Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2026. Т. 26, № 3. С. 16–27
Liquid Crystals and their Application. 2026. Vol. 26, № 3. P. 16–27
ISSN 1991–3966 (print), 2499–9644 (online), Journal homepage: http://nano.ivanovo.ac.ru/journal/ru/

Обзор

УДК: 544.252.26

ДИСКОТИЧЕСКИЕ ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ И ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

В.В. Беляев[1,2], В.А. Авдеенков[2,3], А.В. Казак[4,5], А.С. Ачалкумар[6], С. Кумар[7], А.А. Пасынков[1]

[1]Государственный университет просвещения, Москва, Россия
[2]Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, Москва, Россия
[3]Московский университет «Синергия», Москва, Россия
[4]Ивановский государственный университет, Иваново, Россия
[5]Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия
[6]Индийский институт технологии Гувахати, Гувахати, штат Ассам, Индия
[7]Инженерно-научная школа Шарда, Университет Шарда, Большая Нойда, Индия

И Н Ф О Р М А Ц И Я

История статьи:
Поступила 17.06.2026
Одобрена 17.08.2026
Принята 24.08.2026

Ключевые слова:
дискотические жидкие кристаллы,
колончатая мезофаза,
нематическая мезофаза,
органическая электроника,
фотовольтаика,
транспорт заряда,
молекулярный дизайн,
перилен,
фталоцианин

А Н Н О Т А Ц И Я

В обзоре систематизированы современные представления о дискотических жидких кристаллах (ДЖК) – особом классе мезогенных органических соединений, молекулы которых обладают плоской дискообразной формой и склонны к самоорганизации в высокоупорядоченные супрамолекулярные структуры. Рассмотрены основные типы мезофаз ДЖК (нематические и колончатые), а также определяющие их физические свойства (отрицательное двулучепреломление нематической фазы, лежащее в основе применения ДЖК в оптических компенсирующих пленках ЖК-дисплеев, и колоссальная анизотропия электропроводности колончатых фаз, обеспечивающая одномерный транспорт заряда вдоль молекулярных колонок). Отдельное внимание уделено влиянию эффекта Яна – Теллера на подвижность носителей заряда и стратегиям молекулярного дизайна функциональных ДЖК на основе перилена, фталоцианина и порфирина, включая результаты квантовохимического моделирования их электронной структуры. Обсуждаются перспективы применения ДЖК в органических полевых транзисторах, фотовольтаических устройствах, в том числе солнечных элементах, сенсибилизированных красителем, где эффективность преобразования энергии достигает более 9 %, а также в химических и рентгеновских датчиках. Показано, что введение наночастиц металлов и полупроводников способно повышать проводимость ДЖК-систем на несколько порядков величины. Сделан вывод о высоком потенциале ДЖК как материалов нового поколения для оптоэлектроники.

DOI:
10.18083/LCAppl.2026.3.16

EDN:
https://elibrary.ru/sljkel

Для цитирования:
Беляев В.В., Авдеенков В.А., Казак А.В., Ачалкумар А.С., Кумар С., Пасынков А.А. Дискотические жидкие кристаллы для оптоэлектронных и электрооптических устройств // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2026. Т. 26, № 3. С. 16–27.

© Беляев В.В., Авдеенков В.А., Казак А.В., Ачалкумар А.С., Кумар С., Пасынков А.А., 2026
Адрес для переписки: vv.belyaev@guppros.ru

Review article

DISCOTIC LIQUID CRYSTALS FOR OPTOELECTRONIC AND ELECTROOPTIC DEVICES

V.V. Belyaev[1,2], V.A. Avdeenkov[2,3], A.V. Kazak[4,5], A.S. Achalkumar[6], S. Kumar[7], A.A. Pasynkov[1]

[1]*State University of Education, Moscow, Russia*
[2]*Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia*
[3]*Moscow University "Synergy", Moscow, Russia*
[4]*Ivanovo State University, Ivanovo, Russia*
[5]*Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics, National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia*
[6]*Indian Institute of Technology Guwahati, IIT Guwahati, Assam, India*
[7]*Sharda School of Engineering & Science, Sharda University, Greater Noida, India*

A R T I C L E I N F O:

Article history:
Received 17 June 2026
Approved 17 August 2026
Accepted 24 August 2026

Key words:
discotic liquid crystals,
columnar mesophase,
nematic mesophase,
organic electronics,
photovoltaics,
charge transport,
molecular design,
perylene,
phthalocyanine

A B S T R A C T

This review brings together current knowledge on discotic liquid crystals (DLCs), a distinctive class of mesogenic organic compounds, whose disc-shaped molecules self-assemble into highly ordered supramolecular structures. Two principal mesophase types (nematic and columnar) and their principal properties: *i*) negative birefringence of nematic phase, underlying the use of DLCs in optical compensation films for liquid crystal displays; *ii*) high conductivity anisotropy of columnar phases, which supports one-dimensional charge transport along molecular columns, were examined. Special attention is given to the Jahn – Teller effect and its influence on charge-carrier mobility, as well as to molecular-design strategies for functional DLCs based on perylene, phthalocyanine, and porphyrin cores, including density-functional calculations of their electronic structure. The application prospects of DLCs in organic field-effect transistors and photovoltaic devices, including dye-sensitized solar cells with efficiencies of more than 9%, are discussed, along with their use in chemical and X-ray sensors. It is shown that incorporation of metal and semiconductor nanoparticles are able to raise the conductivity of DLC-based systems by several orders of magnitude. The review concludes that discotic liquid crystals hold considerable promise as next-generation optoelectronic materials.

DOI:
10.18083/LCAppl.2026.3.16

EDN:
https://elibrary.ru/sljkel

For citation:
Belyaev V.V., Avdeenkov V.A., Kazak A.V., Achalkumar A.S., Kumar S., Pasynkov A.A. Discotic liquid crystals for optoelectronic and electrooptic devices. *Liq. Cryst. and their Appl*., 2026, **26** (3), 16–27 (in Russ.).

