

Электрооптические свойства полимерно-диспергированных жидких кристаллов, допированных наночастицами

В. Беляев, д. т. н.^{1,2}, В. Авдеенков¹

УДК 544.25 | ВАК 2.2.2, 2.3.2

Представлен обзор существующих на данный момент технологий изготовления и описаны свойства полимерно-диспергированных жидких кристаллов (ПДЖК), применяемых в «умных» стеклах, электрооптических затворах для формирования трехмерного изображения, в медицинских приборах.

Пленки ПДЖК, по-английски polymer-dispersed liquid crystal (PDLC), состоят из микрокапель ЖК, диспергированных в полимерной матрице. В отсутствие напряжения эти пленки выглядят мутными, так как показатели преломления жидкого кристалла и полимера отличаются, и свет рассеивается в неоднородной среде. Благодаря анизотропным свойствам жидкого кристалла, такие пленки легко переключаются из рассеивающего в прозрачное состояние (показатели преломления жидкого кристалла и полимера становятся равными).

ТЕХНОЛОГИЯ ПДЖК

Композиты полимер/жидкий кристалл, в которых полимерная сетка или полимерная матрица используется для стабилизации и модификации жидкокристаллической фазы, имеют большое значение при разработке новых адаптивных оптических устройств благодаря сочетанию уникальных характеристик чувствительности ЖК и пленкообразующих свойств, а также механической прочности полимеров [1–3]. На этой основе разработано несколько типов композитов, наиболее известным из которых является ПДЖК.

В обычной пленке ПДЖК директор жидкого кристалла (вектор, указывающий направление длинных осей молекул жидкого кристалла) внутри капель ЖК обычно ориентирован случайным образом, что приводит к рассеянию входящего света в условиях, когда размер капель близок к длине волны света [4–5]. Приложение внешнего поля вызывает переориентацию директора и увеличивает светопропускание ПДЖК, поскольку показатель

преломления ЖК-фазы в перестроенном состоянии постепенно изменяется таким образом, что приближается к соответствию показателя преломления полимерной матрицы [6–7].

ПДЖК широко используются для изготовления адаптивных оптических пленок, а также перспективных применений во многих областях, начиная от умных окон, которые могут переключаться между мутным и прозрачным состояниями, и заканчивая трехмерными дисплеями [8–9]. ПДЖК обладают значительными преимуществами в области регулирования освещенности, поскольку они не нуждаются в поляризаторах и специальной обработке для ориентации мезогенных молекул (молекул жидкого кристалла) [10–11]. Возможно легко производить большие пленки ПДЖК по низкой цене. Некоторые пленки ПДЖК коммерциализированы, и на рынке можно найти широкий ассортимент соответствующей продукции.

Однако некоторые серьезные недостатки по-прежнему ограничивают применение продуктов из ПДЖК в ряде случаев [12–13]. Например, рабочее напряжение ПДЖК обычно довольно велико из-за высокой концентрации полимера [14–15], что приводит к повышению энергопотребления и коротким замыканиям. Также стоит задача уменьшения времени переключения между рассеивающим и пропускающим состояниями, а также увеличения светопропускания в открытом состоянии и рассеяния (мутности) в закрытом.

В настоящее время появился ряд обзоров, публикаций и патентов по технологии ПДЖК. В данной статье будут рассмотрены устройство и принципы работы пленок ПДЖК, технологии их изготовления, в основном за счет допирования ЖК-материалов наночастицами различных веществ для улучшения их свойств, и примеры их использования на практике.

¹ Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, Россия, Москва.

² Государственный университет просвещения, Россия, г. Мытищи.

КОНСТРУКЦИЯ ПЛЕНОК ПДЖК И ПРИНЦИПЫ ИХ РАБОТЫ

Обычная пленка ПДЖК состоит из полимера в качестве непрерывной матрицы и капель жидкого кристалла микронного или субмикронного размера, диспергированных в матрице (рис. 1). Полимеры в качестве матрицы обеспечивают механическую прочность и возможность образовать пленку, а капли жидкого кристалла формируют сам ПДЖК с электрооптическими характеристиками.

Как правило, к образованию ПДЖК приводит разделение фаз полимера и жидкого кристалла [16–17]. Существуют четыре метода изготовления ПДЖК: процесс микрокапсулирования; фазовое разделение, индуцированное растворителем; температурно-индуцированное фазовое разделение; фазовое разделение, индуцированное реакцией полимеризации [18–19]. Среди этих методов последний является наиболее распространенным методом изготовления ПДЖК благодаря простоте в исполнении и хорошей отработанности [20]. В данном методе сначала равномерно смешивают низкомолекулярные жидкие кристаллы и полимеризуемые мономеры. Затем, путем термической полимеризации или фотополимеризации, мономеры «сшиваются» и образуются полимерные матрицы. В ходе реакции полимеризации смешанность жидких кристаллов и полимера постепенно снижается, что приводит к фазовому расслоению и образованию жидкокристаллических капель, включенных в матрицу [21].

Электрически переключаемая светопрозрачность – самое интересное свойство ПДЖК. Благодаря возможности переключения между прозрачным и непрозрачным состояниями под действием электрического поля пленки ПДЖК смогли выйти на рынок в качестве технологической основы целого ряда различных устройств.

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛЕНОК ПДЖК

Метод изготовления с использованием УФ-излучения

В работе [22] описан распространенный вариант технологии изготовления пленок ПДЖК с использованием ультрафиолетового (УФ) излучения.

Компоненты

В этом методе используются УФ-мономеры и фотоинициаторы. В качестве жидкого кристалла применялся ряд коммерческих жидкокристаллических смесей (E8, SLC1717, VNR32200-100, SLC189013, VNR40290, B001). В качестве сшивающих мономеров – диметакрилат этоксилата

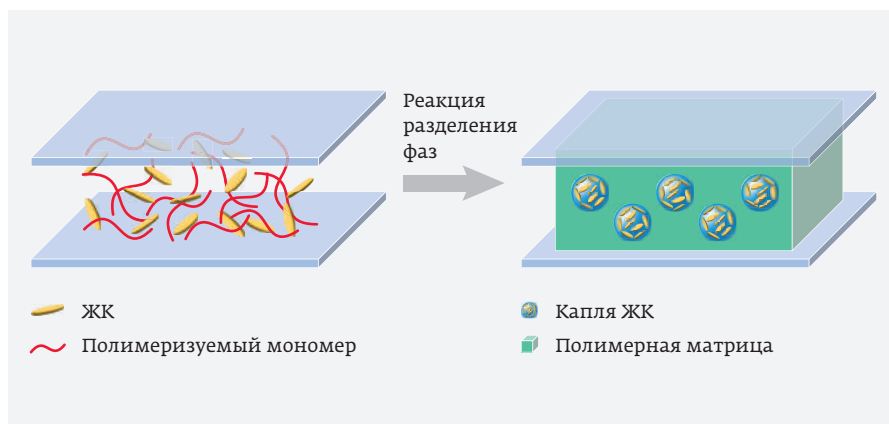


Рис. 1. Схема изготовления и микроструктуры ПДЖК

(Bis-EMA15) и диакрилат полиэтиленгликоля (PEGDA700). В качестве сополимеризационных мономеров использовали лаурилметакрилат (LMA) и гидроксипропилметакрилат (HPMA). Фотоинициатор – Irgacure 651. Химическая структура мономеров представлена на рис. 2.

