

(ознакомительный фрагмент)

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 535.217+535.555

**БЕЗРУЧЕНКО**  
**Вероника Сергеевна**

**ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА ПРЕДНАКЛОНА  
ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА НА ПОВЕРХНОСТИ СЛОЕВ  
БЕНЗАЛЬДЕГИДСОДЕРЖАЩИХ ПОЛИМЕРОВ  
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ АДАПТИВНЫХ ЛИНЗ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.05 – оптика

Минск, 2022

Научная работа выполнена в **Белорусском государственном университете и ГНУ «Институт химии новых материалов НАН Беларуси».**

**НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ:**

**Могильный Владимир Васильевич,**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры физической оптики  
и прикладной информатики Белорусского  
государственного университета;

**Муравский Александр Анатольевич,**  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
заведующий лабораторией «Материалы  
и технологии ЖК устройств» ГНУ «Институт  
химии новых материалов НАН Беларуси».

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:**

**Безбородов Владимир Степанович,**  
доктор химических наук, профессор,  
профессор кафедры органической химии  
УО «Белорусский государственный  
технологический университет»;

**Навныко Валерий Николаевич,**  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
ректор УО «Мозырский государственный  
педагогический университет  
имени И.П. Шамякина».

**ОППОНИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ –**

**УО «Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники».**

Защита состоится **13 мая 2022** года в **14.00** часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.17 при Белорусском государственном университете по адресу: *г. Минск, ул. Ленинградская, 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.*

Телефон ученого секретаря 209-57-09.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «11» апреля 2022 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций  
кандидат физ.-мат. наук, доцент

О.Г. Романов

## ВВЕДЕНИЕ

Ключевое значение для применения жидких кристаллов (ЖК) имеет возможность создания их предварительной ориентации в отсутствие электрического поля. Ориентация ЖК в ячейке определяется взаимодействиями твердой поверхности ориентирующего слоя и молекул ЖК. Благодаря этим взаимодействиям, директор ЖК может принимать гомеотропную, наклонную или планарную ориентацию по отношению к плоскости подложки, с которой он контактирует. Для создания гомеотропной ориентации ЖК в ячейке используются чаще всего тонкие слои полиимидных материалов с длинными углеводородными боковыми цепями, наносимые на поверхность подложек. Для индуцирования планарной ориентации ЖК используются преимущественно слои полиимидов без таких углеводородных цепей. Один из распространенных методов получения наклонной ориентации ЖК – послойное нанесение слоев, например, полиимидных, способствующих гомеотропной и планарной ориентации ЖК, причем угол преднаклона ЖК осуществляется варьированием толщины верхнего слоя. Ненулевые значения углов преднаклона позволяют создать множество жидкокристаллических фотонных устройств, в том числе жидкокристаллические линзы, способные изменять фокусное расстояние с помощью низких управляющих напряжений.

Один из перспективных способов создания линзовой структуры в плоской ЖК ячейке основан на создании градиента угла преднаклона, то есть постепенном увеличении угла преднаклона директора по мере удаления от центра линзы. Наиболее распространенная реализация такого подхода основана на создании окон в верхнем (планарном) ориентанте с помощью фотолитографии, открывающих для взаимодействия с ЖК участки поверхности гомеотропного ориентанта. Использование фотолитографии сильно усложняет процесс изготовления ЖК линз и их массивов и ухудшает их качество из-за плохой воспроизводимости углов преднаклона. Перспективным мог бы стать способ создания градиента углов преднаклона на ориентирующем слое, с первоначальной гомеотропной ориентацией ЖК, которую можно постепенно переводить в планарную локальным технологическим воздействием, например, световым. Тогда создание необходимого распределения интенсивности излучения позволило бы задавать соответствующее распределение углов преднаклона ЖК в ячейке. Важным требованием к такого рода материалам является их прозрачность в видимой области спектра, то есть их электронное поглощение должно находиться в ультрафиолетовой (УФ) области. Реализация такой схемы создания ЖК линз требует разработки градиентных ориентирующих материалов, способных изменять углы преднаклона ЖК при УФ экспонировании ориентирующих слоев.