© Belyaev V.V., Avdeenkov V.A., Kazak A.V., Achalkumar A.S., Kumar S., Pasynkov A.A., 2026
*Corresponding author: vv.belyaev@guppros.ru

Введение

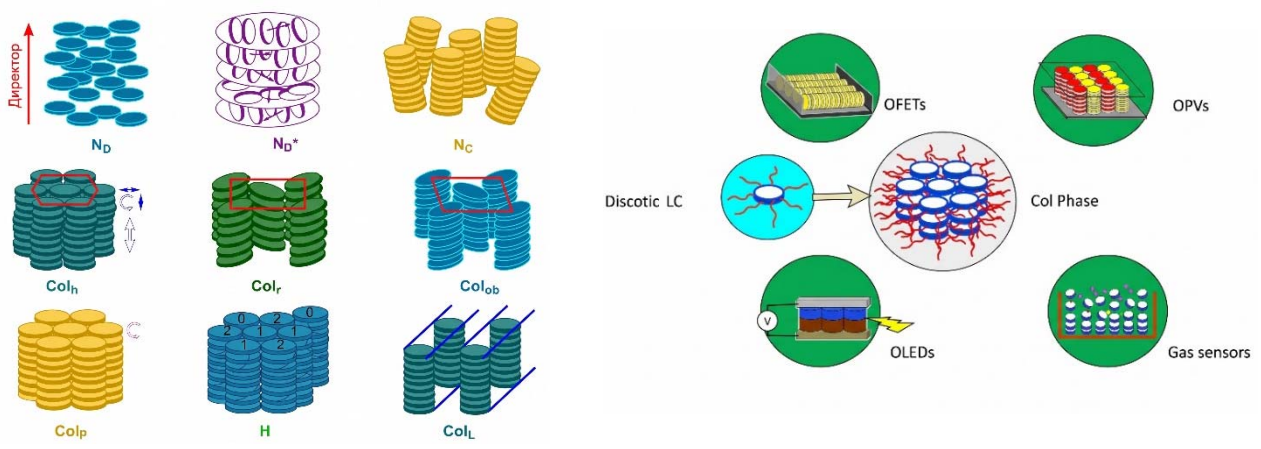
Дискотические жидкие кристаллы (ДЖК) занимают особое место среди мезогенных материалов: в отличие от классических каламитных мезогенов, имеющих вытянутые стержнеобразные молекулы, ДЖК построены из молекул плоской, дискообразной формы. Такая геометрия предопределяет принципиально иной характер молекулярной самоорганизации и, как следствие, иной набор физических свойств – от анизотропии оптических характеристик до исключительной электрической анизотропии. Интерес к этому классу веществ неуклонно возрастает, начиная с 1970-х годов, когда С. Чандрасекар впервые описал дискотическую нематическую фазу [1, 2], а С. Кумар синтезировал первые ДЖК [3]. С тех пор число известных ДЖК-материалов исчисляется тысячами, а спектр их потенциальных применений охватывает дисплейную технику, органическую фотовольтаику, сенсорику и одномерные молекулярные проводники.

В обзоре представлен систематический обзор структурных, оптических и электрических свойств ДЖК, а также современных подходов к их синтезу и применению в оптоэлектронных и электрооптических устройствах. Приводятся результаты квантово-химического моделирования новых мезогенов на основе гетероциклических ядер и данные по эффективности фотовольтаических систем на основе ДЖК.

Строение и фазовое поведение дискотических жидких кристаллов

Молекулы ДЖК состоят из плоского ароматического или гетероциклического ядра, окруженного гибкими алкильными или алкоксильными заместителями. Такое строение обеспечивает как π-π-стэкинговые взаимодействия между ядрами, так и достаточную мобильность для реализации мезофазного состояния. В зависимости от характера молекулярного расположения ДЖК образуют нематические или двумерно-упорядоченные колончатые мезофазы (рис. 1) [4].

В нематической дискотической фазе центры тяжести молекул распределены случайно, однако короткие оси молекул (нормали к дискам) ориентированы преимущественно в одном направлении – вдоль директора. Это принципиально отличает данную фазу от обычного каламитного нематика, у которого ориентационный порядок определяется длинной осью молекулы. В случае хиральных дискотических молекул реализуется хиральная нематическая дискотическая фаза со спиральной (геликоидальной) надструктурой.



a *b*

Рис. 1. a – Типы дискотических мезофаз: три нематических (N_D – дискотическая нематическая, N_{D*} – дискотическая хиральная нематическая, N_C – нематическая колончатая), пять колончатых двумерно-упорядоченных (Col_h – гексагональная колончатая, Col_r – прямоугольная, Col_{ob} – наклонная), Col_p – пластическая, H – спиральная (геликоидальная) и Col_L – колончатая ламеллярная; *b* – потенциальные применения ДЖК

Fig. 1. a – Types of discotic mesophases: three nematic (N_D – discotic nematic, N_{D*} – chiral discotic nematic, N_C – nematic columnar), five columnar (Col_h – hexagonal, Col_r – rectangular, Col_{ob} – oblique, Col_p – plastic, H – helicoidal, Col_L – columnar lamellar); *b* – their potential applications

В колончатых мезофазах молекулы укладываются в колончатые агрегаты, образуя двумерно упорядоченные массивы колонок. В зависимости от симметрии двумерной решетки выделяют разновидности колончатых мезофаз (рис. 1). Именно колончатые фазы определяют наибольший практический интерес, поскольку обеспечивают одномерный перенос заряда вдоль колонок [4].

Оптические свойства и применение в жидкокристаллических дисплеях

Одно из наиболее практически значимых оптических свойств ДЖК в нематической дискотической фазе N_D (а также в хиральной нематической дискотической фазе N_{D*}) – отрицательное двулучепреломление. Обычные каламитные нематики обладают положительным двулучепреломлением, поэтому их сочетание с ДЖК в многослойных системах позволяет осуществить взаимную оптическую компенсацию – прохождение поляризованного света через такую составную систему приводит к компенсации изменений эллиптичности поляризованного света (рис. 2) [5, 6].

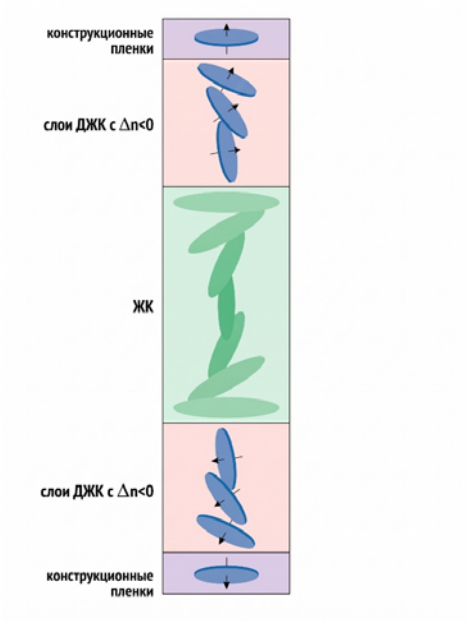


Рис. 2. Структура оптического компенсатора со слоями, имеющими положительную и отрицательную оптическую анизотропию

Fig. 2. Structure of an optical compensator with layers having positive and negative optical anisotropy

Именно этот принцип лежит в основе применения ДЖК в качестве компонентов оптических компенсирующих пленок для расширения углов обзора жидкокристаллических дисплеев (ЖКД). Введение таких пленок обеспечивает близкую к идеальной диаграмму углов обзора дисплея (рис. 3) [7], что особенно важно для широкоформатных панелей и мониторов профессионального класса. Описанный подход уже нашел промышленное применение и продолжает совершенствоваться по мере появления новых мезогенных составов с улучшенными оптическими характеристиками.