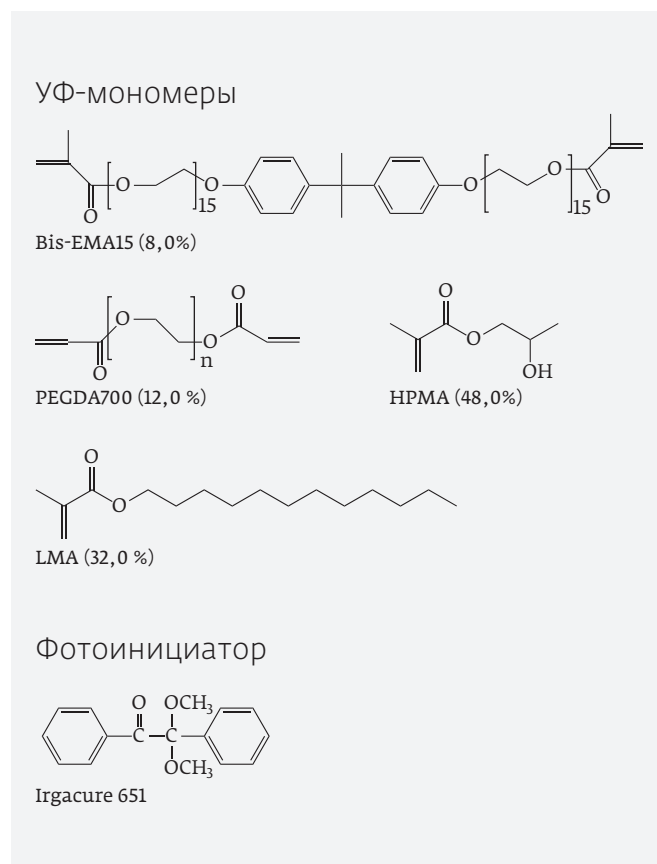


Рис. 2. Химическая структура используемых УФ-мономеров и фотоинициатора

Таблица 1. Составы всех изученных в [22] образцов

Образец	ЖК-смесь	Состав ЖК	Доля ЖК, %	Доля УФ-мономеров, %
Группа А				
A1	E8		50	50
A2	SLC1717		50	50
A3	BHR32200-100		50	50
A4	SLC189013		50	50
AS	BHR40290		50	50
A6	B001		50	50
Группа В				
B0	E8	E8	50	50
B1	#1	E8/B001	50 (80 / 20)	50
B2	#2	E8/B001	50 (60 / 40)	50
B3	#3	E8/B001	50 (50 / 50)	50
B4	#4	E8/B001	50 (40 / 60)	50
B5	#5	E8/B001	50 (20 / 80)	50
B6	B001	B001	50	50

Изготовление образцов

Для изготовления пустой ПДЖК-ячейки были взяты две стеклянные подложки, покрытые пленкой оксида индия-олова в качестве прозрачного электрода. Зазор между подложками поддерживался на уровне 19 ± 1 мкм при помощи полиэфирной прослойки. Затем была приготовлена суспензия из жидкокристаллической смеси, УФ-мономеров (мономеров, полимеризирующихся под воздействием ультрафиолетового облучения) и фотоинициатора. Эта суспензия была тщательно перемешана до полностью однородного состояния, после чего она была введена в подготовленные ранее пустые ячейки. В конце была получена пленка ПДЖК путем процесса разделения фаз, индуцированного свободнорадикальной полимеризацией, в свою очередь инициированной облучением УФ-излучением.

Интенсивность УФ-облучения ($\lambda = 365$ нм) на поверхности ячеек составила около $5,5$ мВт/см², облучение производилось в течение десяти минут. Реакция инициированной ультрафиолетом полимеризации была проведена при комнатной температуре (25 °С). Масса фотоинициатора Irgacure 651 составила 3% от массы УФ-мономеров. Составы ПДЖК, получаемые в данном исследовании, перечислены в табл. 1.

Измерения

Морфология образцов исследовалась при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Пленки были разрезаны на мелкие кусочки, которые были отделены друг от друга, затем они были погружены в циклогексан на 20–25 дней при комнатной температуре для выделения молекул жидкого кристалла, а затем просушены в течение двенадцати часов в вакуумном сушильном шкафу при 40 °С. Затем, после напыления пленок наночастицами золота, микроструктура полимерной сетки была изучена при помощи СЭМ.

Электрооптические свойства образцов В0–В4 были измерены при различных температурах с помощью тестера параметров жидкокристаллических дисплеев (ЖКД) (V2000) и термостатического шкафа, который может изменять температуру рабочей среды тестера параметров ЖКД от 20 до 70 °С. Электрооптические свойства образцов А1–А6 измеряли при комнатной температуре (25 °С) с использованием тестера параметров ЖКД (LCT-5016С). В обоих тестерах параметров ЖКД в качестве источника падающего света использовалась галогенная вольфрамовая лампа, коэффициент пропускания образцов регистрировался фотодиодом, а отклик фотодиода, в свою очередь, измерялся при помощи цифрового запоминающего осциллографа. Электрическое поле колебалось по модели прямо с частотой 100 Гц. Коэффициент пропускания пустых ЖК-ячеек нормировали за 100%, а результаты регистрировали с углом падения, равным $\delta = 0$.

Химическую текстуру жидких кристаллов, температуру просветления жидких кристаллов и сами жидкие кристаллы (система E8 / B001) в образцах В0–В4 после полимеризации наблюдали при помощи микроскопа, оборудованного температурным столиком, откалиброванным с точностью $\pm 0,1$ °С. Кроме того, для исследования смешиваемости через поляризационный оптический микроскоп были произведены наблюдения изображений жидкокристаллических смесей и УФ-мономеров в образцах А1–А6 перед отверждением при 25 °С.

