

УДК 535.372;532.783

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ЖК-МАТЕРИАЛОВ И УСТРОЙСТВ НА ИХ ОСНОВЕ

А. А. МИНЬКО¹⁾, В. И. ЛАПАНИК²⁾, М. Р. ПОСЛЕДОВИЧ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» БГУ,
ул. Курчатова, 7, 220108, г. Минск, Беларусь

Приведен краткий очерк формирования и становления научной школы по физике и химии жидких кристаллов. Представлен ряд наиболее важных научных результатов, полученных на кафедрах оптического профиля и в научно-исследовательском учреждении «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ за последние годы, как в области фундаментальных, так и прикладных исследований, внедренных в производство и образовательный процесс.

Ключевые слова: жидкие кристаллы; ЖК; мезофаза; жидкокристаллические соединения; жидкокристаллические материалы; электрооптические системы отображения информации; жидкокристаллические модуляторы.

Образец цитирования:

Минько А. А., Лапаник В. И., Последович М. Р. Разработка новых ЖК-материалов и устройств на их основе // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2018. № 2. С. 151–159.

For citation:

Minko A. A., Lapanik V. I., Pasliadovich M. R. Development of new liquid crystal materials and devices. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2018. No. 2. P. 151–159 (in Russ.).

Авторы:

Анатолий Антонович Минько – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий кафедрой физической оптики и прикладной информатики физического факультета.
Валерий Иванович Лапаник – заведующий лабораторией оптики конденсированных сред.
Михаил Романович Последович – кандидат физико-математических наук, доцент; ведущий инженер кафедры физической оптики и прикладной информатики физического факультета.

Authors:

Anatoli A. Minko, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the department of physical optics and applied informatics, faculty of physics.
minko@bsu.by
Valeri I. Lapanik, head of the laboratory of condensed matter optics.
lapanik@bsu.by
Mikhail R. Pasliadovich, PhD (physics and mathematics), docent; leading engineer at the department of physical optics and applied informatics, faculty of physics.
posledov@bsu.by

DEVELOPMENT OF NEW LIQUID CRYSTAL MATERIALS AND DEVICES

A. A. MINKO^a, V. I. LAPANIK^b, M. R. PASLIADOVICH^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^bA. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University,
7 Kurčataŭ Street, Minsk 220108, Belarus

Corresponding author: A. A. Minko (minko@bsu.by)

A short essay on the formation of a scientific school of physics and chemistry of liquid crystals is given. The essay presents a number of the most important scientific results obtained at the departments of the optical profile and in the A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University in recent years, both in the field of fundamental and applied research, implemented in the production and in the educational process.

Key words: liquid crystals; LC; mesophase; LC-compounds; LC-materials; electro-optical information display systems; LC-modulators.



Рис. 1. Леонид Викентьевич Володько – инициатор и создатель первой группы исследований ЖК

Fig. 1. Leonid Vikentievich Volodko – initiator and creator of the first research group of studies of the LC

Исследования в области физики и химии жидких кристаллов (ЖК) в Белорусском государственном университете были начаты в первой половине 1960-х гг. под руководством Л. В. Володько (2 января 2018 г. отметили 90 лет со дня его рождения) на кафедрах физической оптики (ныне – кафедра физической оптики и прикладной информатики) и спектрального анализа (ныне – кафедра лазерной физики и спектроскопии) (рис. 1). С 1971 г. данное научное направление активно развивается в лаборатории оптики конденсированных сред (ЛОКС) научно-исследовательского учреждения «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ (НИИ ПФП). Первопроходцами в исследовании ЖК были А. И. Серафимович, А. З. Абдулин, Н. Р. Поселович и О. Н. Бубель.

О. Н. Бубелем (химический факультет БГУ) синтезированы холестерические жидкие кристаллы (ХЖК). А. И. Серафимович и А. З. Абдулин совместно с А. И. Кубарко (Минский медицинский институт) с помощью полученных ХЖК проводили исследования по диагностике заболеваний по температуре участков тела человека. В основе их работ – температурная зависимость окраски холестерических ЖК (изменение шага спирали холестерика). А. И. Серафимович и А. С. Ключников (доцент факультета

радиофизики и электроники) занимались проблемами визуализации ИК-излучения с помощью ХЖК.

