поляризационные пленки для видимого диапазона спектра с наноструктурированной поверхностью на основе наночастиц кварца / Каманина Н. В., Васильев П. Я., Рожкова Н. Н.; опубл. 2019; Правообладатели: авторы. [Patent RU № 2697413 C1. Polarization films for visible spectrum range with nanostructured surface based on quartz nanoparticles / Kamanina N.V., Vasiliev P.Ya., Rozhkova N.N.; publ. 2019; Right holder: authors].
102. Jagt H., Dirix Y., Hikmet R., and Bastiaansen C. Linear polarizers based on oriented polymer blends. *Advanced Materials*, 1998, 10, 934.
103. Aphonin O.A., Panina Yu.V., Pravdin A.B., Yakovlev D.A. Optical properties of stretched polymer dispersed LC films. *Liq. Cryst.*, 1993, 15, 395.

Поступила 17.03.2021 г.

Received 17.03.2021

Принята 19.04.2021 г.

Accepted 19.04.2021