Известны сополимеры с fotocувствительными бензальдегидными группами в боковой цепи в слоях которых УФ светом наводится устойчивое двулучепреломление. Эти слои нечувствительны к влаге и низким температурам, а также фотостабильны к излучению видимого диапазона, так как спектр поглощения расположен на длинах волн  $\lambda < 330$  нм. Слои на основе бензальдегидных полимеров создают планарную ориентацию ЖК после воздействия линейно-поляризованного и неполяризованного излучения. Основной необратимой фотореакцией, происходящей в бензальдегидных полимерных слоях, является реакция фотовосстановления бензальдегидных групп, результатом которой становится фотосшивание полимерного материала. Обнаруженное нарастание эффективности ориентации в бензальдегидных слоях с увеличением глубины фотохимических превращений могло отражать увеличение азимутальной энергии сцепления ориентирующих слоев, а также, вероятно и полярной, с ростом дозы УФ излучения. Такое нарастание энергии сцепления могло бы стать ключевым свойством, обеспечивающим требуемую переориентацию ЖК от гомеотропного до планарного предела. Первоначальную гомеотропную ориентацию могли бы обеспечить, по примеру известных гомеотропно ориентирующих материалов, длинные углеводородные фрагменты в боковой цепи макромолекулы сополимера. Таким образом, известные бензальдегидные сополимеры, способствующие планарной ориентации ЖК, можно было рассматривать как хорошую основу для создания градиентных бензальдегидных полимерных слоев, способных под действием УФ излучения изменять угол преднаклона ЖК от  $90^\circ$  до  $0^\circ$ .

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами) и темами**

Основные результаты диссертационной работы получены в ходе выполнения следующих программ и проектов в ГНУ «Институт химии новых материалов НАН Беларуси»: х/д КАССТ-IchNM-09 «Разработка новой самосовмещенной поляризационно-независимой жидкокристаллической линзы» 2011-2013 гг.; ГПНИ Электроника и фотоника, задание 2.207 «Создание и изучение свойств новых изотропных и анизотропных полимерных подложек для оптических устройств отображения информации» 2010-2012 гг.; ГПНИ Электроника и фотоника, задание 2.2.16 «Разработка тонкопленочных устройств для наблюдения стереоскопических 3D изображений» 2014-2015 гг. Диссертационная работа выполнялась также в рамках научных программ и исследовательских проектов совместно с кафедрой физической оптики и прикладной информатики БГУ: ГПНИ Физическое материаловедение, новые материалы и технологии, подпрограмма Материаловедение и технологии материалов, задание 8.1.1.13 «Анизотропные функциональные нано-

структурированные материалы на основе полисопряженных органических соединений и полимеров» 2016-2018 гг.; ГПНИ Физическое материаловедение, новые материалы и технологии, подпрограмма Материаловедение и технологии материалов, задание 1.49 «Фотосшиваемые полимеры для многодоменной планарной и градиентной ориентации жидких кристаллов, индуцируемой оптическим излучением с длиной волны более 350 нм» 2019-2020 гг.

Тема диссертационной работы отвечает приоритетным направлениям, утвержденным Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19 апреля 2010 г. № 585 «Об утверждении перечня приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы» (п. 6.2 Новые оптические, волоконно-оптические и нелинейно-оптические компоненты, материалы и покрытия, новые материалы для приборов функциональной микро-, опто-, нано-, и СВЧ-электроники; п. 6.8 Физические процессы в эпитаксиальных многослойных структурах, тонких полупроводниках и диэлектрических пленках, на границах раздела между слоями и технологии создания таких структур); утвержденным Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г. № 190 «О приоритетных направлениях научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы» (п. 3.4 Новые многофункциональные материалы, специальные материалы с заданными свойствами, п. 3.5 оптоэлектроника и оптические системы); приоритетным направлениям, утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 07 мая 2020 г. № 156 «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2021–2025 годы» (п. 4.4 Лазерные, плазменные, оптические технологии и оборудование; п. 4.5 Микро-, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика).

### **Цель и задачи исследования**

**Цель работы:** разработка новых фоточувствительных ориентирующих материалов, обеспечивающих первоначальную гомеотропную ориентацию ЖК и фотоиндуцированное изменение углов преднаклона ЖК от  $90^\circ$  до  $0^\circ$ , а также разработку способа создания адаптивных ЖК линз на их основе.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

– исследовать фотохимические и ориентационные характеристики (азимутальную и полярную энергии сцепления, углы преднаклона ЖК) при наведении анизотропии поверхности методами фото- и фотостимулированной ориентации для известных фоточувствительных бензальдегидных материалов;

- на основе модели мелкомасштабных доменов провести расчетные оценки динамики углов преднаклона ЖК при фотоиндуцированном изменении полярной энергии сцепления планарных доменов;
- разработать схему линзовой структуры в плоской ЖК ячейке на основе градиентных бензальдегидных слоев;
- выбрать перспективные структуры модифицированных бензальдегидных сополимеров;
- исследовать фотохимические и ориентационные характеристики слоев модифицированных фоточувствительных материалов в процессе фотопревращений бензальдегидных групп; оптимизировать величины азимутальной и полярной энергий сцепления и их кинетики в процессе УФ облучения;
- разработать способ изготовления ориентирующих слоев для жидкокристаллической линзы на основе модифицированных бензальдегидных полимеров, изготовить экспериментальные образцы ЖК линз и исследовать их оптические характеристики.