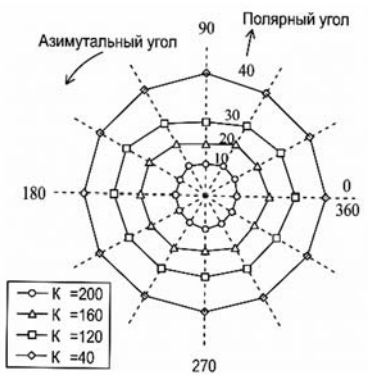


Рис. 3. Линии равного контраста ЖК ячейки с гекса(4-нонилфенил)этинилбензолом

Fig. 3. Iso-contrast contours of a liquid crystal cell based on hexa(4-nonylphenyl)ethynylbenzene

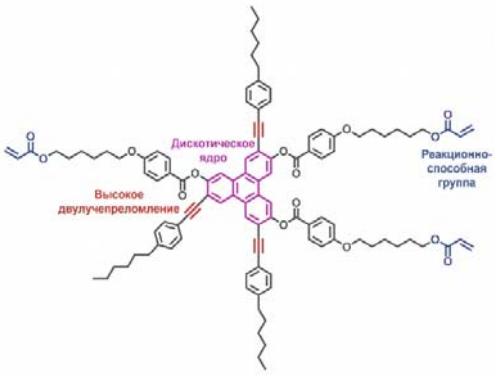


Рис. 4. Структурная формула ДЖК на основе асимметричного трифенилена с фенилацетиленовыми фрагментами, имеющего высокое двулучепреломление (Δn = 0,21–0,25) и широкий диапазон нематической фазы (от –20 до +170 °C)

Fig. 4. Structural formula of a discotic liquid crystal based on an asymmetric triphenylene with phenylacetylene fragments, exhibiting high birefringence (Δn = 0.21–0.25) and a wide nematic phase range (from −20 to +170 °C)

Перспективным направлением остается поиск ДЖК с высоким значением двулучепреломления и широким температурным диапазоном нематической фазы. В этом контексте особого внимания заслужи-

вает соединение на основе асимметричного трифенилена с фенилацетиленовыми фрагментами, у которого двулучепреломление достигает Δn = 0,21–0,25 при весьма широком диапазоне нематической фазы – от –20 до +170 °C (рис. 4) [8].

Сочетание рекордного двулучепреломления и диапазона фазы открывает возможности для углубления модуляции оптического отклика при уменьшении времен переключения дисплейных ячеек.

Помимо использования в качестве компенсаторов, ДЖК занимают определенную нишу в дисплейных технологиях в роли фотоориентирующих слоев для управления ориентацией обычных каламитных ЖК на больших площадях (рис. 5) [9, 10]. Это открывает путь к технологически привлекательным решениям для дисплеев нового поколения, в которых ориентирующая функция и оптическая компенсация могут быть реализованы в одном тонкопленочном элементе.

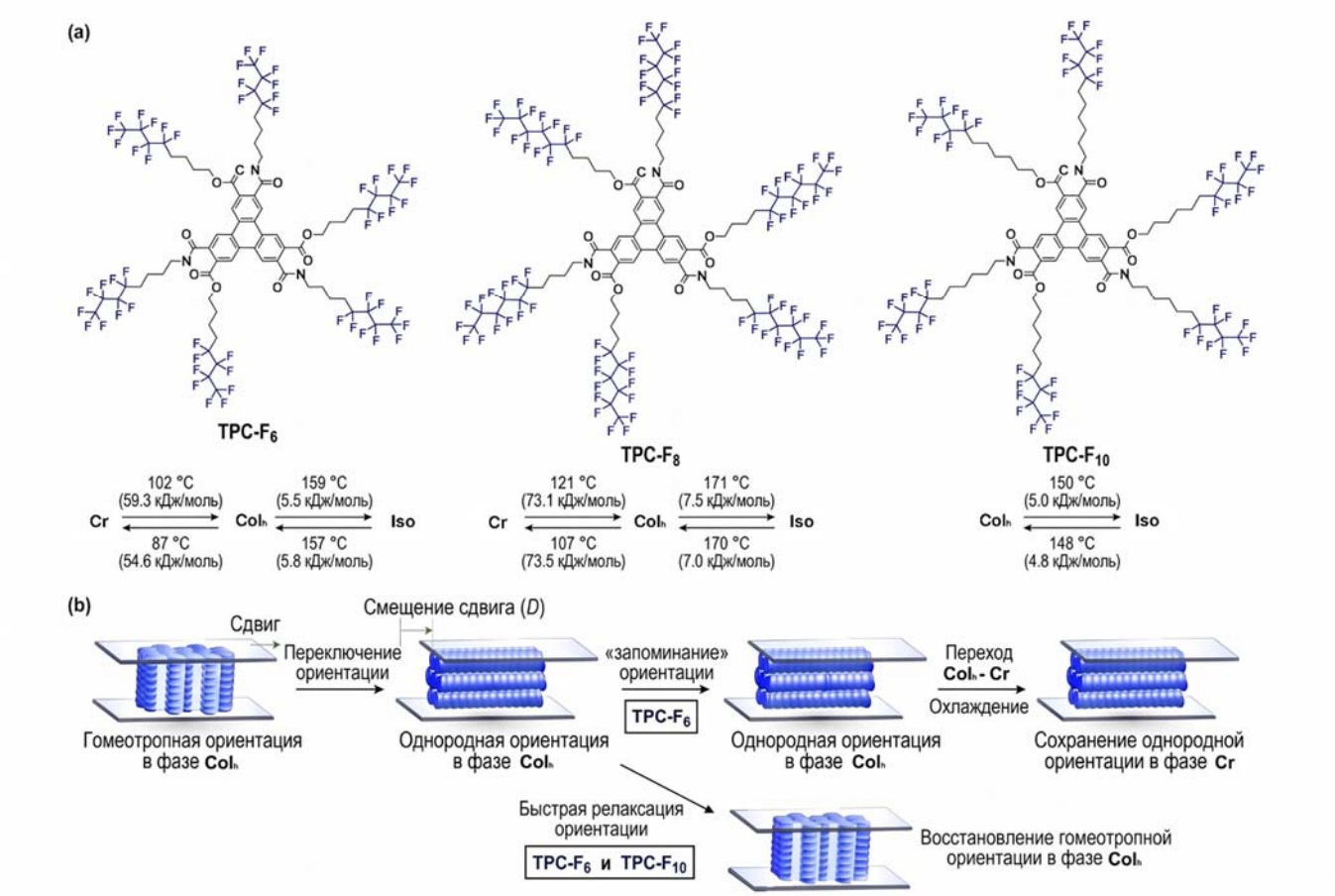


Рис. 5. a – Структурные формулы молекул и фазовые переходы производных фторалкильных трифениленовых эфиров гексакарбоновой кислоты TPC_nF_m. *b* – Схема изменения ориентации колонок TPC_nF_m при механическом сдвиге. Cr – кристаллическая фаза, Col_h – гексагональная колончатая, Iso – изотропная фаза