Результаты

Поскольку температура просветления коммерческих жидкокристаллических смесей составляла до 115,5 °С, они демонстрировали плохую смешиваемость с акрилатной полимерной матрицей перед отверждением при комнатной температуре, что приводило к большому размеру жидкокристаллических областей и плохим электрооптическим свойствам ПДЖК, хотя оптическая и диэлектрическая анизотропия коммерческих жидкокристаллических смесей были высокими. Затем, основываясь на результатах первого эксперимента с первой группой, была изготовлена серия жидкокристаллических смесей с разной температурой просветления путем изменения относительных пропорций смесей E8 и B001 для дальнейшего

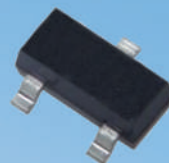


Департамент радиоэлектронной промышленности
Министерства промышленности и торговли РФ

АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ»

МОП-транзисторы

P- и n-канальные MOSFET транзисторы в малогабаритном металлополимерном корпусе типа SOT-23-3 (аналоги: IRLML2803, IRLML5103, IRLML2402PBf, BSS138I и др.) Предназначены для применения в зарядных устройствах аккумуляторных батарей, коммутаторах нагрузки, электроприводах, телекоммуникационном оборудовании и др.



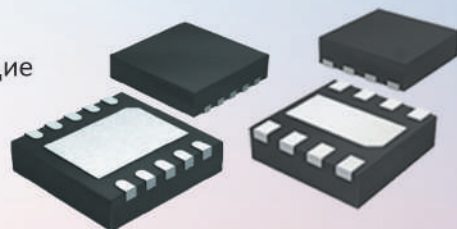
Параметр	Обозначение параметра	*				**			
		2П526А9 IRLML 2803	2П527А9 IRLML 5103	2П531А9 IRLML2402PBf	2П528А9 BSS138I	2П529А9 SN7002N	2П532А9 IRLML6302PBf	2П530А9 BSS84P	
Тип канала	-	n-канальный	p-канальный	n-канальный	n-канальный	n-канальный	p-канальный	p-канальный	
Напряжение пробоя сток-исток	$U_{\text{сипроб, В}}$	>30	>-30	>20	>60	>60	>-20	>-60	
Сопротивление сток-исток в открытом состоянии	$R_{\text{сиотн, Ом}}$	≤0,25	≤0,6	≤0,25	≤3,5	≤5	≤0,6	≤8	
Пороговое напряжение	$U_{\text{зипор, В}}$	0,7...2,0	-3,5...-1,0	0,7...2,0	0,6...1,4	0,8...1,8	-0,7...-1,5	-1,5...-2,0	
Максимально допустимый ток стока	$I_{\text{стmax, А}}$	1,2	-0,76	1,2	0,23	0,2	-0,78	0,17	
Максимально допустимый импульсный ток стока	$I_{\text{с,и,тmax, А}}$	7,3	-4,8	7,4	0,92	0,8	-4,9	0,68	

* - серийно освоены;

** - возможна поставка опытных образцов. Выполняется ОКР по освоению (со сроком окончания 2 кв. 2024г).

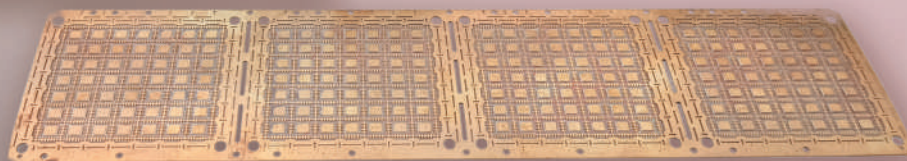
Корпуса QFN(DFN)

АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» предлагает услуги по сборке в следующие малогабаритные металлополимерные корпуса (толщиной 1 мм) для поверхностного монтажа типа QFN(DFN). Герметизация корпусов выполняется по методу литьевого прессования под давлением.



Наименование	Габаритный размер корпуса, мм		Толщина корпуса, мм	Размер кристаллодержателя, мм		Шаг выводов, мм	
DFN-6	3,0 x 3,0		1,0	2,5 x 1,7		0,95	
DFN-8	4,0 x 4,0	5,0 x 5,0		3,0 x 2,6	4,0 x 3,2	0,8	1,0
DFN-10							
QFN-16	5,0 x 5,0			3,0 x 3,0		0,65	
QFN-20							

В рамках выполнения работ, запланированных комплексным проектом, к расширению номенклатуры дополнительно разрабатывается и осваивается серия следующих малогабаритных металлополимерных корпусов для поверхностного монтажа типа QFN(DFN).



Техническая консультация :
Чайкин А.А. alchaikin@outlook.com
Алехин С.С. salekhin@outlook.com
тел.(4832) 41-90-11

Заказ продукции:
<http://group-kremny.ru>
mark@kremny.032.ru
тел.(4832) 41-85-91

241037, Россия, г. Брянск,
ул. Красноармейская, 103
тел. (4832) 41-43-11
факс (4832) 41-42-14

изучения влияния температуры на электрооптические свойства ПДЖК. Результаты показали, что смешиваемость между жидкими кристаллами и акрилатной полимерной матрицей перед отверждением при комнатной температуре может быть улучшена, пока массовая доля В001 в системе E8/В001 составляет не более 60%; температура просветления жидкокристаллических смесей, используемых в образцах В1–В4, варьировалась от 84,2 до 114,7°C. Следовательно, по сравнению с образцом В0 могут быть улучшены не только электрооптические свойства образцов В1–В4 в условиях высокой температуры, но и мало изменились электрооптические параметры (пороговое напряжение, рабочее напряжение контраст (отношение пропускания в прозрачном и рассеивающем состоянии)) при изменении температуры испытания от 30 до 70 °С при использовании жидкокристаллических смесей с высокой температурой просветления. Кроме того, результаты также показали, что необходимо изучить влияние различных молекулярных структур жидких кристаллов с высокой температурой просветления на смешиваемость с акрилатной полимерной матрицей в жидком состоянии, полимерную сетку и электрооптические свойства ПДЖК после полимеризации ультрафиолетовым излучением.

Метод изготовления с использованием термообработки

Используемые компоненты

В работе [23] описан вариант технологии изготовления пленок ПДЖК с использованием термообработки.

В качестве эпоксидных мономеров использовали 2,2-бис(4-(2,3-эпоксипропилокси)фенил)пропан (BADGE) и поли(пропиленгликоль)-диглицидиловый эфир (PEGDE). Тиоловый мономер – Capcure 3800. Катализатором был трис(2-аминоэтил)амин (N-3). В качестве контрольного катализатора использовали 2,4,6-трис(диметиламино)метил)фенол (DMP-30). Использовалась коммерческая нематическая жидкокристаллическая смесь E8.