**Объектами исследования** являются слои новых фоточувствительных бензальдегидных сополимеров и ЖК линзы на их основе.

**Предметом исследования** являются фотохимические и ориентационные свойства тонких слоев новых фоточувствительных бензальдегидных сополимеров; процессы создания линзоподобных ЖК структур на основе фотоиндуцированного изменения угла преднаклона ЖК в однородных по толщине ячейках, оптические характеристики экспериментальных образцов ЖК линз на основе модифицированных бензальдегидных сополимеров.

### **Научная новизна**

1. Экспериментально установлена способность поверхности слоев сополимеров, включающих фоточувствительные бензальдегидные группы и алкильные фрагменты с углеводородными цепочками, ориентировать нематические ЖК с углом преднаклона  $>1^\circ$ .

2. Обнаружено фотоиндуцированное уменьшение угла преднаклона ЖК с увеличением глубины фотопревращения материала для сополимеров с углеводородными цепочками, содержащими от 4 до 16 атомов углерода. При этом начальная устойчивая гомеотропная ориентация достигнута для сополимеров с углеводородными цепочками с 12 и 16 атомами углерода.

3. Для описания зависимости угла преднаклона ЖК от экспозиционной дозы градиентных сополимеров адаптирована модель мелкомасштабных доменов для ориентирующей поверхности. Установлено ее согласие с экспериментальными данными.

4. Показано, что температура стеклования сополимеров, включающих алкильные фрагменты с углеводородными цепочками  $C_4H_9$  и  $C_{16}H_{33}$ , практически не зависит от содержания последних. Это позволяет увеличить азимутальную энергию сцепления при фотостимулированной ориентации до величины  $2.5 \cdot 10^{-5}$  Дж/м<sup>2</sup> для сополимеров МБЦ.

5. Показана возможность создания centrosymmetric параболического профиля фазовой задержки в структуре ЖК слоя путем экспонирования натертой ориентирующей пленки некогерентным УФ облучением через фотомаску с круглым отверстием.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Энергия сцепления ЖК с поверхностью пленок бензальдегидных сополимеров нарастает с увеличением степени фотопревращения бензальдегидных групп при наведении поверхностной анизотропии методом фотостимулированной ориентации.

2. Фотоиндуцированное увеличение полярной энергии сцепления пленок ориентантов ЖК на основе бензальдегидных сополимеров, модифицированных включением алкильных заместителей с длинными углеводородными цепочками  $C_{12}H_{25}$  или  $C_{16}H_{33}$ , способно приводить к контролируемому изменению угла преднаклона ЖК в диапазоне  $90^\circ - 0^\circ$  в зависимости от экспозиционной дозы УФ облучения.

3. Удлинение алкильной цепи с 12 до 16 атомов углерода позволяет увеличить температуру стеклования модифицированных бензальдегидных сополимеров, а также азимутальную и полярную энергии сцепления с ЖК после УФ облучения.

4. Градиентные ориентирующие слои для адаптивных жидкокристаллических линз могут быть созданы облучением натертых тканью слоев бензальдегидных сополимеров с боковыми углеводородными цепочками  $C_{12}H_{25}$  или  $C_{16}H_{33}$  пучком УФ излучения с колоколообразным распределением интенсивности.