Fig. 5. a – Molecular structural formula and phase transitions of semifluoroalkylated triphenylene hexacarboxylic ester derivatives TPC_nF_m. *b* – Scheme of column orientation change in TPC_nF_m under mechanical shear. Cr – crystalline phase, Col_h – hexagonal, Iso – isotropic phase

Перенос заряда в колончатых фазах и эффект Яна – Теллера

Ключевое преимущество колончатых фаз ДЖК с точки зрения органической электроники – колоссальная анизотропия электропроводности. В различных колончатых фазах электропроводность вдоль и поперек колонок различается на десять порядков величины. Это делает каждую колонку фактически одномерным молекулярным проводником (рис. 6) [4]. При этом достигнутая подвижность носителей заряда в ДЖК уже находится в том же диапазоне значений, что и у лучших органических полупроводниковых материалов, разрабатываемых на протяжении нескольких десятилетий [11].

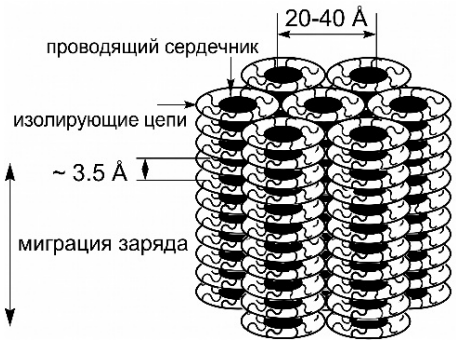


Рис. 6. Схема миграции зарядов в колончатой фазе ДЖК

Fig. 6. Scheme of charge migration in columnar phase of discotic liquid crystals

Высокая анизотропия электропроводности ДЖК и достигнутый уровень подвижности носителей заряда непосредственно определяют применимость этих материалов в органических тонкопленочных транзисторах (TFT/OTFT). Пример современного органического транзистора на основе материала, аналогичного ДЖК, приведен в работе [12]: в ней реализованы тонкопленочные транзисторы для двуосно формируемых активных поверхностей, пригодных для гибкой дисплейной электроники. Параллельно в [13] показано, что тонкие аморфные пленки триклинного рубрена, допированные фуллереном C_{60}, достигают подвижности до 10 $см^2/(В*с)$ – рекордного значения для органики – и позволяют реализовать диоды с полосой пропускания свыше 3 ГГц, что открывает путь к гигагерцовой органической электронике.

Отдельного внимания заслуживают топологически защищенные экситонные токи в упорядоченных пленках порфиринов и металлофталоцианинов (МФц). В работе [14] с помощью двумерного численного моделирования было показано, что тонкие пленки порфиринов и электронно-родственных им МФц, в которых распространяются экситоны Френкеля при наличии однородного магнитного поля, перпендикулярного плоскости пленок, топологически эквивалентны кристаллическим топологическим изоляторам. В таких системах возникают защищенные топологией краевые токи, текущие вдоль границы образца и дающие измеримый вклад в его проводимость. Развитие этих представлений предпринято в работе [15], где построены и сопоставлены двумерная и трехмерная модели топологических токов в МФц, порожденных эволюцией экситонных конфигураций, и оценена применимость этих моделей к описанию проводящих свойств МФц-ассоциатов.

В центре исследования – природа и динамика краевых бездиссипативных токов, возникающих в комплексах металлофталоцианинов под действием постоянного магнитного поля, нормального к молекулярной плоскости. Работа включает обзор нескольких решеточных моделей в приближении сильной связи, применимых к МФц-системам с экситонными токами и релевантных для фотовольтаических и спинтронных устройств. В качестве иллюстрации приводится трехмерная решеточная модель, проанализированная методом Монте – Карло (рис. 7).

На рисунке 7 изображен спектр краевых экситонных токов для нижнего возбужденного уровня в ортогональном магнитном поле, рассчитанный для соответствующего гамильтониана методом Монте – Карло.

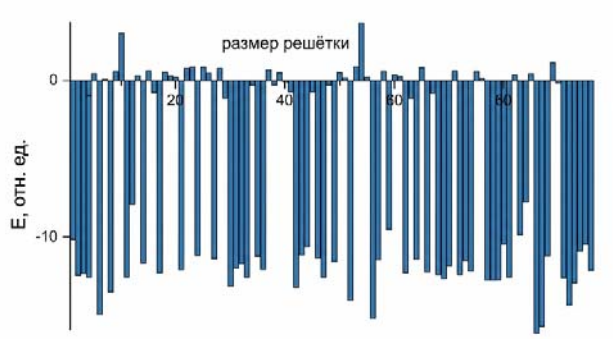


Рис. 7. Спектр поглощения на краю образца МФц в направлении оси X, пропорциональный экситонному току, построенный для нижнего возбужденного уровня ω_L

Fig. 7. Edge absorption spectrum of a metallophthalocyanine sample along the X axis, proportional to the exciton current, calculated for the lowest excited level ω_L

Вместе с тем в органических полупроводниках на основе дискотических молекул существенную роль играет эффект Яна – Теллера – геометрическое искажение нелинейных молекулярных систем, понижающее их симметрию и полную энергию при вырождении электронных состояний [16]. Применительно к ДЖК этот эффект проявляется в трех взаимосвязанных последствиях: 1) локализации носителей заряда в потенциальных ямах, образующихся вследствие искажений молекулярной геометрии; 2) нарушении регулярной упаковки молекул в столбцах и, как следствие, уменьшении перекрытия π-орбиталей; а также 3) в увеличении энергетического беспорядка из-за распределения уровней энергии в ансамбле деформированных молекул. Исследования гексабензокороненовых систем показывают, что именно эффект Яна – Теллера в анионах и катионах коронена ограничивает транспорт заряда. Поэтому стратегия молекулярного дизайна современных ДЖК-полупроводников направлена прежде всего на минимизацию таких искажений для достижения высокой подвижности [17].

Синтез и молекулярный дизайн функциональных дискотических жидких кристаллов

Дизайн и синтез новых ДЖК на основе макрогетероциклических ароматических систем – перилена, фталоцианина и порфирина – является ключевым направлением в материаловедении органической электроники [18]. Расширенная π-сопряженная электронная система таких соединений предопределяет их выдающиеся оптоэлектронные свойства и способность к образованию высокоупорядоченных супрамолекулярных структур. Эффективный синтез функциональных ДЖК требует рационального подхода, сочетающего введение мезогенных ядер с периферийной модификацией для управления растворимостью, температурой фазовых переходов и типом упаковки.