Изготовление образцов

Берутся две ПЭТ-пленки, аналогично покрытые оксидом индия-олова или другого прозрачного электрода, между которыми поддерживается аналогичный зазор в $19,0 \pm 1,0$ мкм. Гомогенизированная суспензия из

Таблица 2. Составы и температуры отверждения всех образцов

Образец	Состав ЖК, %	Смесь, %	Температура отверждения, °С
A	Смесь/E8 (60,0/40,0)	BADGE/PEGDE/Capcure 3800/DMP-30 (30,0/20,0/48,6/1,4)	60
B	Смесь/E8 (60,0/40,0)	BADGE/PEGDE/Capcure 3800/N-3 (30,0/20,0/50,0/0)	60
C	Смесь/E8 (60,0/40,0)	BADGE/PEGDE/Capcure 3800/N-3 (30,0/20,0/48,6/1,4)	60
C1	Смесь/E8 (60,0/40,0)	BADGE/PEGDE/Capcure 3800/N-3 (30,0/20,0/48,6/1,4)	40
C2	Смесь/E8 (60,0/40,0)	BADGE/PEGDE/Capcure 3800/N-3 (30,0/20,0/48,6/1,4)	50
C3	Смесь/E8 (60,0/40,0)	BADGE/PEGDE/Capcure 3800/N-3 (30,0/20,0/48,6/1,4)	60
C4	Смесь/E8 (60,0/40,0)	BADGE/PEGDE/Capcure 3800/N-3 (30,0/20,0/48,6/1,4)	70
C5	Смесь/E8 (60,0/40,0)	BADGE/PEGDE/Capcure 3800/N-3 (30,0/20,0/48,6/1,4)	80

эпоксидных мономеров и тиоловых мономеров, катализатора полимеризации и жидкокристаллической смеси заливается в пустые ПДЖК-ячейки, после чего термически обрабатывается. В данном случае разделение фаз происходит в процессе термически-индуцированного отверждения мономерной суспензии в ходе ее полимеризации. Составы и температуры отверждения всех образцов приведены в табл. 2.

Измерения

Для получения поляризационных оптических микрофотографий образцов на различных этапах отверждения использовался поляризационный оптический микроскоп (ПОМ) со скрещенными поляризаторами. Электрооптические характеристики образцов ПДЖК измеряли с помощью тестера параметров ЖКД (LCT-5016С). Электрическое поле было модулировано прямоугольной волной с частотой 100 Гц, а расстояние между детектором и образцами составляло примерно 30 см. Электрическое поле переменного тока создавалось генератором сигналов (Keysight 33500В) с двадцатикратным усилителем (A400D1).

Морфология полимера в образцах пленок ПДЖК изучалась при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Перед наблюдением образец был предварительно погружен в гексан на две недели при комнатной температуре для выделения молекул жидкого кристалла,

а затем высушен в течение 24 ч в вакуумном сушильном шкафу. Затем на образец напылялись тонкие контактные слои золота, после чего были произведены наблюдения за морфологией полимерной сетки.

Результаты

Температура является важным фактором, определяющим скорость термического отверждения, а также играет важную роль в фазовом разделении между полимерами и жидкими кристаллами в образцах ПДЖК. Поэтому особенно важно изучить влияние температуры на изготовление ПДЖК.

Результаты испытаний электрооптических характеристик образцов из табл. 2, отвержденных при различных температурах, показаны на рис. 3. Электрооптические характеристики сдвигаются вправо по мере повышения температуры отверждения (рис. 3а). T_{off} (коэффициент пропускания в выключенном состоянии) образцов С1 и С2 превышал 45%, что указывает на их плохую светорассеивающую способность в условиях отсутствия поля. T_{off} образцов С3–С5 был ниже 5%, а контраст выше 60 (рис. 3б). Кроме того, следствием более высокой температуры также стало большее рабочее напряжение образцов (рис. 3в). Результаты также показали, что образец, отвержденный при 70 °С, показал контраст около 93 и пороговое напряжение около 29 В, что означает, что образец может полностью управляться напряжением ниже безопасного напряжения (36 В).

На рис. 4а представлены цифровые фотографии образца С4, отвержденного при 70 °С в течение четырех часов. Образец был заключен между двумя пленками, покрытыми оксидом индия-олова. При выключенном поле пленка демонстрировала сильное светорассеяние, что делало логотип позади нее невидимым. После подачи напряжения 36 В пленка стала прозрачной, что привело к видимости логотипа. Также, благодаря гибкости ПЭТ-пленок, может быть получена гибкая пленка ПДЖК, а изогнутая пленка по-прежнему имеет электрически переключаемый коэффициент пропускания. Кроме того, пленка ПДЖК также может быть прикреплена к окну, реализуя тем самым умное окно, коэффициент пропускания видимого света которого переключается напряжением 36 В (рис. 4б, в).

В конце операции в качестве катализатора в ПДЖК-систему на эпоксидной основе было добавлено коммерческое соединение с мультиаминой структурой. Экспериментальные результаты показывают, что этот катализатор не приводит к серьезной проблеме пожелтения пленок ПДЖК. Кроме того, катализатор может ускорить процесс термического отверждения эпоксидных и тиоловых мономеров и способствовать повышению эффективности изготовления пленок ПДЖК на основе эпоксидной смолы. Было изучено влияние времени и температуры отверждения на электрооптические характеристики