### **Личный вклад соискателя**

Представленные в диссертации основные результаты исследований получены автором самостоятельно. Все основные результаты, определяющие научную и практическую значимость работы, получены и проработаны соискателем или при его непосредственном участии. Постановка цели и задач исследования, интерпретация экспериментальных результатов проводились совместно с научными руководителями В.В. Могильным и Ал.А. Муравским. Дискуссии и консультации проводились совместно с Ан.А. Муравским. А.И. Станкевич осуществлял химический синтез исследованных сополимеров, а

также совместно с ним проводились химические расчеты. Физические расчеты проводились совместно с И.Н. Кухто, Ал.А. Муравским, Ан.А. Муравским и В.В. Могильным. А.В. Трофимова, Ю.В. Трофимов, С.И. Лишик, П.С. Бегунов выполняли работы, не связанные с темой диссертации.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты диссертационного исследования были представлены на следующих научных конференциях и съездах: Международная научная конференция молодых ученых «Молодежь в науке 2014» (Минск, 18 – 21 ноября 2014 г.), 6-ая Международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, 1-3 февраля 2017 г.), 4-ая Международная научно-практическая конференция «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 11 –12 мая 2017 г.), 23 Международный симпозиум «Перспективные технологии дисплеев и полупроводниковой и осветительной техники» ADLT - 2017 (Минск, 22-25 мая 2017 г.), International scientific conference «EuroDisplay 2017» (Berlin, 31 October – 2 November 2017), Международная конференция «EuroDisplay 2019» (Минск, 16-20 сентября 2019 г.), Международная конференция «Перспективная элементная база микро- и наноэлектроники с использованием современных достижений теоретической физики» (Москва, 16 -18 сентября 2020 г.).

Результаты диссертационной работы внедрены в образовательный процесс на кафедре физической оптики и прикладной информатики БГУ, где используются для выполнения лабораторной работы «Дифракционный элемент связи с плоским волноводом», которая входит в состав лабораторного практикума «Оптоэлектроника. Интегральная оптика» (имеется 1 акт о практическом использовании результатов исследования). Имеется один патент «Полупроводниковый светодиод», в конструкции которого используется жидкокристаллическая линза, изготовленная по результатам диссертационной работы.

Результаты диссертационного исследования получили высокую оценку ведущих мировых специалистов на международных конференциях и были удостоены наград:

1. Диплом 1 степени за лучший доклад «Изучение зависимостей углов подвеса градиентных фоточувствительных полимерных материалов от дозы экспонирования», представленный на международной научной конференции молодых ученых «Молодежь в науке-2014» на секции «Физико-технические науки», Минск, Беларусь.

2. Награда за лучшее устное выступление «Materials with controllable anchoring energy for nematic liquid crystal alignment». Награждена специальным



призом за лучшее устное выступление аспиранта на конференции EuroDisplay 2017, Берлин, Германия.

3. Награда за лучшее устное выступление «Gradient pretilt angle alignment materials with different photosensitivity for tunable polarization-independent self-aligned LC lens». Одна из пяти лучших работ среди 125 выступлений на конференции EuroDisplay 2019, Минск, Беларусь.

4. Диплом 1 степени за предложение «Liquid crystal lenses for control viewing angle in LCD» на конкурсе «Предложения молодых ученых Беларуси для компании LG Electronics Inc. 2021», Минск, 13-27 декабря 2021 г.

### **Опубликованность результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 15 научных работах, из которых: 8 статей в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 3,5 авторских листа), 4 статьи в сборниках материалов научных конференций, 3 тезисов. По результатам диссертации получен 1 патент.

### **Структура и объем диссертации**

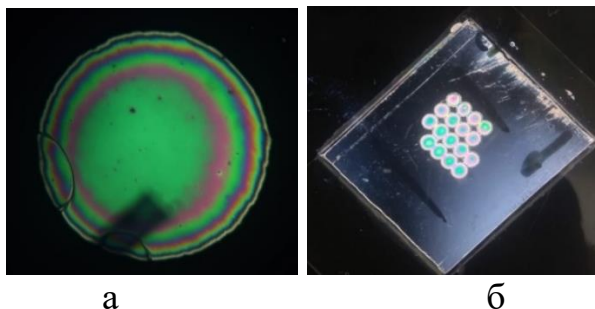
Диссертация состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложения. Полный объем диссертации составляет 137 страниц, в том числе 80 рисунков занимают 64 страницы, 1 таблица на 1 странице и 1 приложение на 9 страницах. Библиографический список состоит из 161 наименования, включая 16 публикаций соискателя на 14 страницах.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

В **главе 1** представлен аналитический обзор литературы, посвященный ориентации нематических ЖК, способам создания наклонной ориентации ЖК, методам формирования адаптивных линз в ЖК ячейке посредством локального изменения угла преднаклона директора, а также фотохимическим и ориентирующим свойствам слоев сополимеров с бензальдегидной группой в боковой цепи.