В этот же период А. И. Серафимович по заданию Л. В. Володько неоднократно посещал Ленинград (Государственный оптический институт (ГОИ) имени С. И. Вавилова, Ленинградское оптико-механическое объединение (ЛОМО)) и Москву (иностранные представительства) для налаживания деловых связей. Благодаря этому в 1960–70-х гг. удалось в значительной мере укрепить материально-техническую базу кафедр физической оптики и спектрального анализа БГУ, что сыграло огромную роль при организации отдела электромагнитных явлений, в том числе ЛОКС НИИ ПФП.

В 1980–90-х гг. сформировалась научная школа в области физики и химии ЖК. В 1987 г. вышла в свет монография «Текстурообразование и структурная упорядоченность в жидких кристаллах» (авторы – А. З. Абдулин, В. С. Безбородов, А. А. Минько, В. С. Рачкевич).

Первые исследования были направлены на изучение природы жидкокристаллического состояния вещества, анализ электрооптических эффектов в ЖК, установление связи между строением молекул ЖК и их физико-химическими свойствами. В результате фундаментальных исследований были созданы новые жидкокристаллические материалы и электрооптические устройства на их основе [1].

Наиболее значимые результаты исследований, полученные в 1980–90-х гг., приведены ниже.

- Установлены количественные соотношения между *цис*- и *транс*-изомерами вещества в жидкокристаллическом и изотропном состояниях гомологических рядов различных ЖК-соединений. Определена ориентационная способность молекул исследуемых гомологических рядов, проанализирована ее зависимость от длины алкильной цепочки, температуры и числа циклических фрагментов.

- На основе анализа дихроизма отдельных колебательных полос исследованы изменения ИК-спектров ЖК-соединений при фазовых переходах, что позволило обнаружить жидкокристаллическую фазу у некоторых членов гомологического ряда *n*-алкоксибензойных кислот.

- Разработана методика измерения оптических постоянных ЖК при различных температурах в широком спектральном интервале с использованием методов отражения и пропускания света. Показано, что важную роль в повышении точности значений показателя преломления в ИК-области спектра играют погрешности выбора привязочных точек показателя преломления в области прозрачности.

- Определены поляризуемости молекул и параметры порядка некоторых одноосных ЖК. Температурная зависимость параметра порядка показала небольшое его возрастание по мере удлинения алкильной цепи. Следовательно, основную роль в установлении ориентационного порядка мезофазы играют межмолекулярные взаимодействия жестких стероидных фрагментов молекул.

- Изучены закономерности влияния строения циклических и мостиковых фрагментов, боковых и концевых заместителей молекул ЖК на их мезоморфные, оптические и диэлектрические свойства, что позволило выработать критерии для целенаправленного поиска новых ЖК-соединений. Показано, что перспективными для использования в качестве компонентов ЖК-материалов, предназначенных для электрооптических устройств отображения информации, являются соединения с числом атомов углерода в алкильной цепочке от 3 до 6, содержащие в различных сочетаниях, наряду с бензольным и циклогексановым, циклогексеновое и бороксановые кольца, соединенные непосредственно друг с другом или посредством $\text{CH}_2\text{—CH}_2\text{—}$, COO- мостиков. При этом сочетание в концевом фрагменте нитрильной группы и атома фтора в сопряжении с бензольным кольцом позволяет получать ЖК с высоким значением положительной диэлектрической анизотропии.

- Впервые изучены мезоморфные свойства ариловых эфиров алкилциклогексенкарбоновых кислот, и проанализировано влияние положения двойной связи в циклогексеновом кольце на температурные и электрооптические параметры смесей, содержащих эти соединения. Установлено, что оптимальными для практического использования являются эфиры 4-алкил-2-циклогексен-1-карбоновой кислоты, поскольку они имеют более широкий интервал существования мезофазы и низкую температуру ее образования. Это объясняется стерическими факторами, а смеси на их основе характеризуются меньшей вязкостью, малым температурным дрейфом порогового напряжения и более крутой вольт-контрастной характеристикой. На основе указанных соединений разработаны ЖК-смеси, которые запатентованы за рубежом и рекомендованы для использования в матричных электрооптических устройствах с мультиплексом до 1 : 32.