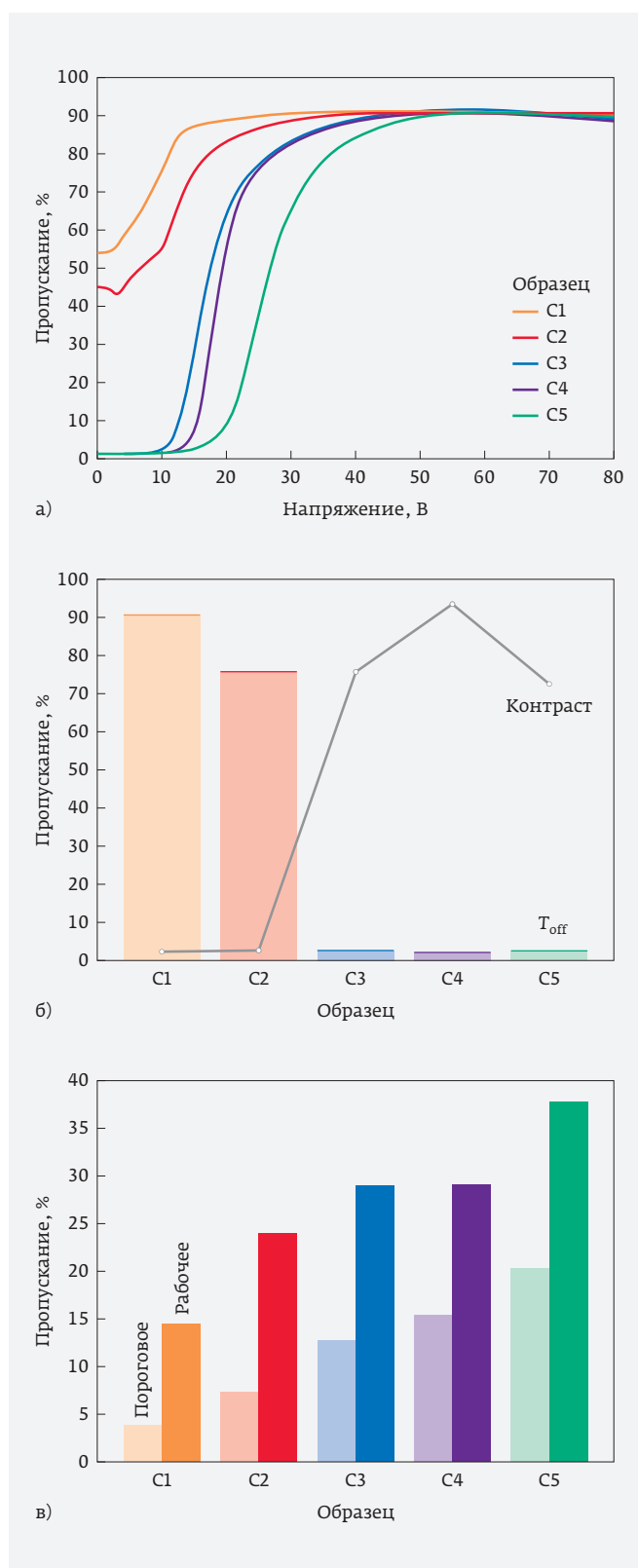


Рис. 3. а – зависимость коэффициента пропускания от приложенного напряжения; б – пропускание в выключенном состоянии T_{off} и контраст; в – пороговое и рабочее напряжения образцов С1–С5

и морфологию полимера в ПДЖК на эпоксидной основе. Оптимальный образец ПДЖК на эпоксидной основе показал контраст около 93 и рабочее напряжение около 29 В. Кроме того, также успешно изготовлена и использована в качестве смарт-окна гибкая пленка ПДЖК на эпоксидной основе, которая может полностью управляться напряжением ниже безопасного напряжения (36 В).

ЭФФЕКТЫ ОТ ДОПИРОВАНИЯ ПЛЕНОК НАНОЧАСТИЦАМИ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

В настоящее время наблюдается бум исследований и разработок, в которых добиваются существенного улучшения эксплуатационных свойств пленочных электрооптических модуляторов: снижение рабочего напряжения и времени переключения, улучшение оптических характеристик за счет применения наночастиц и других внедренных объектов: наночастиц TiO_2 [24], ZnO [25], Al_2O_3 [26], Fe_3O_4 [27], ZrO_2 [28] и кремнийорганических нанонаполнителей [29].

В одной из анализируемых работ [29] в ПДЖК добавляются кремнийорганические нанонаполнители в концентрации 5%. В результате акрилатные группы на поверхности частицы взаимодействуют с полимером композитного материала и значительно уменьшается рабочее напряжение (с 33,3 до 23 В для наполнителя KH570-POSS и с 33,3 до 10 В для наполнителя KH570-SiO₂). При концентрации 2% контраст (отношение пропускания в прозрачном и мутном состоянии) увеличивается до 100 и более. Много работ посвящено технологии и свойствам ПДЖК при добавлении нано- и микро-частиц окислов металлов. Добавление наночастиц TiO_2 приводит [24] к уменьшению рабочего напряжения с 61 до 21,7 В (порог электрооптического эффекта). Добавка наночастиц окисла цинка приводит [25] к уменьшению рабочего напряжения при почти полном сохранении пропускания и контраста. Показано, что при концентрации ZnO 2% пороговое напряжение уменьшается почти вдвое с 39,5 до 21,1 В, а рабочее напряжение с 71 В до 45 В. В другой работе [26] продемонстрировано существенное уменьшение рабочих напряжений электрооптической модуляции света при введении в ПДЖК наночастиц Al_2O_3 . В следующей работе [27] показано, что электрооптические характеристики ПДЖК улучшаются при диспергировании магнитного

