

УДК 544.25; 538.9

Д. Н. Чаусов, А. Д. Курилов, В. В. Беляев

## ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ НАНОКОМПОЗИТЫ, ЛЕГИРОВАННЫЕ НАНОЧАСТИЦАМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Московский государственный областной университет,  
ул. Веры Волошиной, д. 24, 141014 Мытищи, Россия.  
E-mail: ad.kurilov@gmail.com

*Редкоземельные элементы обладают уникальными электронными свойствами, что делает наноматериалы на их основе крайне перспективными в области преобразования энергии, биомедицины, отображения и обработки информации. Внедрение таких материалов в жидкокристаллическую матрицу открывает возможности для настройки их физико-химических свойств посредством воздействия внешними электрическими и магнитными полями. Этого можно достичь средствами как супрамолекулярной, так и коллоидной химии. Получаемые таким образом системы часто бывают схожи и называются самоорганизующимися наносистемами. Данный обзор посвящен последним достижениям в разработке таких систем и обнаруженным синергетическим эффектам. Обзор разделен на две части: в первой описываются последние достижения в синтезе и потенциальные приложения лантанидсодержащих жидких кристаллов, а во второй – влияние наноразмерных частиц редкоземельных элементов на функциональные особенности жидких кристаллов и их отличия от дисперсий других неорганических наночастиц. Особое внимание уделяется использованию этих жидкокристаллических систем для компонентной базы электроники.*

**Ключевые слова:** жидкие кристаллы, нанокomпозиты, редкоземельные элементы, электронные компоненты.

DOI: 10.18083/LCAppl.2020.2.6

D. N. Chausov, A. D. Kurilov, V. V. Belyaev

## LIQUID CRYSTAL NANOCOMPOSITES DOPED WITH RARE EARTH ELEMENTS

Moscow Region State University, 24 Very Voloshinoy St., Mytishchi, 141014, Russia  
E-mail: ad.kurilov@gmail.com

*Rare-earth elements have unique electronic properties. Therefore, rare-earth-based nanomaterials are extremely promising in the field of energy conversion, biomedicine and display devices. Incorporation of such materials into a liquid crystal matrix opens up opportunities for tuning their physicochemical properties by applying external electric and magnetic fields. This can be achieved using both supramolecular and colloidal chemistry. The systems obtained in these ways are often similar. They are called self-organizing nanosystems. This review focuses on the latest advances in the development of such systems and the discovered synergistic effects. The review consists of two parts: the first describes recent advances in synthesis and potential applications of lanthanide-containing liquid crystals, and the second describes the effect of nanoscale rare-earth particles on the functional features of liquid crystals and their differences from dispersions of other inorganic nanoparticles. Particular attention is paid to the use of these liquid crystal systems for the component base of electronics.*

**Key words:** liquid crystals, nanocomposites, rare-earth elements, electronic components.

## Введение

Жидкие кристаллы (ЖК) представляют собой интеллектуальные материалы, имеющие многочисленные применения в дисплеях, модуляторах, датчиках и солнечных элементах. Несмотря на их долгую историю, исследования ЖК до сих пор не исчерпаны благодаря уникальным электрооптическим эффектам, способности молекул к самосборке в надмолекулярные структуры и легкой переориентации внешними полями [1–6]. В последнее время обнаруживаются новые эффекты, разрабатываются современные и самоорганизующиеся материалы, предлагается целый ряд недисплейных приложений, находящихся на границе между нанотехнологиями и мягким конденсированным веществом [7–12].

Допирование ЖК наночастицами (НЧ) является важной стратегией для управления их свойствами, поскольку полученные нанокомпозиаты (НК) могут демонстрировать значительно отличающиеся и улучшенные характеристики в сравнении с чистыми ЖК-аналогами [13–18]. Известно, что внедрение НЧ в ЖК-матрицу приводит к снижению порогового напряжения и уменьшению времени отклика электрооптических устройств без существенного влияния на их прозрачность [19–23].