- Анализ мезоморфных, оптико-физических и электрооптических свойств ряда полярных цианопроизводных в различных ЖК-матрицах показал, что для создания высокомультиплексных, низковольтных и высокодинамичных ЖК-материалов наиболее перспективны в сочетании с неполярными ЖК-соединениями новые цианофторфенилпроизводные 1,2,3-диоксаборинана, характеризующиеся высокими значениями положительной диэлектрической анизотропии. Для высокомультиплексных электрооптических устройств разработаны, запатентованы и рекомендованы для использования новые ЖК-материалы, в состав которых входят производные 1,2,3-диоксаборинана.

- Проанализированы формы колебательных полос и их связи с колебательной и ориентационной функциями автокорреляции для одноосных ЖК. Показано, что в отличие от ИК-спектров исследование спектров комбинационного рассеяния (КР) позволяет определять по отдельности функции автокорреляции как для колебаний, так и для вращения молекул вокруг различных осей. Экспериментально установлено, что форма колебательных полос ЖК обусловлена в основном колебательной релаксацией, зависящей от дефазировки колебательного движения межмолекулярными силами. Показано, что в течение интервалов времени, много меньших времени переориентации, вращение молекул нематических ЖК носит либрационный характер, а затем переходит в сильно анизотропную ориентационную диффузию и в целом хорошо описывается в рамках формализма функций памяти.

- Теоретически и экспериментально исследованы оптические свойства хирально-нематических сред при больших углах закрутки. Показано, что в этом случае можно создать условия, при которых ЖК-вещество ведет себя как изотропная оптически активная среда. Обоснована возможность создания электрически управляемых фильтров кругового двулучепреломления типа фильтров Лию.

За этот период по данной проблематике опубликованы свыше 300 статей, получены более 30 авторских свидетельств на изобретения и 20 зарубежных патентов. Более 20 разработок внедрены в производство (НПО «Интеграл», МПО «Калибр», ряд российских предприятий, в том числе НПО «Платан», НПО «НИОПИК», ЦАО «Комета», ПО «Рефлектор»). Защищена докторская (А. А. Минько) и 7 кандидатских диссертаций (Н. Р. Последович, В. И. Наumenко, В. С. Рачкевич, В. С. Безбородов, В. А. Коновалов,

Ю. Д. Пташников, С. Е. Яковенко). Большую помощь в подготовке кандидатов наук оказывал профессор А. И. Комяк, который в то время руководил кафедрой спектрального анализа. Много внимания уделялось укреплению материально-технической базы кафедр оптического профиля БГУ и ЛОКС: было приобретено современное оптоэлектронное оборудование, спектрометры, современная физико-химическая лаборатория (Чехия), собственными силами были разработаны и созданы уникальные приборы и комплексы. Следует отметить, что существенную помощь в этом оказывал заместитель директора НИИ ПФП по общим вопросам, ведущий инженер кафедры физической оптики (по совместительству) Ф. И. Севченко.

Признанием достижений в разработках ЖК-материалов и систем отображения информации на их основе является присуждение в 1990 г. премии Совета Министров БССР за работу «Синтез, физико-химические исследования новых жидкокристаллических материалов, разработка технологий создания жидкокристаллических устройств отображения информации и их практическое применение» (авторский коллектив: А. А. Минько (руководитель), А. З. Абдулин, В. С. Безбородов, В. А. Коновалов, В. И. Лапаник, А. А. Муравский, В. И. Науменко, М. Р. Последович, В. С. Рачкевич, В. В. Ржеусский, С. Е. Яковенко (ЛОКС НИИ ПФП имени А. Н. Севченко БГУ), В. А. Молочко (МПО «Калибр»), А. В. Михновец, В. И. Позняк, В. П. Царев, В. И. Силич (НПО «Интеграл»)).