В **главе 2** представлено описание оборудования и методик измерения для определения основных характеристик ориентации ЖК поверхностью полимерных слоев. Описаны процессы нанесения полимерных пленок толщиной 45-80 нм на стеклянные подложки методом родкоутинга, а также способы наведения поверхностной анизотропии полимерных слоев: методы фотоориентации и фотостимулированной ориентации. Для реализации этих методов использовалось следующее оборудование: люминесцентная лампа с

Микрофотографии ЖК линзы и массива ЖК линз, помещенных между скрещенными поляризаторами, представлены на рисунке 9.



**Рисунок 9. - Микрофотографии одиночной ЖК линзы (а) и массива ЖК линз (б)**

Оптическое качество ЖК линз значительно улучшилось при использовании светодиодной системы, вероятно, благодаря отсутствию нежелательных пространственных интерференционных дефектов светового поля при экспонировании.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны новые модифицированные градиентные сополимеры серий МБЛ и МБЦ с боковыми углеводородными цепями, содержащими 12 и 16 атомов углерода, соответственно. Экспериментально установлена способность поверхности слоев модифицированных сополимеров, включающих фоточувствительные бензальдегидные группы и алкильные фрагменты с углеводородными цепочками, ориентировать нематические ЖК с углом преднаклона  $>1^\circ$  [1, 3, 10, 11, 14].

2. Обнаружено фотоиндуцированное уменьшение угла преднаклона ЖК, а также увеличение энергии сцепления с увеличением глубины фотопревращения материала при фотостимулированной ориентации для сополимеров с углеводородными цепочками, содержащими от 4 до 16 атомов углерода. При этом начальная устойчивая гомеотропная ориентация достигнута для сополимеров с углеводородными цепочками с 12 и 16 атомами углерода [2, 3, 5, 6, 9, 11, 13].

3. Для описания зависимости угла преднаклона ЖК от экспозиционной дозы градиентных сополимеров адаптирована модель мелкомасштабных доменов для ориентирующей поверхности. Установлено ее согласие с экспериментальными данными [5].

4. Показано, что температура стеклования сополимеров, включающих алкильные фрагменты с углеводородными цепочками  $C_4H_9$  и  $C_{16}H_{33}$ , практически не зависит от содержания последних. Это позволяет увеличить

азимутальную энергию сцепления при фотостимулированной ориентации до величины  $2.5 \cdot 10^{-5}$  Дж/м<sup>2</sup> для сополимеров МБЦ [6].

5. Показана возможность создания centrosymmetric параболического профиля фазовой задержки в структуре ЖК слоя путем экспонирования натертой ориентирующей пленки некогерентным УФ облучением через фотомаску с круглым отверстием [3, 4, 6, 12, 16].

6. Разработан способ получения поляризационно-зависимой ЖК линзы в плоской ячейке на основе новых бензальдегидных ориентирующих материалов, способных создавать начальную гомеотропную ориентацию ЖК, а также изменять ее с 90° до 0° под действием УФ излучения [3, 4, 6, 12, 16].

7. Разработан способ получения самосовмещенной поляризационно-независимой ЖК линзы методом фотостимулированной ориентации при однократном облучении материалов, нанесенных на разные стороны одной подложки, заключающийся в одновременном использовании бензальдегидных ориентирующих градиентных материалов, обладающих разным порогом фоточувствительности [7, 8, 15].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Разработанные новые модифицированные градиентные сополимеры применимы в качестве ориентантов для задания начального направления ориентации ЖК в устройствах (АКТ №2.4/385 от 03.12.2020 г. о практическом использовании результатов исследования в образовательном процессе в Белорусском государственном университете (Приложение А)). ЖК линзы на их основе могут быть использованы в устройствах отображения информации для создания стереоскопического эффекта, для формирования локального изменения показателя преломления в фотонных устройствах. Градиентные сополимеры совместимы с пластиковыми подложками благодаря их низкотемпературной обработке ( $\leq 70^\circ$ ), что позволяет значительно расширить области их применения.