Показательным примером такой стратегии служит синтез аннелированного селеном перилового диэфиримида (PEI-SeST) [18]. Ключевыми этапами синтеза являются: 1) функционализация исходного ядра перилентетракарбонового диангидрида длинноцепочечными алкоксигруппами для обеспечения растворимости; 2) гетероатомная аннеляция методом циклизации по Кадогану с введением атома селена в периленовое ядро, что кардинально меняет физические свойства соединения по сравнению с родительской молекулой; наконец, 3) имидирование объемным амином (трикоза-12-амин), создающее асимметричный «ласточкин хвост» у имидного азота. Последний прием снижает температуру плавления и стабилизирует мезофазу при комнатной температуре, предотвращая кристаллизацию.

Квантово-химическое моделирование электронной структуры PEI-SeST, выполненное методом теории функционала плотности на уровне B3LYP/6-31G(d,p), дает следующие результаты: оценка молекулярного диаметра составляет около 35,4 Å, что согласуется с параметром решетки, полученным рентгеноструктурным анализом (~24,5 Å), и указывает на интердигитацию алкильных цепей. Высшая занятая молекулярная орбиталь (HOMO) делокализована по всему периленовому ядру – это благоприятствует переносу заряда вдоль колонок. Расчетные значения составляют: HOMO = –5,84 эВ, низшая незанятая молекулярная орбиталь (LUMO) = –3,04 эВ, ширина запрещенной зоны равна 2,79 эВ. Эти данные хорошо коррелируют с электрохимическими значениями (HOMO = –5,83 эВ, LUMO = –3,38 эВ) и оптической шириной зоны 2,45 эВ, что подтверждает адекватность расчетной модели (рис. 8) [18].

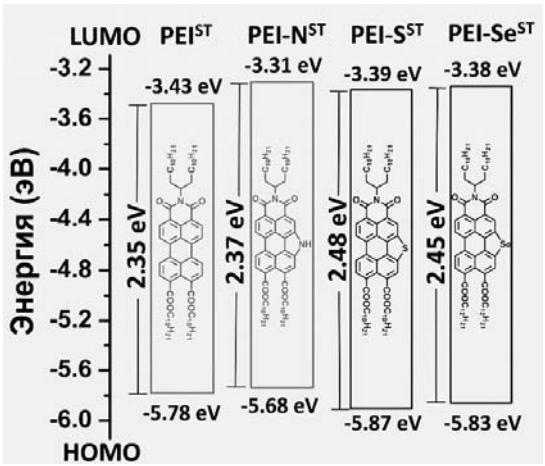
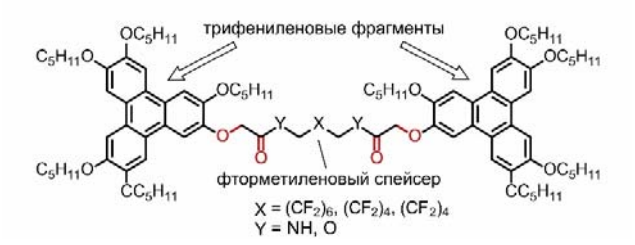


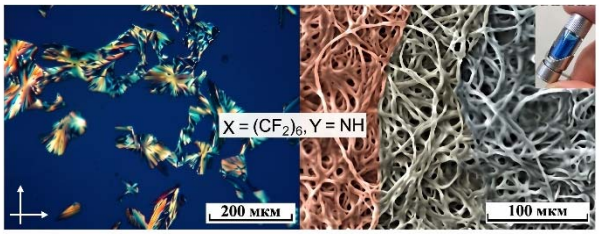
Рис. 8. Диаграммы уровней энергии, показывающие сравнение уровней HOMO и LUMO замещенных перилендиэтеримидов и их аналогов с гетероатомным кольцом по данным циклической вольтамперометрии

Fig. 8. Energy level diagrams comparing the HOMO and LUMO levels of substituted perylene diesterimides and their heteroatom-annulated analogues, as determined by cyclic voltammetry

Экспериментально определенное расстояние π-π-стэкинга (~3,49 Å) в упорядоченных колоннах PEI-SeST служит ключевым параметром для выбора модели переноса заряда. Столь малое расстояние позволяет применять модели прыжкового транспорта и квантово-механического туннелирования для оценки подвижности носителей заряда вдоль колонок. Аналогичные исследования проводимости ДЖК на основе производных порфирина показывают, что в таких системах реализуется топологически защищенный перенос экситонов [14]. Серьезным практическим ограничением нематических мезофаз ДЖК остается их сравнительно узкий температурный диапазон. У большинства известных производных трифенилена, труксена и нафталена нематическая фаза существует в диапазоне 50–100 °C и, как правило, при высоких температурах, тогда как для практических применений необходимы вещества с мезофазой вблизи комнатной температуры [4].



a



b

Рис. 9. a – Структурная формула ДЖК-димера на основе трифениленовых фрагментов, соединенных фторметиленовым спейсером; *b* – текстура, наблюдаемая в поляризационном микроскопе (слева), СЭМ изображение (справа).

Fig. 9. a – Structural formula of a discotic liquid crystal dimer consisting of triphenylene fragments connected by fluoromethylene spacer. *b* – texture in polarization microscope (left), SEM image (right).

В последние годы в литературе описаны ДЖК с нематической фазой, существующей при комнатной температуре, на основе ядра гептазина [19] и 1,3,4-оксадиазола [20]. Особо перспективным выглядит недавно синтезированный трифениленовый димер с фторметиленовым спейсером (рис. 9) [21]. Дополнительной стратегией снижения вязкости и рабочего напряжения у таких соединений является введение полярных групп непосредственно в молекулярный остов.

Применение в фотовольтаических устройствах

Фотовольтаические применения ДЖК сегодня являются, пожалуй, наиболее активно исследуемой областью. Сравнительный обзор эффективности применения ДЖК в качестве материалов органических солнечных элементов представлен в работе [22]. Наивысший показатель эффективности преобразования энергии среди органических фотовольтаических устройств с колончатой надмолекулярной структурой получен для донорного нематического ДЖК на основе бензодитиофен тертиофен роданина (benzodithiophene terthiophene rhodanine) – 9,3 % при квантовой эффективности 77 %. Прогнозируется, что этот показатель может превысить 10 %, что существенно для коммерческого использования.

Для ДЖК на основе производных трифенилена получена эффективность преобразования энергии, равная 8 %, для производных порфирина – 4,1 %, фталоцианина – 4,7 %, а для гексаперигексабензокоронена – 2 %. Увеличению эффективности способствует введение буферного слоя оксида молибдена (MoO_3) для дырочного транспорта между положительным электродом и активным слоем. Перспективными считаются также солнечные элементы, сенсибилизированные красителем (СЭСК): использование в таком элементе смеси красителя и ДЖК вместо однокомпонентной пленки красителя повышает эффективность преобразования с 7,3 до 8 %.