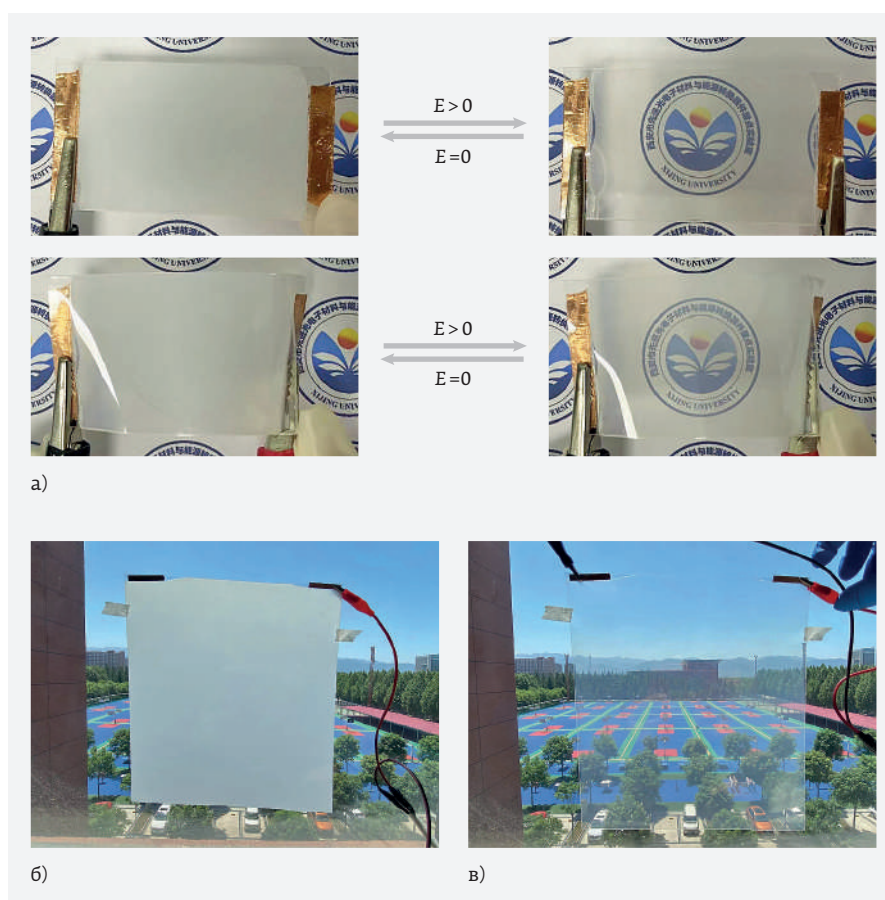


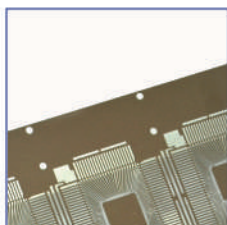
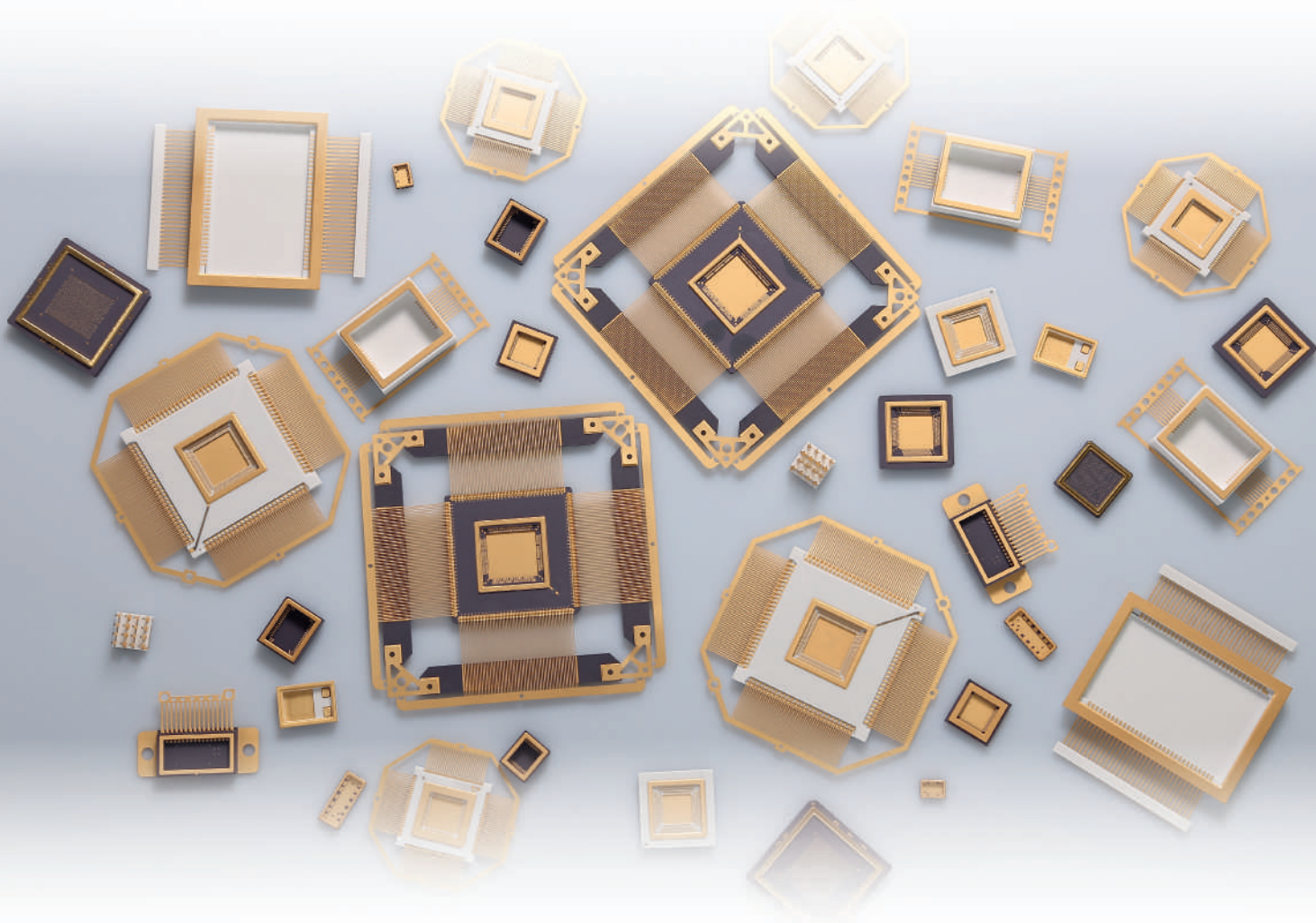
Рис. 4. а – фотографии образца С4 в разных состояниях; б – фотографии образца С4 в состоянии при выключенном поле; в – при включенном

материала в ПДЖК. При добавлении 1% наночастиц Fe_3O_4 получена ПДЖК-пленка с пороговым напряжением 24,1 В, пороговым напряжением 54,5 В и контрастом, равным 90. В работе [28] показано, что достигается уменьшение порогового напряжения с 26,1 до 20,7 В при введении наночастиц ZrO_2 в рабочую смесь при приготовлении ПДЖК.

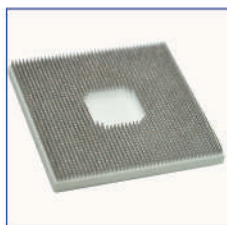
В табл. 3 собраны сведения по оптимальным концентрациям допирующих веществ, а также по их влиянию на контраст, рабочее напряжение и пороговое напряжение. Возможно также формировать объемные изображения с одно- и многослойными электрооптическими ПДЖК-затворами [30, 31].

ПДЖК-СИСТЕМЫ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

ПДЖК-система с НЧ золота перспективна для модуляции ТГц-излучения [32]. При изменении концентрации НЧ и напряжения можно быстро изменять поляризационное состояние светового пучка. ПДЖК обеспечивает непрерывное изменение фазового сдвига вплоть до 2,5 ТГц [33]. А в [34] получены характеристики фазового сдвига при 0,8 ТГц от 0 до 1π при $U = 80$ В, что сравнимо



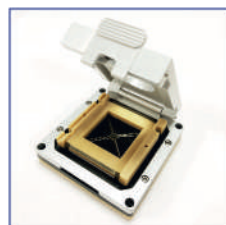
Выводные рамки



Металлокерамические
корпуса



Нагревательные
элементы



Контактные
устройства



Графитовая
оснастка



Оптоэлектронные
корпуса



Таблица 3. Влияние допирования различными веществами на свойства ПДЖК

Допирующее вещество (ДВ)	Изменение порогового напряжения			Изменение рабочего напряжения			Изменение контраста		
	Оптимальная доля ДВ, %	U без ДВ, В	U с ДВ, В	Оптимальная доля ДВ, %	U без ДВ, В	U с ДВ, В	Оптимальная доля ДВ, %	Контраст без ДВ, В	Контраст с ДВ, В
TiO ₂	0,8	31,5	17,9	0,8	61	27,1	0,8	110	151,4
ZnO	2	39,5	21,1	2	71	45	1	90	130
Al ₂ O ₃	0,5	36	19	0,5	72	56,5	0,5	39	31
Fe ₃ O ₄	1	36,9	24,1	1	76,2	54,5	0	135	90 (при 1%)
ZrO ₂	0,8	26,1	20,7	0,8	41,4	35,2	0,2	220	230,9
KH570-SiO ₂	0,5	7	4	0,5	33,3	10	2	6	36
KH570-POSS	0	7	18,5 (при 0,5%)	0,5	33,3	23	2	6	133

с характеристиками ТГц-модуляторов с однородной ориентацией ЖК. Это достигнуто за счет комбинированной структуры устройства, содержащего ПДЖК-ячейку и диэлектрическую градиентную решетку с субволновым периодом. Она служит элементом с высоким двулучепреломлением для повышения глубины модуляции.