Полученные результаты были использованы при выполнении этапа хозяйственного договора КАССТ-IChNM-09 «Разработка новой самосовмещенной поляризационно-независимой жидкокристаллической линзы» с Научно-техническим центром им. Короля Абдулазиза (Саудовская Аравия) (2011–2013 гг.) стоимость этапа 75 тыс. долларов США.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1. Безрученко, В. С. Изучение зависимостей углов подвеса градиентных фоточувствительных полимерных материалов от дозы экспонирования / В. С. Безрученко, А. А. Муравский // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2015. – № 1. – С. 31–33.
2. Увеличение азимутальной энергии сцепления градиентного сополимера добавками планарного полимерного ориентанта / В. С. Безрученко, Ал. А. Муравский, А. А. Муравский, А. И. Станкевич, В. В. Могильный // Жидк. крист. и их практич. использ. – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 38-41.
3. Tunable Liquid Crystal Lens Based on Pretilt Angle Gradient Alignment / V. S. Bezruchenko, A. A. Muravsky, A. A. Murauski, A. I. Stankevich, U. V. Mahilny // Mol. Cryst. and Liq. Cryst. – 2016. – Vol. 626. – P. 222-228.
4. Формирование centrosymmetric распределений световой интенсивности для экспонирования фоточувствительных ориентирующих слоев жидкокристаллических линз / В. С. Безрученко, В. В. Могильный, А. И. Станкевич, Ал. Ан. Муравский, Ан. Ал. Муравский, И. Н. Кухто // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2017. – № 3. – С. 12-19.
5. Alignment materials with controllable anchoring energy / V. Bezruchenko, Al. Muravsky, An. Murauski, A. Stankevich, U. Mahilny // Journal of the Society for Information Display. – 2018. – Vol. 26, № 9. – P. 561-566.
6. Новые фотосшиваемые бензальдегидные полимеры для создания жидкокристаллических линз / В. С. Безрученко, В. В. Могильный, А. И. Станкевич, Ал. Ан. Муравский, Ан. Ал. Муравский // Журнал прикладной спектроскопии. – 2018. – Т. 85, № 4. – С. 652-657.
7. Градиентные ориентирующие материалы с разным порогом фоточувствительности для создания управляемых поляризационно-независимых жидкокристаллических линз / В. С. Безрученко, Ал. А. Муравский, Ан. А. Муравский, А. И. Станкевич, В. В. Могильный // Доклады БГУИР. – 2019. – № 7 (125). – С. 13-20.
8. Gradient pretilt angle alignment materials with different photosensitivity for tunable polarization-independent self-aligned liquid crystal lens / V. S. Bezruchenko, Al. A. Muravsky, An. A. Murauski, A. I. Stankevich, U. V. Mahilny // Journal of the Society for Information Display. – 2021. – Vol. 29, № 11. – P. 825-832.

### Статьи в сборниках материалов научных конференций

9. Градиентные ориентирующие слои для жидкокристаллических линз / В. С. Безрученко, В. В. Могильный, А. И. Станкевич, Ал. Ан. Муравский, Ан. Ал. Муравский // VI Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике [М., 1-3 февр. 2017] / Мин. обр. и науки РФ; РАН; Гос. корпорация по атомной энергии «Росатом»; Нац. исслед. ядер. у-т «МИФИ»; отв. ред.: В.Г. Родин. – М., 2017. – С. 62–63.

10. Исследование кинетики фотопревращения градиентных ориентирующих слоев на основе бензальдегидных полимеров / В. С. Безрученко, В. В. Могильный, А. И. Станкевич, А. А. Муравский, А. А. Муравский // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы четвертой Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 11-12 мая 2017 г. / Мин. обр. Респ. Бел.; НИУ «И-т прикладных физич. проблем имени А.Н. Севченко» БГУ; Редкол.: В.И. Попечиц (гл. ред.), Ю.И. Дудчик, Г.А. Сенкевич. – Минск, 2017. – С. 10 – 12.

11. Bezruchenko, V. S. Materials with controllable anchoring energy for nematic liquid crystals alignment / V. S. Bezruchenko, Al. A. Muravsky, An. A. Murauski, A. I. Stankevich, U. V. Mahilny // EuroDisplay 2017 : Abstract book, Berlin, 31 October – 2 November 2017 / Institute of Physics. – Berlin, 2017. – P. 28-29.

12. Формирование массивов жидкокристаллических линз излучением УФ-Б светодиода 308 нм / В. С. Безрученко, Ал. А. Муравский, Ан. А. Муравский, В. В. Могильный, А. И. Станкевич, П. С. Бегунов, С. И. Лишик, Ю. В. Трофимов // Перспективная элементная база микро- и наноэлектроники с использованием современных достижений теоретической физики : сб. докл. Междунар. конф, Москва, 16-18 сентября 2020 г. / МГОУ, ред. колл.: Д.Н. Чаусов (отв. ред.) [и др.]. – М., 2020. – С. 231-233.