Примечательны результаты применения наночастиц (НЧ) для улучшения фотовольтаических характеристик ДЖК-систем. Введение наночастиц оксида цинка и термический отжиг повышают упорядоченность структуры ДЖК и, соответственно, эффективность солнечного элемента [23]. Механизм этого эффекта связан с тем, что ДЖК-лиганды малых органических молекул обеспечивают ковалентное связывание и улучшают совместимость между частицами оксида цинка и полимерной матрицей, что повышает фотоиндуцированное разделение и перенос зарядов на гетеропереходе.

Особо следует отметить, что при диспергировании функционализированных наноматериалов – наночастиц золота, углерода или квантовых точек – в матрице ДЖК проводимость возрастает на шесть порядков при концентрации наночастиц всего 1 %, тогда как подвижность носителей заряда при этом слабо зависит от их концентрации (рис. 10) [14, 24, 25].

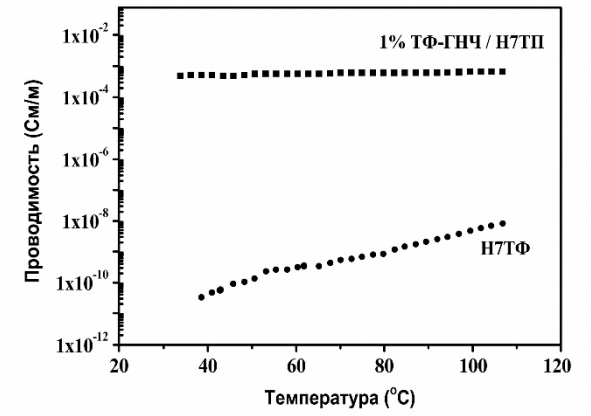


Рис. 10. Температурное изменение проводимости на постоянном токе производного трифенилена (Н7ТР) (нижняя кривая) и смеси Н7ТР с 1 мас. % наночастиц золота, связанных с трифениленом (верхняя кривая)

Fig. 10. Temperature dependence of conductivity of discotic triphenylene derivative H7TP (lower curve); and mixture of H7TP with 1 wt. % of triphenylene-capped gold nanoparticles (upper curve)

Значительное повышение эффективности преобразования мощности (выше 8 %) зафиксировано при использовании производных фуллерена в качестве акцептора электронов [26, 27]. В безйодном варианте СЭСК, где ДЖК применяется в роли электролита, удалось достичь эффективности преобразования 10 % [28]. С практической точки зрения необходимо отметить ряд преимуществ органических фотовольтаических элементов перед кремниевыми аналогами. Прежде всего, производство органических пленок не требует использования аммиака, применяемого при изготовлении кремниевых устройств, что делает технологический процесс экологически более чистым. Кроме того, органические элементы на основе ДЖК способны работать в условиях рассеянного солнечного излучения и в более широком температурном диапазоне: от –50 до +110 °С (у кремниевых аналогов: от –40 до +90 °С), что существенно расширяет возможности их установки и применения. При обеспечении воспроизводимости структуры и свойств тонкопленочного слоя ожидаемый срок службы может составить 20–30 лет, что сравнимо с показателями кремниевых устройств (30–40 лет). Наконец, гибкость органических пленок позволяет реализовывать фотовольтаические элементы произвольной формы, нанесенные на поверхности различной кривизны.

Датчики и другие направления применения

Датчики различных физических и химических сигналов составляют важное и относительно мало освоенное направление применения ДЖК. Высокочувствительные органические тонкопленочные транзисторы (OTFT) на основе материалов с дискотической молекулярной архитектурой используются для анализа газов, регистрации биопотенциалов, давления и оптических сигналов (рис. 11) [29].

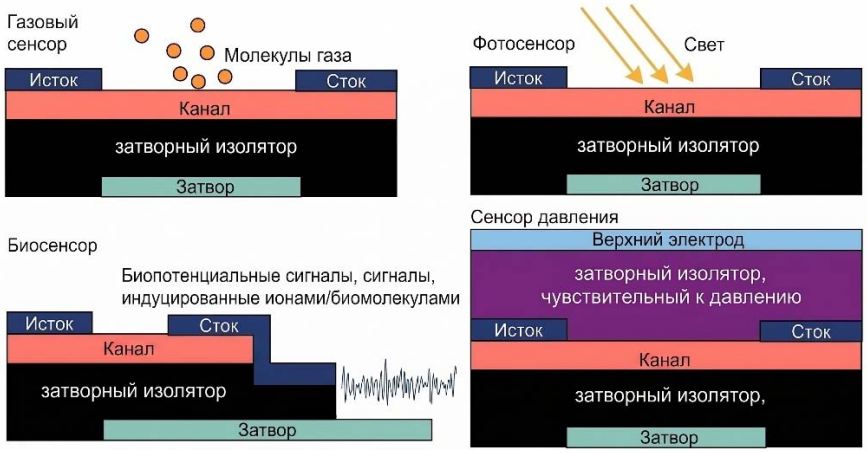


Рис. 11. Использование органических тонкопленочных транзисторов (OTFT) в датчиках сигналов различного типа

Fig. 11. Application of organic thin-film transistors (OTFTs) in sensors for signals of various types

В [30] продемонстрирован датчик рентгеновского излучения, фоточувствительный слой которого образован смесью фталоцианина меди с фуллереном ($CuPc:C_{60}$) – системой, структурно родственной дискотическим жидкокристаллическим материалам.

Помимо электронных устройств, ДЖК находят применение в создании систем для адресной доставки лекарств [31], в трибологии (в качестве смазочных материалов) [32], а также в конструировании самосборных гелей с регулируемой морфологией [33, 34]. Так, описан метод формирования волоконных структур из молекул ДЖК, на основе которых далее формируются гели различного функционального назначения [34]. ДЖК на основе фталоцианина также проявили способность к ингибированию коррозии мягкой стали [8], что открывает перспективы их использования в защитных покрытиях. Наконец, смеси каламитных и дискотических жидких кристаллов образуют системы со своеобразными фазовыми диаграммами: по мере увеличения содержания ДЖК в такой смеси уменьшаются оптическая и диэлектрическая анизотропия, коэффициенты ориентационной упругости и возрастает вращательная вязкость (рис. 12) [35], что важно учитывать при создании многокомпонентных мезогенных составов.