Изменение свойств ЖК зависит от типа, размера и формы НЧ, используемых при допировании. Диэлектрические свойства коллоидных систем ЖК с НЧ разных форм и размеров (модели Рэлея, Максвелла – Гарнетта – Вагнера, Фрике) описаны в учебном курсе В. Хаазе [24, 25]. Там же приводится механизм поляризации НЧ, окруженных молекулами ЖК (модель Шварца). Конечному НК можно придать специфические функциональные особенности. Например, пара- и ферромагнитные НЧ, добавленные в нематические ЖК, являются многообещающими кандидатами для магнитно-перестраиваемых структур [26–29]. Добавление металлических и полупроводниковых НЧ субволновых размеров открывает возможности управлять показателем преломления и диэлектрической проницаемостью НК, достигая отрицательных значений [9, 30, 31]. Описаны и исследованы дисперсии ЖК с использованием одностенных и многостенных углеродных нанотрубок для электрически и магнитно-адресуемых молекулярных переключателей [32–34]. Другими популярными включениями являются НЧ золота [35, 36], сегне-

тоэлектрические частицы [37, 38], различные неорганические наностержни [39], фуллерены [40], наноразмерные пластины графена [41, 42].

Особого внимания заслуживают НЧ, легированные редкоземельными элементами (РЗЭ) [43–45]. Их интенсивно изучают для возможных биомедицинских приложений, фотодинамической терапии, освещения и безопасности. Большой интерес такие НЧ представляют в области оптических квантовых технологий, в особенности при квантовой обработке информации и коммуникации. Введение редкоземельных наночастиц в ЖК основу в качестве усовершенствованного сенситизатора позволяет реализовать обратимый контроль над отражением ЖК-элемента, изменять структуру ЖК-матрицы и придавать ей новые функциональные свойства.

К настоящему времени накопилось множество экспериментальных данных по ЖК-композитам с различными НЧ. Вместе с тем наблюдается огромное количество противоречий и, по-видимому, нет единого мнения даже в отношении базовых характеристик, таких как влияние НЧ на температуры фазовых переходов. Таким образом, несмотря на большое количество экспериментальных наблюдений, теоретическое понимание того, как изменение даже самых простых и общих характеристик НЧ влияет на свойства ЖК, все еще недоступно. Одна из основных трудностей в рационализации разнообразия экспериментов заключается в большом количестве переменных, действующих одновременно. Кроме того, другие факторы, такие как полидисперсность, концентрация и присутствие ионов [46, 47], по-видимому, имеют большое значение при изучении взаимодействий ЖК с НЧ.

К тематике нанокомпозиатов тесно примыкают металломезогены, структурные единицы которых представляют комплексы органических соединений с внедренными в них атомами металлов. Благодаря этому функциональность ЖК значительно расширяется. Металломезогены, супрамолекулярные системы и суспензии наночастиц в ЖК можно рассматривать как единую систему с разными размерами структурных единиц и их упорядоченностью.

Таким образом, становится ясно, что область наноматериалов, включающая в себя эти системы, продолжает расти и привлекать интерес научного общества, оставляя при этом множество нерешенных вопросов.

Данный обзор посвящен последним достижениям в разработке НК с ЖК матрицей на основе НЧ, легированных РЗЭ, а также лантанидомезогенам и обнаруженным синергетическим эффектам, позволяющим создавать электрооптические и управляемые магнитным полем устройства нового поколения, а также МЭМС-устройства аккумуляции энергии (*energy harvesting*) [48]. Обзор разделен на две части: в первой описываются последние достижения в синтезе и потенциальные приложения лантанидсодержащих ЖК (лантанидомезогенов), а во второй – влияние наноразмерных частиц РЗЭ на функциональные особенности ЖК и их отличия от дисперсий других неорганических НЧ.