Преимущества использования ПДЖК-модуляторов в ТГц-диапазоне по сравнению с обычными ЖК-модуляторами без полимерных компонентов рассмотрены в [35]. Главным достоинством ПДЖК является большее быстродействие благодаря неоднородной структуре ЖК с фрагментами малого размера. В них переориентация ЖК и, соответственно, переключение света достигаются за меньшее время. А в ТГц-диапазоне из-за большей длины волны излучения для эффективной модуляции света требуется большая толщина слоя ЖК, что замедляет электрооптический отклик устройства.

* * *

Выполнен обзор технологии полимерно-диспергированных жидких кристаллов. Дана краткая характеристика технологии, описан принцип ее действия и приведены как пример два возможных процесса изготовления ПДЖК – на основе полимеризации мономеров, инициированной термической обработкой заготовленных веществ и на основе облучения их ультрафиолетовым излучением.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование частично выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00466, <https://rscf.ru/project/22-29-00466/>

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zhao W. et al.** Photopolymerization enforced stratification in liquid crystal materials // Prog. Polym. Sci. 2021.114: 101365. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2021.101365.
2. **Miyagi K. et al.** Elucidation of the mechanism of stress-induced circular dichroic inversion of cellulosic/polymer liquid crystalline composites // Macromolecules. 2020. 53(8):3250–4. DOI: 10.1021/acs.macromol.9b02741.
3. **Pozhidaev E.P. et al.** Polymer dispersed liquid crystals with electrically controlled light scattering in the visible and near-infrared ranges // Opt. Mater. Express. 2020. 10(12):3030–40. DOI: 10.1364/OME.410163.
4. **Higgins D.A.** Probing the mesoscopic chemical and physical properties of polymer-dispersed liquid crystals // Adv. Mater. 2000. 12(4):251–64. DOI:10.1002/(SICI)1521-4095(200002)12:4<30.CO;2-4
5. **He Z. et al.** Passive polymer-dispersed liquid crystal enabled multi-focal plane displays // Opt. Express. 2020. 28(10):15294–9. DOI: 10.1364/OE.392489.
6. **Maschke U. et al.** Electrooptical properties of polymerdispersed liquid crystals // Macromol Rapid Commun. 2002. 23(3):159–70. DOI: 10.1002/1521-3927(20020201)23:3<159.CO;2-1.
7. **Shen W. et al.** Electrically switchable light transmittance of epoxy-mercaptan polymer/nematic liquid crystal composites with controllable microstructures // Polymer. 2018; 160:53–64. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.11.022.
8. **Hemaida A. et al.** Evaluation of thermal performance for a smart switchable adaptive polymer dispersed liquid crystal (PDLC) glazing // Sol. Energy. 2020. 195:185–93. DOI: 10.1016/j.solener.2019.11.024.



ЭЛЕКТРОННОЕ СПЕЦИАЛЬНОЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

АО НПП ЭСТО (Группа компаний ЭСТО) - объединение ведущих российских предприятий, специализирующихся на разработках, производстве, модернизации, продаже и сервисном обслуживании специального технологического оборудования.

Направления деятельности группы «ЭСТО»

Разработка и производство технологического оборудования (лазерное, вакуумное, сборочное, нестандартное) и внедрение технологий

Организация поставок как отдельных единиц зарубежного технологического оборудования, так и комплексных законченных технологий «под ключ»

Комплексная и частичная модернизация российского и зарубежного технологического оборудования любой сложности

Сервисное обслуживание российского и зарубежного технологического оборудования

Проектирование и строительство производств микроэлектроники

Обучение специалистов заказчика

Технологический аудит производства

Группа компаний ЭСТО более 20 лет производит оборудование для микроэлектроники в собственном инженерно-производственном комплексе метражом в 5000 кв.м в г. Зеленограде

Акционерное общество
«Научно-производственное
предприятие «Электронное
специальное технологическое
оборудование»

124460, Москва, Зеленоград,
просп. Георгиевский, д. 5, стр. 1
тел.: (499) 729-77-51,
(499) 479-12-39
info@nppesto.ru
www.nppesto.ru