В 1992–1996 гг. выполнялась республиканская научно-техническая программа «Разработать и внедрить в промышленное производство материалы, технологические процессы, конструкции и оборудование для организации освоения и выпуска различных типов жидкокристаллических устройств» (руководитель программы – директор «СКБ Немига» НПО «Интеграл» В. И. Толкачев, научный руководитель – заместитель директора НИИ ПФП, заведующий ЛОКС А. А. Минько). В рамках этой программы ЛОКС совместно с кафедрой физической оптики БГУ выполнялось 7 заданий по разработке новых ЖК-материалов, модуляторов, устройств отображения информации. В выполнении заданий программы, кроме сотрудников ЛОКС В. И. Лапаника, В. С. Безбородова, С. Е. Яковенко, В. В. Ржеусского, В. А. Коновалова, Ан. Ал. Муравского и др., активное участие принимали сотрудники кафедры физической оптики БГУ – В. В. Могильный, М. Р. Последович, Ж. И. Булойчик, А. И. Станкевич, М. М. Сидоренко и кафедры лазерной физики и спектроскопии – И. В. Сташкевич, Е. А. Мельникова, А. И. Серафимович, а также студенты, магистранты и аспиранты профильных кафедр (рис. 2).

По итогам выполнения программ были получены результаты, имеющие как теоретическое, так и практическое значение.

- Разработаны основы перспективной технологии и способ создания различных высокоинформативных электрооптических ЖК-экранов (супертвистовый, двойной супертвистовый, сегнетоэлектрический, активно-матричный), требующих точного удержания зазора, включающего формирование монолитно с подложкой по всей площади экрана с определенной топологией одинаковых по высоте спейсеров. Для созданных супертвистовых экранов разработаны ЖК-материалы и показано, что с увеличением

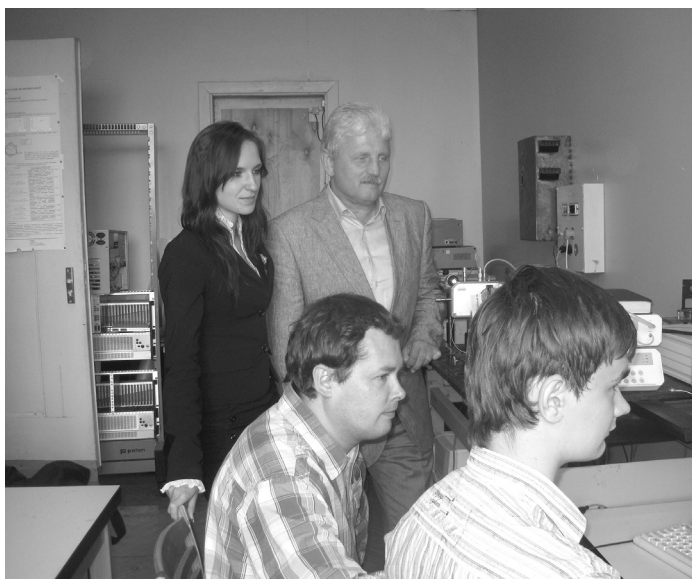


Рис. 2. Проведение занятий на базе ЛОКС НИИ ПФП имени А. Н. Севченко БГУ

Fig. 2. Classes in the laboratory of condensed matter optics
at the A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University

угла закрутки возрастает не только крутизна вольт-контрастной характеристики, но расширяется полоса пропускания экрана и повышается его яркость. По этой технологии на заводе «Электроника» НПО «Интеграл» (главный инженер завода – выпускник физического факультета В. П. Царев) выпускали персональный компьютер МК-90.

- Созданы установки для измерения основных электрооптических параметров ЖК.
- Разработана технология создания экранов с высокоточным заданием толщины ЖК-слоя, что позволило не только существенно улучшить свойства нематических ЖК-устройств, но и создать дисплеи на основе сегнетоэлектрических и антисегнетоэлектрических ЖК, имеющих аналоговую шкалу серости. Были существенно увеличены контраст и яркость отражательных дисплеев, поскольку толщина ЖК-слоя была сделана переменной и подогнана в соответствии с длиной волны пропускания каждого светофильтра.
- Разработаны новые методы синтеза ЖК производных циклогексана, циклогексена, дифенила, 1,3-диоксана, 1,2,3-диоксаборинана, и экспериментально подтверждена целесообразность использования таких соединений на примере 3,6-дизамещенных 2-циклогексенов.
- Совместно с «СКБ Немига» НПО «Интеграл» созданы образцы цветных телевизоров с диагональю 16 см.
- Изготовлена опытная партия ЖК-модуляторов для масок электросварщиков (назначение – защита глаз от УФ-излучения при проведении сварочных работ).
- Получены ЖК-материалы для дисплеев, работающих на супертвист-эффекте.
- Предложена технология получения материалов ориентирующих, диэлектрических и проводящих покрытий.