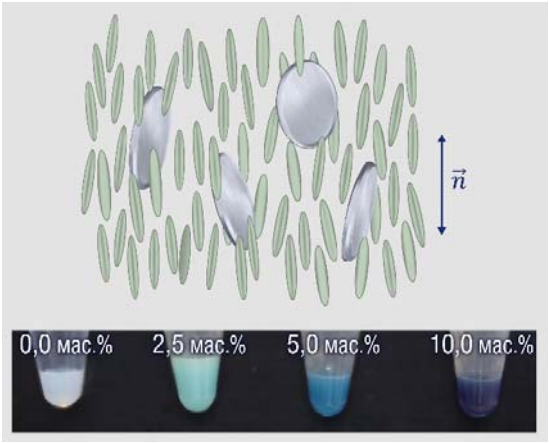


Рис. 12. Система, состоящая из традиционных каламитных и дискотических мезогенов

Fig. 12. A system comprising conventional calamitic and discotic mesogens

Заключение

Дискотические жидкие кристаллы представляют собой уникальный класс органических материалов, сочетающих упорядоченность, характерную для твердых кристаллов, с мобильностью и технологичностью жидкокристаллического состояния. Совокупность рассмотренных свойств – отрицательное двулучепреломление нематических фаз, колоссальная анизотропия проводимости колончатых фаз, богатый потенциал молекулярного дизайна – определяет их конкурентоспособность в сравнении с другими классами органических полупроводников.

К числу наиболее перспективных направлений относятся: применение ДЖК в компенсирующих и фотоориентирующих пленках для расширения углов обзора жидкокристаллических дисплеев, использование в органических полевых транзисторах (OTFT/TFT) и фотовольтаических устройствах, а также создание датчиков газов и рентгеновского излучения. Достигнутая эффективность преобразования энергии в органических солнечных элементах на основе ДЖК (до 9,3–10 %), наряду с экологичностью производства, возможностью работы в рассеянном излучении и в расширенном температурном диапазоне (от –50 до +110 °C) открывают реальную перспективу коммерческого применения таких устройств, особенно в гибкой и печатной электронике.

Вместе с тем, целый ряд задач остается нерешенным: необходимо выработать надежные методы ориентации дискотических молекул и колончатых структур в пленках; преодолеть ограничения, накладываемые эффектом Яна – Теллера на подвижность носителей; добиться согласования энергетических уровней ДЖК с другими компонентами фотоэлектрохимических устройств; расширить набор соединений с мезофазой в районе комнатных температур. Учитывая, что на предмет фотовольтаических применений исследовано менее 0,01 % известных жидких кристаллов [22], потенциал систематического поиска в этом направлении представляется исключительно высоким.

Благодарности: работа выполнена по совместному российско-индийскому проекту: грант РНФ № 25-49-01022 «Новые нанокомпозитные материалы с дискотическими жидкими кристаллами и наночастицами для высокоэффективных оптоэлектронных и электрооптических устройств», https://rscf.ru/project/25-49-01022, и проект № DST/IC/RSF/2025/1027 Министерства Науки и Технологии, Правительство Индии.

Acknowledgments: this work was supported by the Indo-Russia Collaborative project: No. 25-49-01022 from the Russian Science Foundation and DST/IC/RSF/2025/1027 from the Department of Science and Technology, Government of India.

Список источников / References

1. Chandrasekhar S., Sadashiva B., Suresh K. Pramana 1977, **7**, 471-480.
2. Subramanyan Chandrasekhar, Liquid Crystals. Cambridge University Press. 2Nd Edition, 1993. ISBN-13 : 978-0470189870.
3. Kumar S. Self-organization of disc-like molecules: chemical aspects. *Chem. Soc. Rev.*, 2006, **35**, 83–109. **DOI**: 10.1039/b506619k.
4. Kumar S. Chemistry of discotic liquid crystals: From monomers to polymers. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2011. **DOI**: 10.1201/b10457.
5. Belyaev V.V. LCDs – modern and future technologies. Part 1. From pixels to flexible subsrates. Electronics: Science, Technology, Business, 2015, **8** (148), 36–47.
6. Belyaev V.V. LCDs. Nowadays and future technologies. Part 2. New technologies and applications of LCDs. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2015, **10** (150), 124–131.
7. Nistor S.V., Stefan M., Nistor L.C., Kuncser V., Ghica D., Vlaicu I.D. Aggregates of Mn2+ Ions in the mesoporous self-assembled cubic ZnS:Mn quantum dots: composition, localization, structure and magnetic properties. *J. Phys. Chem. C*, 2016, **120** (26), 14454–14466. **DOI**: 10.1021/acs.jpcc.6b01786.
8. Aravinda T., Srilatha Rao, Sowmyashree A.S., Ashwathanarayana G., Parashuram L., Kayim Pineda Urbina, Gururaj Kudur Japrakash, Kumar S. A novel phthalocyanine based discotic liquid crystal for efficient corrosion inhibition of mild steel. *Liq. Cryst.*, 2023, **50** (6), 989–997. **DOI**: 10.1080/02678292.2023.2190170.
9. Shoji Y., Kobayashi M., Kosaka A., Haruki R., Kumai R., Adachi S.I., Kajitani T., Fukushima T. Design of discotic liquid crystal enabling complete switching along with memory of homeotropic and homogeneous alignment over a large area. *Chem. Sci.*, 2022, **13** (34), 9891–9901. **DOI**: 10.1039/d2sc03677k.
10. Wu L.-H., Lee W.-C., Hsu C.-S., Wu S.-T. Photo-alignment of liquid crystals using a crosslinked discotic film. *Liq. Cryst.*, 2001, **28** (2), 317–320. **DOI**: 10.1080/02678290010012282.
11. Bronstein H., Nielsen C.B., Schroeder B.C., MacCulloh I. The role of chemical design in the performance of organic semiconductors. *Nat. Rev. Chem.*, 2020, **4**, 66–77. **DOI**: 10.1038/s41570-019-0152-9.
12. Banach M., Wheeler M., Russell A., James A. Organic TFTs for biaxially formed active surfaces. *SID Symposium Digest of Technical Papers,* 2022, **53** (S1), 284–285. **DOI**: 10.1002/sdtp.15922.
13. Guo E., Wu Z., Liu Y., Kleemann H., Leo K. Towards high-performance organic transistors for display and other applications. *SID Symposium Digest of Technical Papers,* 2022, **53** (1), 565–568. **DOI:** 10.1002/sdtp.15550.
14. Yuen-Zhou J., Saikin S.K., Yao N., Aspuru-Guzik A. Topologically protected excitons in porphyrin thin films. *Nat. Mater.,* 2014, **13** (11), 1026–1032. **DOI**: 10.1038/nmat4073.
15. Elnikova L.V. Exciton currents in phthalocyanine metal complexes and their topological properties. *Liq. Cryst. and their Appl.,* 2017, **17** (1), 69–73. **DOI**: 10.18083/LCAppl.2017.1.69.
16. Jahn H.A., Teller E. Stability of polyatomic molecules in degenerate electronic states. I. Orbital degeneracy. *Proceedings of the Royal Society A,* 1937, **161** (905), 220–235. **DOI**: 10.1098/rspa.1937.0142.
17. Sunegin D.E., Belyaev V.V. The Jahn–Teller effect in metallophthalocyanines as a controlling parameter of structural and electronic properties. *Bulletin of the State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 2026, (1), 6–15. **DOI**: 10.18384/2949-5067-2026-1-6-15.
18. Behera P.K., Patra A., Roy M., Ahmed R., Kumar S., Belyaev V., Kazak A., Ren X.-K., Achalkumar A.S. Se-annulated unsymmetrical perylene ester imide exhibiting room-temperature columnar hexagonal mesophases. *Soft Matter,* 2025, 21, 7165–7173. **DOI**: 10.1039/d5sm00667h.
19. Sayed M.S., Deng L.-L., Lin B.-P., Yang H. A room-temperature heptazine core discotic liquid crystal. *Liq. Cryst.,* 2017, **44** (14–15), 2175–2183. **DOI**: 10.1080/02678292.2017.1371343.
20. Han J., Wang Z.-Z., Wu J.-R. Room-temperature fluorescent liquid crystalline dimers based on discotic 1,3,4-oxadiazole. *Liq. Cryst.,* 2018, **45** (7), 1047–1054. **DOI**: 10.1080/02678292.2017.1408863.
21. Yu W.-H., Wang Y.-H., Feng C., Ni H.-L., Hu P., Wang B.-Q., Zhao K.-Q., Fu Q. Room-temperature triphenylene-based discotic liquid crystal dimers: effects of amide linkage and central fluoromethylene spacer. *Liq. Cryst.,* 2023, **50** (4), 713–724. **DOI**: 10.1080/02678292.2023.2168777.
22. Kumar M., Kumar S. Liquid crystals in photovoltaics: A new generation of organic photovoltaics. *Polym. J.*, 2017, **49** (1), 85–111. **DOI**: 10.1038/pj.2016.109.
23. Chen X., Chen L., Chen Y. Self-assembly of discotic liquid crystal decorated zno nanoparticles for efficient hybrid solar cells. *RSC Adv.,* 2014, **4** (7), 3627–3638. **DOI**: 10.1039/c3ra44980g.
24. Gowda A., Kumar S. Recent advances in discotic liquid crystal-assisted nanoparticles. *Materials (Basel),* 2018, **11** (3), 382. **DOI**: 10.3390/ma11030382.