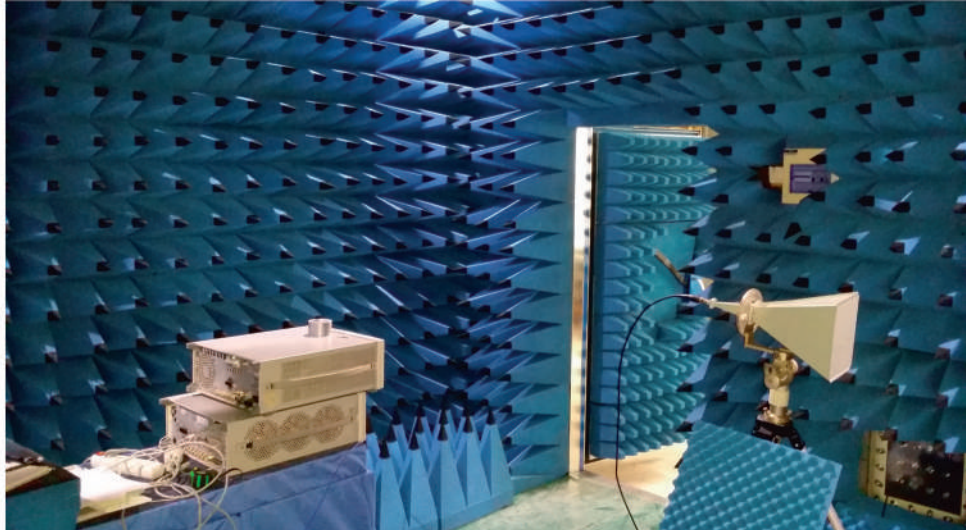
9. **Ghosh A. et al.** Daylight characteristics of a polymer dispersed liquid crystal switchable glazing // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2018. 174:572–6. DOI: 10.1016/j.solmat.2017.09.047.
10. **Ying-Guey Fuh A. et al.** Polarizer-free, electrically switchable and optically rewritable displays based on dye-doped polymer-dispersed liquid crystals // *Opt. Express*. 2009. 17(9):7088–94. DOI: 10.1364/OE.17.007088.
11. **Yuan Y. et al.** Low driving-voltage, polarizer-free, scattering-controllable liquid crystal device based on randomly patterned photoalignment // *Opt. Lett.* 2020; 45(13):3697–700. DOI: 10.1364/OL.393091.
12. **Singh A.K., Malik P.** Textural, electro-optical, dielectric and fluorescence studies of citrate buffer stabilized gold nanoparticles doped in polymer-dispersed liquid crystals composites // *Liq. Cryst.* 2022. 49(6):864–74. DOI: 10.1080/02678292.2022.2027532.
13. **Mani S. et al.** Effect of polymer concentration on optical and electrical properties of liquid crystals for photonic applications // *Mater Today: Proceedings*. 2022. 62(13):7035–9. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.057.
14. **Liang X. et al.** Programmable electrooptical performances in a dual-frequency liquid crystals/polymer composite system // *Polymer*. 2018. 149:164–8. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.06.081.
15. **Zhou Y. et al.** Effect of polymer network topology on the electro-optical performance of polymer stabilized liquid crystal (PSLC) devices // *Macromol. Chem. Phys.* 2020. 221(18):2000185. DOI: 10.1002/macp.202000185.
16. **Serbutoviez C. et al.** Polymerization induced phase separation. 2. Morphology of polymer-dispersed liquid crystal thin films // *Macromolecules*. 1996. 29(24):7690–8. DOI: 10.1021/ma960293.
17. **Justice R.S. et al.** Interface morphology and phase separation in polymer-dispersed liquid crystal composites. *Polymer* 2005; 46(12):4465–73. DOI: 10.1016/j.polymer.2005.02.029.
18. **Kim M. et al.** Fabrication of microcapsules for dye-doped polymer-dispersed liquid crystal-based smart windows // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2015. 7(32):17904–9. DOI: 10.1021/acsami.5b04496.
19. **Ono H., Kawatsuki N.** Effects of molecular weight on morphology and electrooptical properties of polymethylmethacrylate/liquid crystal composites fabricated by a solvent-induced phase separation method // *Polym Bull (Berlin)* 1995. 35(3):365–70. DOI: 10.1007/BF00963136.
20. **Dhara P., Mukherjee R.** Phase separation and dewetting of polymer dispersed liquid crystal (PDLC) thin films on flat and patterned substrates // *J. Mol. Liq.* 2021. 341:117360. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.117360.
21. **Coates D.** Polymer-dispersed liquid crystals // *J. Mater. Chem.* 1995. 5(12):2063–72. DOI: 10.1039/JM9950502063.
22. **Zhang H. et al.** The effect of the LC mixtures with the different clearing point on temperature dependence of the electro-optical properties of polymer dispersed liquid crystals // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2021. 726(1), 27–40. DOI: 10.1080/15421406.2021.1934641.
23. **Zhang H. et al.** (2022) Fabrication of epoxy/thiol polymer-based polymer-dispersed liquid crystals containing a catalyst with multi-amine structures // *Optical Materials* 133(3):112883. DOI: 10.1016/j.optmat.2022.112883.
24. **Wang X. et al.** (2022) TiO₂ doped polymer dispersed and stabilised liquid crystal smart film with high contrast ratio, low driving voltage and short response time // *Liquid Crystals*. DOI: 10.1080/02678292.2022.2048912.
25. **Liang Z. et al.** (2021) Influence of ZnO NPs on morphological and electro-optical properties of polymerdispersed liquid crystals // *Liquid Crystals*, 48:12, 1699–1708, DOI: 10.1080/02678292.2021.1898055.
26. **Jia M. et al.** (2022) The Electro-optical study of Al₂O₃ nanoparticles doped polymer dispersed liquid crystal films // *Liquid Crystals*, 49:1, 39–49. DOI: 10.1080/02678292.2021.1943024.
27. **Liang Z. et al.** The relationship between crosslinker, liquid crystal, and magnetic nanomaterial doping on electro-optical properties of PDLC // *Liquid Crystals* 2021; 48(3):1–11. DOI: 10.1080/02678292.2021.1919767.
28. **Miao Z., Zeng Liang & Dong Wang.** (2022) Nano-doped PDLC combined with photochromic material for bifunctional optical control films // *Liquid Crystals*, DOI: 10.1080/02678292.2022.2058102.
29. **He Z. et al.** Effect of silicon-based nanofillers on the electric-optical performance of polymer dispersed liquid crystals // *Liquid Crystals*. (2022). DOI: 10.1080/02678292.2022.2055180.
30. **Belyaev V.** PDLC shutters for 3D imaging // *Proc. SPIE*. 2005. 5821: 117–122.
31. **Belyaev V., Kostyuk A., Kovtonyuk N.** Multilayer PDLC Screen for Holography and Displaying of Non-Compact Objects // *SID Symposium Digest, San Jose, USA, 2001*. 32: 170–173.
32. **Ji Y.-Y. et al.** Terahertz birefringence anisotropy and relaxation effects in polymer-dispersed liquid crystal doped with gold nanoparticles // *Optics Express*. 2020. 28(12): 17253–17265. DOI: 10.1364/OE.392773
33. **Altmann K. et al.** Polymer stabilized liquid crystal phase shifter for terahertz waves // *Optics Express*. 2013. 21(10): 12395–12400. DOI: 10.1364/OE.21.012395.
34. **Zhang X. et al.** Tunable terahertz phase shifter based on dielectric artificial birefringence grating filled with polymer dispersed liquid crystal // *Optical Materials Express*. 2020. 10(2): 282–292.
35. **Yu H. et al.** Liquid Crystal-Tuned Planar Optics in Terahertz Range. *Appl. Sci.* 2023. 13: 1428. <https://doi.org/10.3390/app13031428>.

ИЛ ЭМС АККРЕДИТОВАНА:

- в системе сертификации «ВОЕННЫЙ РЕГИСТР» на соответствие ГОСТ ИСО/МЭК 17025, РД ОА 02.02 на право проведения испытаний;
- в системе сертификации АТ и ОГА на соответствие ГОСТ ИСО/МЭК 17025, ПАЛ-94 Межгосударственного Авиационного Комитета (АР МАК);
- Контроль деятельности лаборатории ЭМС осуществляет 430 ВП МО РФ.

ИЛ ЭКБ АККРЕДИТОВАНА:

- в системе добровольной сертификации «ВОЕННЫЙ РЕГИСТР» на соответствие ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 на право проведения испытаний;
- в системе добровольной сертификации «ЭЛЕКТРОНСЕРТ» на соответствие ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009, РД В 319.006-97;
- в системе сертификации Авиационного регистра Межгосударственного авиационного комитета «АРМАК» на соответствие ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2009, ПАЛ-94.



ИСПЫТАНИЯ ЭМС

- на устойчивость к изменениям в системе электропитания;
- на восприимчивость к кондуктивным помехам;
- на устойчивость к воздействию электростатических разрядов;
- на устойчивость к воздействию электромагнитных полей;
- на измерение коэффициента экранирования различных материалов;
- измерение уровня электромагнитных помех;
- выездные испытания.

ИСПЫТАНИЯ ЭКБ

- сертификация испытаний продукции;
- периодические испытания;
- квалифицированные испытания;
- типовые испытания;
- испытания на сохраняемость изделий;
- испытания на безотказность;
- дополнительные испытания.



125480, МОСКВА,
УЛ. ПЛАНЕРНАЯ, Д. 7А

8 (495) 657-87-37

TR@TEST-EXPERT.RU

WWW.TEST-EXPERT.RU