С начала 1990-х гг. расширяется география сотрудничества кафедры физической оптики и ЛОКС. Научными партнерами становятся Варшавская военно-техническая академия (Польша), Бохумский, Дортмундский, Дармштадтский и Йенский университеты (Германия), различные фирмы Южной Кореи, США, Индии, Норвегии, Китая и др. Основной вклад в налаживание зарубежных контактов с вышеуказанными странами внесли А. А. Минько, В. И. Лапаник, В. С. Безбородов, С. Е. Яковенко, а также В. В. Могильный и А. Л. Толстик.

В 1995 г. на базе ЛОКС была создана совместная с фирмой *Samsung* лаборатория (рис. 3) (ныне – филиал НИИ ПФП имени А. Н. Севченко БГУ (СЛС-И)), руководителем которой по настоящее время является А. А. Минько, а его заместителем – В. И. Лапаник. В исследованиях, проводимых в СЛС-И, а также внедрении полученных результатов активно участвуют как сотрудники ЛОКС института, так и преподаватели, научные сотрудники, аспиранты и студенты кафедр физической оптики и прикладной информатики и лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ. В дальнейшем все исследования и внедрение их результатов проводились в сотрудничестве с ЛОКС, кафедрой физической оптики БГУ и филиалом СЛС-И.

За время деятельности СЛС-И сотрудничала со следующими зарубежными компаниями: *Samsung Display Devices* (Южная Корея), *Philips Electronics Nederland B. V.* (Нидерланды), *Smart Display Co. Ltd.* (Южная Корея), *KSI Co. Ltd.* (Южная Корея), *Philips Components LCOS* (США), *Samsung Advanced*



Рис. 3. Подписание контракта с фирмой «Самсунг»

Fig. 3. Signing a contract with the firm *Samsung*

Institute of Technology (Южная Корея), *MicroDisplay Co.* (США), *TechnoDisplay AS* (Норвегия), *LG Display* (Южная Корея), *Koenig-PA* (Германия).

Научные исследования жидких кристаллов были продолжены и в 2000-х гг. На пороге нового тысячелетия (в 1999 г.) защищены 2 докторские диссертации (С. Е. Яковенко и В. С. Безбородовым), проведены более углубленные исследования электрооптических эффектов для создания жидкокристаллических дисплеев [2].

В 2003 г. А. А. Минько, Е. С. Воропая, В. И. Попечицу и А. П. Клищенко присуждена премия имени А. Н. Севченко за развитие теории анизотропии поглощения и испускания света сложными органическими соединениями, разработку и внедрение в практику новых лазерных сред, жидкокристаллических материалов, спектрофлуориметрических приборов и систем отображения информации (рис. 4).



Рис. 4. Лауреаты премии имени А. Н. Севченко 2003 г. (слева направо):
Е. С. Воропай, А. П. Клищенко, А. А. Минько и В. И. Попечиц

Fig. 4. Laureates of the Prize A. N. Sevchenko 2003 (from left to right):
E. S. Voropay, A. P. Klishchenko, A. A. Minko and V. I. Popechits

С 2010 г. в сотрудничестве с Хэйлунцзянским институтом нефтехимии (ХИНХ, Китай) ведутся работы по разработке широкотемпературной жидкокристаллической композиции для ЖК-дисплеев на модах TN и IPS с интервалом рабочих температур от -40 до $+95$ °C. В 2013–2016 гг. работали над созданием новых материалов для изготовления дисплеев на органических люминофорах (OLED), а также соединений, содержащих в структуре оксидиформетиленовый молекулярный мостик, что позволяет существенно улучшить время переключения активно-матричных дисплеев (рис. 5).



Рис. 5. Подписание контракта с Хэйлунцзянским институтом нефтехимии (Китай, 2011 г.)

Fig. 5. Signing a contract with the University of Heilongjiang (China, 2011)

Углубляется сотрудничество с рядом институтов и предприятий Республики Беларусь и Российской Федерации – Институтом физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси, Белорусским государственным университетом информатики и радиоэлектроники (БГУИР), Институтом химии новых материалов НАН Беларуси, НПО «Интеграл», ОАО «КБТЭМ-ОМО» и др.