25. Kumar S. Nanoparticles in the supramolecular order of discotic liquid crystals. *ChemInform,* 2014, **45** (19), 353–367. **DOI**: 10.1002/chin.201419284.
26. Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W. Solar cell efficiency tables (Version 37). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications,* 2011, **19** (1), 84–92. **DOI**: 10.1002/pip.1088.
27. Chen L.-M., Hong Z., Li G., Yang Y. Recent progress in polymer solar cells: Manipulation of polymer:fullerene morphology and the formation of efficient inverted polymer solar cells. *Adv. Mater.,* 2009, **21** (14–15), 1434–1449. **DOI**: 10.1002/adma.200802854.
28. Bajpai M., Yadav N., Kumar S., Srivastava R., Dhar R. Incorporation of liquid crystalline triphenylene derivative in bulk heterojunction solar cell with molybdenum oxide as buffer layer for improved efficiency. *Liq. Cryst.,* 2016, **43** (7), 928–936. **DOI**: 10.1080/02678292.2016.1149239.
29. Guo X., Ouyang B., Song Y., Han L. Organic thin-film transistor flexible hybrid integration for low-power ubiquitous sensor systems. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2022, **53** (1), 897–899. **DOI**: 10.1002/sdtp.15638.
30. Kim C., An K., Cho K.H., Kang K.-T. Fabrication of the indirect X-ray detector using organic photodiode. *SID Symposium Digest of Technical Papers,* 2022, **53** (1), 90–93. **DOI**: 10.1002/sdtp.15424.
31. Kailas Anjana A., Abutwaibe K.A., Poornima Bhagavath, Bhattacharjee, Debanjan, Ramalingam, Annamalai, Induha K. O., Thamizharasan Annadurai, & Naha, Anup. Thermotropic liquid crystals for precision drug delivery and diagnostics: Molecular design, characterization, and clinical translation. J App Pharm Sci. 2025. **DOI:** 10.7324/JAPS.2025.255035.
32. Usol'tseva N.V., Smirnova A.I. Liquid Crystals as Lubricants // *Lubricants* 2019, *7*(12), 11. **DOI:** 10.3390/lubricants7120111.
33. Iqbal S., Khan A.A. Supramolecular self-assembly and physical-gel formation in disc-like liquid crystals: a scalable predictive model for gelation and an application in photovoltaics. *RSC Adv.*, 2019; 9 (11): 6335–6345. **DOI:** 10.1039/c8ra09278h.
34. Ain Q.U., Iqbal S., Ali S.A., Saleem M., Rehman H.U., Haq A.U., Khan A.A. Engineering fibre morphology in self-assembled physical gels of a prototypical discotic liquid crystal. *Liq. Cryst.,* 2021, **48** (6), 888–901. **DOI**: 10.1080/02678292.2020.1825840.
35. Venkata Sai D., Mirri G., Musevic I., Dhara S. Experimental studies on the phase diagram and physical properties of mixture of calamitic and discotic nematic liquid crystals. *Liq. Cryst.,* 2016, **43** (12), 1884–1888. **DOI**: 10.1080/02678292.2016.1199818.

***Вклад авторов*:**
Беляев В.В. – концептуализация; рецензирование и редактирование текста статьи.
Авдеенков В.А. – программное обеспечение; обработка данных.
Казак А.В. – методология.
Ачалкумар А.С. – проведение исследований.
Кумар С. – проведение исследований.
Пасынков А.А. – обработка данных; визуализация.

Contribution of the authors:
Belyaev V.V. – conceptualization; writing – review and editing.
Avdeenkov V.A. – software; data curation.
Kazak A.V. – methodology.
Achalkumar A.S. – investigation.
Kumar S. – investigation.
Pasynkov A.A. – data curation; visualization.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

ORCIDs:
Беляев В.В. – 0000-0003-0553-9358
Авдеенков В.А. –0000-0002-4050-0910
Казак А.В. – 0000-0002-3504-7998
Ачалкумар А.С. – 0000-0003-4952-9450
Кумар С. – 0000-0003-4789-5158
Пасынков А.А. – 0009-0001-8581-8009

ORCIDs:
Belyaev V.V. – 0000-0003-0553-9358
Avdeenkov V.A. – 0000-0002-4050-0910
Kazak A.V. – 0000-0002-3504-7998
Achalkumar A.S. – 0000-0003-4952-9450
Kumar S. – 0000-0003-4789-5158
Pasynkov A.A. – 0009-0001-8581-8009