### Тезисы докладов

13. Безрученко, В. С. Изучение зависимостей углов подвеса градиентных фоточувствительных полимерных материалов от дозы экспонирования / В.С. Безрученко, А.А. Муравский // Молодежь в науке – 2014 : материалы XI междунар. науч. конф., Минск, 18-21 нояб. 2014 г. / НАН Беларуси; Совет молодых ученых НАН Беларуси. – Минск, 2014. – С. 253.

14. Фотонаведенная планарная ориентация ЖК на слоях бензальдегидных полимеров с длинными боковыми алкильными цепями / В. В. Могильный, А. И. Станкевич, А. В. Трофимова, В. С. Безрученко // VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике [М., 1-3 февр. 2017]

/ Мин. обр. и науки РФ; РАН; Гос. корпорация по атомной энергии «Росатом»; Нац. исслед. ядер. у-т «МИФИ». – М., 2017. – С. 388–389.

15. Gradient pretilt angle alignment materials with different photosensitivity for tunable polarization-independent self-aligned LC lens / V. S. Bezruchenko, Al. A. Muravsky, An. A. Murauski, A. I. Stankevich, U. V. Mahilny // EuroDisplay 2019 : сб. тез. докл. Междунар. конф., Мн., 16-20 сент. 2019 / Society for information Display (США); Мин. обр. Респ. Бел.; БГУИР; редкол.: В.А. Богуш [и др.]. – Минск: БГУИР, 2019. – Р. 64.

### **Патенты**

16. Полупроводниковый светодиод : пат. ВУ 23012 / Ю. В. Трофимов, С. И. Лишик, П. С. Бегунов, Ал. А. Муравский, Ан. А. Муравский, В. С. Безрученко. – Оpubл. 30.06.2020.

**РЕЗЮМЕ****Безрученко Вероника Сергеевна****ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА ПРЕДНАКЛОНА  
ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА НА ПОВЕРХНОСТИ СЛОЕВ  
БЕНЗАЛЬДЕГИДСОДЕРЖАЩИХ ПОЛИМЕРОВ  
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ АДАПТИВНЫХ ЛИНЗ**

**Ключевые слова:** нематический жидкий кристалл (ЖК), углы преднаклона ЖК, азимутальная энергия сцепления, полярная энергия сцепления, ЖК линзы.

**Цель работы:** разработка новых фоточувствительных ориентирующих материалов, обеспечивающих первоначальную гомеотропную ориентации ЖК и фотоиндуцированное изменение углов преднаклона ЖК от  $90^\circ$  до  $0^\circ$ , а также разработку способа создания адаптивных ЖК линз на их основе.

**Методы исследования:** теоретическое моделирование, поляризационная оптическая микроскопия, электронная спектроскопия, электрооптические измерения.

**Использованная аппаратура:** источники ультрафиолетового (УФ) излучения, светодиодные системы, источники лазерного излучения, поляризационный микроскоп, спектрометры, родкоутер, автоматизированная установка натирания тканей, CCD-камеры, персональные компьютеры.

**Полученные результаты и их новизна.** Экспериментально установлены выраженные градиентные свойства новых полимерных ориентантов ЖК, разработанных на основе известных бензальдегидсодержащих сополимеров МБ. В результате УФ облучения новых сополимеров, включающих фрагменты с углеводородными цепочками  $C_{12}H_{25}$  (МБЛ) и  $C_{16}H_{33}$  (МБЦ) первоначальная гомеотропная ориентация ЖК с ростом экспозиционной дозы через промежуточные значения углов преднаклона ЖК переходит в планарную.

Предложены оригинальные схемы изготовления адаптивных поляризационно-зависимых и поляризационно-независимых ЖК линз. На основе сополимеров МБЛ и МБЦ изготовлены ЖК линзы, измерены их фазовые профили и фокусные расстояния при разных уровнях приложенного напряжения.

**Рекомендации по использованию и область применения.** Новые градиентные фоточувствительные сополимеры могут быть использованы для ориентации нематических ЖК в фотонных устройствах разного назначения, ЖК линзы могут быть использованы для управления угловым распределением излучения светодиодных систем.

**РЭЗЮМЭ**  
**Бязручанка Вераніка Сяргееўна**  
**ФОТАІНДУКАВАНЫЯ ЗМЯНЕННІ ВУГЛА ПРАДНАХІЛУ ВАДКАГА**  
**КРЫШТАЛЯ НА ПАВЕРХНІ ПЛАСТОЎ**  
**БЕНЗАЛЬДЭГІДЗМЯШЧАЛЬНЫХ ПАЛІМЕРАЎ**  
**ДЛЯ ФАРМАВАННЯ АДАПТЫЎНЫХ ЛІНЗ**

**Ключавыя словы:** нематычны вадкі крышталі (ВК), вуглы праднахілу малекул вадкага крышталю, азімутальная энергія счাপлення, палярная энергія счাপлення, вадкакрысталічныя лінзы.