За последние 25 лет получены новые результаты, имеющие как фундаментальное [3; 4], так и практическое значение [5; 6]. Они внедрены в производство и образовательный процесс БГУ [7–10]. Основные из них приведены ниже.

- Разработан ряд оптических методов с использованием молекулярного зонда для изучения анизотропии локального поля и влияния межмолекулярных взаимодействий на параметры спектральных полос ЖК. Определена анизотропия локального поля в нематической фазе ряда мезогенных производных бензонитрила.

- Доказана определяющая роль универсальных межмолекулярных взаимодействий в формировании спектра рассеяния в области крыла линии Рэлея мезогенов; обнаружено значительное изменение интенсивности комбинационного рассеяния под действием универсальных межмолекулярных взаимодействий; предложен и обоснован механизм влияния универсальных межмолекулярных взаимодействий на интенсивность рассеяния света в мезогенах и их растворах.

- Показана возможность исследования времени переориентации молекул в нематических ЖК на основании сравнительного анализа деполяризации спектров РКР и люминесценции.

- Обобщено соотношение Лоренц – Лоренца на случай нематической фазы и растворов мезогенов в немезогенных растворителях с учетом локальной упорядоченности молекул, что позволило описать экспериментально наблюдаемые явления как в нематической, так и в изотропной фазе и растворах мезогенов. Впервые экспериментально оценено влияние межмолекулярных взаимодействий на молекулярную рефракцию.

- Теоретически обоснован метод определения ориентационных функций автокорреляции, описывающих вращение молекул вокруг различных осей. Метод построен на анализе формы полос комбинационного рассеяния и не требует использования модельных представлений о виде потенциала межмолекулярного взаимодействия. Установлены основные закономерности вращательного движения молекул в мезофазе, в частности, впервые показан существенно недиффузионный характер такого движения в пикосекундном интервале времен. На основании сопоставления экспериментальных и расчетных данных дано объяснение этого явления и предложена модель, адекватно описывающая вращение мезогенных молекул.

- Был разработан ряд быстродействующих (субмиллисекундных) ЖК-затворов, в том числе и пространственно-временных модуляторов света, пригодных для использования в проекционных дисплеях видеоизображения, в которых цветовая гамма получена последовательным смещением цветов.

- На основании моделирования поведения нематических ЖК во внешних электрических полях были разработаны оригинальные методы создания многодоменных ЖК-дисплеев с улучшенным углом обзора и высокой яркостью.

- Предложен новый подход к разработке люминесцентных ЖК-материалов в целях увеличения времени жизни ЖК-дисплеев, созданных на основе этих материалов. В качестве рабочей среды использовались не люминесцентные добавки, а разработанные в ЛОКС ЖК-соединения, которые могли излучать свет на определенных длинах волн. Анализ физико-химических свойств люминесцентных ЖК-соединений, содержащих 3–4 фенольных фрагмента, показал, что на максимум полосы поглощения и излучения наибольшее влияние оказывают вид боковых заместителей и полярность базовых матриц. Для достижения максимального квантового выхода и необходимого максимума люминесценции в синей области спектра наиболее перспективными являются соединения, содержащие 2 боковых заместителя в 2, 3 или 4 кольцах (F, Cl, CH₃), а в качестве полярной группы выступают атомы F. В зеленой области спектра наиболее перспективным оказалось использование 1–2 % новых производных 3,4,9,10-тетра-(*n*-алкоксикарбонил)перилена и 9,10-бис(4-замещенные фенилэтинил)антрацена, обладающих ЖК-свойствами. На основании разработанных люминесцентных ЖК-композиций были изготовлены экспериментальные образцы дисплеев, характеризующиеся стабильно высокой яркостью.

- Созданы и исследованы в качестве ориентантов ЖК фоточувствительные полимеры с боковыми бензальдегидными группами. Обнаружены и изучены два ориентирующих эффекта планарного типа: возникающая под действием линейно-поляризованного УФ-облучения фотоориентация и фотостимулированная неполяризованным УФ-облучением ориентация после натирания. На основе фотостимулированной ориентации созданы технологии формирования поверхностей для планарной многодоменной и градиентной ориентации ЖК. В первом случае достигаются дискретные изменения направления директора в плоскости слоя, что позволяет использовать ориентант, например, для изготовления многозонных

поляризаторов и фазовых пленок. Во втором случае может быть создано непрерывное распределение угла преднаклона и на его основе – адаптивные оптические элементы, например ЖК-линзы с переменным фокусным расстоянием.

- Теоретически и экспериментально исследованы оптические свойства сегнетоэлектрических ЖК-кристаллов, в результате чего была решена задача формирования бездефектных, стабильных к механическому и температурному воздействию слоев сегнетоэлектрических ЖК-материалов на основании определения граничных условий между вязкоупругими свойствами нехиральных и хиральных сред при установленных энергиях сцепления ориентирующих слоев. Анализ мезоморфных и вязкоупругих свойств 4-кольчатых хиральных соединений показал, что для создания ферроэлектрических ЖК-композиций, стабильных к механическому воздействию, наиболее перспективны компоненты, содержащие 6–8 атомов углерода в алкильной цепочке и в качестве боковых заместителей – атом хлора или метильную группу, а также 5–6 атомов углерода в алкильной цепочке после хирального центра.

- Разработаны основы перспективной технологии и способ производства цветных бесполяроидных селективно-рассеивающих ЖК-дисплеев, а также бистабильных ЖК-дисплеев с использованием сильно закрученных хирально-нематических сред. Показана возможность создания бистабильных устройств отображения информации, в которых существование двух стабильных состояний допускается в течение длительного времени при любых механических деформациях.

- Исследованы электрооптические свойства ЖК-материалов, допированных наночастицами. Обнаружено, что небольшое количество наночастиц в значительной степени изменяет их диэлектрические, электрооптические и магнитооптические свойства.

- Установлен критерий для целенаправленного поиска новых практически значимых ЖК-соединений и ЖК-материалов. Разработаны новые методы синтеза ЖК-соединений для электрооптических устройств отображения информации: синтетические схемы на 2–3 стадии короче и позволяют получать конечные ЖК-соединения с более высоким выходом.

- Предложен новый способ создания ЖК-дисплеев с большим углом обзора на основе мультидоменных, вертикально ориентированных структур на профилированных подложках.

- Разработан ряд ЖК-приборов и устройств: ахроматические фазовые пластинки, работающие в широком спектральном диапазоне; высококонтрастный бистабильный дисплей с малым (менее 3 В) управляющим напряжением; дисплеи на основе селективного рассеяния с малым (до 2 В) управляющим напряжением; высококонтрастный дисплей с гомеотропной ориентацией и быстрыми временами переключения (контрастное отношение составляет 1000 : 1, время отклика – менее 5 мс); сегнетоэлектрические ЖК-устройства отображения информации со стабильной ориентацией, не зависящей от механического воздействия (температурный рабочий интервал – от –20 до +120 °С, время отклика – <150 мкс).

- Разработаны технологии и созданы электрически контролируемые ЖК-элементы для управления пространственно-поляризационными параметрами лазерного излучения.

- По проблематике исследований в области жидких кристаллов опубликованы свыше 800 статей в престижных научных изданиях, изданы 5 учебных пособий, 3 монографии, сделаны свыше 500 докладов на международных конференциях и симпозиумах, получены авторские свидетельства на 160 изобретений и 40 зарубежных патентов, подготовлены 3 доктора и 15 кандидатов наук. Результаты исследований внедрены на ряде предприятий Республики Беларусь и Российской Федерации, а также в образовательный процесс БГУ.