**Мэта работы:** распрацоўка новых фотаадчувальных арыентуючых матэрыялаў, якія спрыяюць гомеатропнай арыентацыі ВК, а таксама фотаіндукаванай змене вуглоў праднахілу ВК ад  $90^\circ$  да  $0^\circ$  для выраба вадкакрысталічных лінзаў.

**Метады даследавання:** тэарэтычнае мадэляванне, палярызацыйная аптычная мікраскапія, электронная спектраскапія.

**Скарыстаная апаратура:** крыніцы ўльтрафіялетавага (ЎФ) выпраменьвання, святлодыёдныя сістэмы, крыніцы лазернага выпраменьвання, палярызацыйны мікраскоп, спектрометры, родкаацёр, аўтаматызаваная ўстаноўка шмаравання тканінай, ССD-камеры, персанальныя кампутары.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Эксперыментальна ўсталяваныя выяўленыя градыентныя ўласцівасці новых палімерных арыентантаў ВК, распрацаваных на аснове вядомых бензальдэгідзмяшчальных супалімераў МБ. У выніку ЎФ апрамянення новых супалімераў, якія ўключаюць фрагменты з вуглевадароднымі ланцужкамі  $C_{12}H_{25}$  (МБЛ) і  $C_{16}H_{33}$  (МБЦ) першапачатковая гомеатропная арыентацыя ВК з ростам экспазіцыйнай дозы праз прамежковыя значэнні вуглоў праднахілу пераходзіць у планарную.

Прапанаваны арыгінальныя схемы вырабу адаптыўных палярызацыйна-залежных і палярызацыйна-незалежных ВК лінзаў. На аснове супалімераў МБЛ і МБЦ выраблены ВК лінзы, вымераны іх фазавыя профілі і фокусныя адлегласці пры розных узроўнях прыкладзенай напругі.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць прымянення.** Новыя градыентныя фотаадчувальныя супалімеры могуць быць скарыстаны для арыентацыі нематычных ВК у фатонных прыладах рознага прызначэння, ВК лінзы могуць быць скарыстаны для кіравання вуглавым размеркаваннем выпраменьвання святлодыёдных сістэм.



**SUMMARY****Bezruchenko Veronika Sergeevna****PHOTOINDUCED CHANGES OF A LIQUID CRYSTAL PRETILT ANGLE ON THE SURFACE OF BENZODEHYDE-CONTAINING POLYMERS LAYERS FOR THE FORMATION OF ADAPTIVE LENSES**

**Key words:** nematic liquid crystal (LC), pretilt angles of liquid crystal molecules, azimuth anchoring energy, polar anchoring energy, liquid crystal lenses.

**The aim of this work** is development of new photosensitive alignment materials that promote homeotropic orientation of LCs, as well as photoinduced changes in LC pretilt angles from  $90^\circ$  to  $0^\circ$ , for the manufacture of liquid crystal lenses.

**Methods of research:** theoretical modeling, polarizing optical microscopy, electron spectroscopy.

**Equipment used:** sources of ultraviolet (UV) radiation, light emitted diode (LED) systems, laser radiation sources, polarizing microscope, spectrometers, rodcoater, automated cloth rubbing machine, CCD cameras, personal computers.

**The results obtained and their novelty.** The pronounced gradient properties of new LC polymeric orientants developed based on well-known benzaldehyde-containing MB copolymers have been experimentally established. As a result of UV irradiation of new copolymers containing fragments with  $C_{12}H_{25}$  (MBL) and  $C_{16}H_{33}$  (MBC) hydrocarbon chains, the initial homeotropic orientation of LC becomes planar with increasing exposure dose through intermediate pretilt angles.

Original schemes for manufacturing adaptive polarization-dependent and polarization-independent LC lenses are proposed. Based on MBL and MBC copolymers, LC lenses were fabricated, and their phase profiles and focal lengths were measured at different levels of applied voltage.

**Recommendations for future use and application fields.** New gradient photosensitive copolymers can be used to alignment nematic LCs in photonic devices for various purposes, and LC lenses can be used to control the angular distribution of radiation from LED systems.