Библиографические ссылки

1. Абдулин А. З., Безбородов В. С., Минько А. А. и др. Текстуробразование и структурная упорядоченность в жидких кристаллах. Минск : БГУ, 1987.
2. Минько А. А., Безбородов В. С., Лапаник В. И. и др. Электрооптические эффекты для жидкокристаллических дисплеев // Выбранные научные работы Беларускага дзяржаўнага ўніверсітэта : у 7 т. Мінск, 2001. Т. 4. С. 90–102.
3. Минько А. А., Яковенко С. Е. Индуцированное межмолекулярными взаимодействиями рассеяние света в растворах мезогенов // Спектроскопия и люминесценция молекулярных систем. Минск, 2002. С. 315–328.
4. Могильный В. В., Станкевич А. И., Трофимова А. В. Ориентация жидкокристаллического мономера полимерами с бензальдегидными группами // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2014. № 2. С. 17–22.
5. Применение молекулярной люминесценции и спектроскопии к исследованию структуры и свойств вещества / под ред. Д. С. Умрейко, А. А. Минько. Минск : БГУ, 2006.
6. Безбородов В. С., Минько А. А., Лапаник В. И. Люминесцентные жидкокристаллические материалы, излучающие в зеленой области спектра // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2011. № 1. С. 14–17.
7. Курилкина С. Н., Минько А. А. Оптика кристаллов и кристаллических структур. Минск : БГУ, 2012.
8. Физическая оптика в БГУ. Кафедра физической оптики 60 лет / редкол.: А. А. Минько [и др.]; отв. ред.: А. А. Минько, Д. С. Умрейко. Минск : БГУ, 2013.
9. Воронай Е. С., Гулис И. М., Комяк А. И. Спектроскопия и лазерная физика в БГУ. Кафедра лазерной физики и спектроскопии 60 лет / под ред. Е. С. Воронай. Минск : БГУ, 2013.
10. Минько А. А. Физика жидких кристаллов. Минск : БГУ, 2017.

References

1. Abdulin A. Z., Bezborodov V. S., Min'ko A. A., et al. Teksturoobrazovanie i strukturnaya uporyadochennost' v zhidkikh kristallakh [The texture formation and structural ordering in liquid crystals]. Minsk : BSU, 1987 (in Russ.).
2. Minko A. A., Bezborodov V. S., Lapanik V. I., et al. Elektroopticheskie efekty dlya zhidkokristallicheskich displeev [Electro-optical effects for liquid-crystal displays]. In: *Vybraniya navukovyja pracy Belaruskaga dzjarzhawnaga wniversitjeta* : in 7 vols. Minsk, 2001. Vol. 4. P. 90–102 (in Russ.).
3. Minko A. A., Yakovenko S. E. Indutsirovannoe mezhmolekulyarnymi vzaimodeistviyami rasseyanie sveta v rastvorakh mezenogenov [The intermolecular-interaction induced light scattering in mesogene solutions]. In: *Spektroskopiya i lyuminestsentsiya molekulyarnykh sistem*. Minsk, 2002. P. 315–328 (in Russ.).
4. Mogilny V. V., Stankevich A. I., Trofimova A. V. Orientation of liquid crystal monomer by polymers with benzaldehyde groups. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2014. No. 2. P. 17–22 (in Russ.).
5. Umreiko D. S., Minko A. A. (eds). *Primenenie molekulyarnoi lyuminestsentsii i spektroskopii k issledovaniyu struktury i svoistv veshchestva* [The application of molecular luminescence and spectroscopy to studies of the material structure and properties]. Minsk : BSU, 2006 (in Russ.).
6. Bezborodov V. S., Minko A. A., Lapanik V. I. Luminescent liquid-crystal materials emitting in the green spectral region. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2011. No. 1. P. 14–17 (in Russ.).
7. Kurilkina S. N., Minko A. A. Optika kristallov i kristallicheskich struktur [Optics of crystals and crystalline structures]. Minsk : BSU, 2012 (in Russ.).
8. Minko A. A., Umreiko D. S., Kurilkina S. N. (eds). *Fizicheskaya optika v BGU. Kafedre fizicheskoi optiki 60 let* [Physical optics at the Belarusian State University. The 60th Anniversary of the Physical Optics Department]. Minsk : BSU, 2013 (in Russ.).
9. Voropai E. S., Gulis I. M., Komyak A. I. *Spektroskopiya i lazernaya fizika v BGU. Kafedre lazernoi fiziki i spektroskopii 60 let* [Spectroscopy and laser physics in BSU. The 60th Anniversary of the Laser Physics and Spectroscopy Department]. Minsk : BSU, 2013 (in Russ.).
10. Minko A. A. *Fizika zhidkikh kristallov* [Physics of liquid crystals]. Minsk : BSU, 2017 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 07.02.2018.
Received by editorial board 07.02.2018.