### Мезогенные комплексы лантаноидов

Лантаноиды имеют атомные номера с 57 по 71, а их электронная структура соответствует заполнению 4f орбитали. Уникальная электронная структура придает особые химические и физические свойства атомам лантаноидов, ионам и их соединениям. С химической точки зрения лантаноиды могут поддерживать высокие координационные числа (от 6 до 12), то есть можно создавать соединения с относительно большим числом лигандов, что дает большой простор в химическом синтезе. Особые физические свойства лантаноидов выражены в близко расположенных электронных состояниях и интересных люминесцентных свойствах. Кроме этого, данные материалы могут обладать необычными магнитными свойствами. Это делает лантаноиды потенциально перспективными материалами для развития молекулярной электроники и их использования в органических светодиодах, органических лазерах, оптических усилителях и в биомедицинском анализе [49–57].

В последнее время активно исследуются и широко применяются лантанидсодержащие ЖК на основе редкоземельных ионов [58–61]. Первые такие материалы были получены Ю. Г. Галяметдиновым в 1991 г. [62]. За свои пионерские исследования и разработки в 2012 г. он был награжден медалью им. В. К. Фредерикса, учрежденную жидкокристаллическим обществом «Содружество».

Существуют два подхода в создании лантанидомезогенов: химический и физический. В ходе первого реализуется комплексообразование между ионами редкоземельных элементов и жидкокристаллическими лигандами [63–66]. Второй подход предполагает непосредственное смешивание и

растворение редкоземельных элементов в матрице ЖК. Для интенсивной флуоресценции, как правило, достаточно небольшой концентрации редкоземельных элементов (0,1 % массовой доли и менее). Несмотря на сложности введения ионов лантаноидов в термотропные ЖК, подобные системы обладают рядом уникальных свойств. Многие элементы лантаноидной серии демонстрируют сильную люминесценцию [67–69] и необычные магнитные свойства, в частности, высокую магнитную анизотропию (на два-три порядка выше, чем у других парамагнитных ЖК) [70]. Интересным является то, что в зависимости от лантаноидного элемента знак магнитной анизотропии может быть как положительным, так и отрицательным [71]. Благодаря сочетанию жидкокристаллических свойств данных комплексов и высокой анизотропии магнитной восприимчивости могут быть получены однодоменные среды с эффективной поляризованной люминесценцией [72]. Источником высокой анизотропии является сильная спин-орбитальная связь, проявляемая 4f электронами лантаноидов. Важными преимуществами люминесценции лантаноидов являются узкие эмиссионные линии (высокая чистота цветов) [73] и легкое управление длиной волны излучения от ультрафиолетовой до инфракрасной областей в зависимости от выбора иона лантаноида [74]. Теоретически такие системы могут достигать 100 % квантовой эффективности [75].

Д. В. Лапаев и его коллеги показали, что мезогенные комплексы европия  $\text{Eu}^{3+}$  проявляют высокую фотостабильность и интенсивную люминесценцию за счет межклеточных и внутримолекулярных переносов электронов, строго связанных со своеобразной формой и морфологией этих материалов [75, 76].

В работе [58] получена практически полная серия аддуктов  $\beta$ -дикетонатов лантаноидов  $\text{Ln}^{3+}$  с 5,5'-дигептадецил-2,2'-бипиридином ( $\text{bpy}_{17-17}$ ), проявляющих стабильную смектическую фазу ( $\text{SmA}$  или  $\text{SmB}$ ) в широком диапазоне температур от 140 °C до 220 °C. С понижением температуры до комнатной образцы переходят в аморфное состояние с сохранением супрамолекулярного порядка. Ионы неодима  $\text{Nd}^{3+}$ , самария  $\text{Sm}^{3+}$ , европия  $\text{Eu}^{3+}$  и иттербия  $\text{Yb}^{3+}$  были выбраны, исходя из диаграммы Яблонского, представленной на рис. 1 [77], и обеспечивали эффективную люминесценцию в красной, зеленой и ближней инфракрасной областях.

Мезоморфизм полученных комплексов лантаноидов, наряду с их оптическими свойствами, позволил продемонстрировать возможность регулирования интенсивности и частоты поляризованной люминесценции за счет изменения молекулярной ориентации и типа иона.

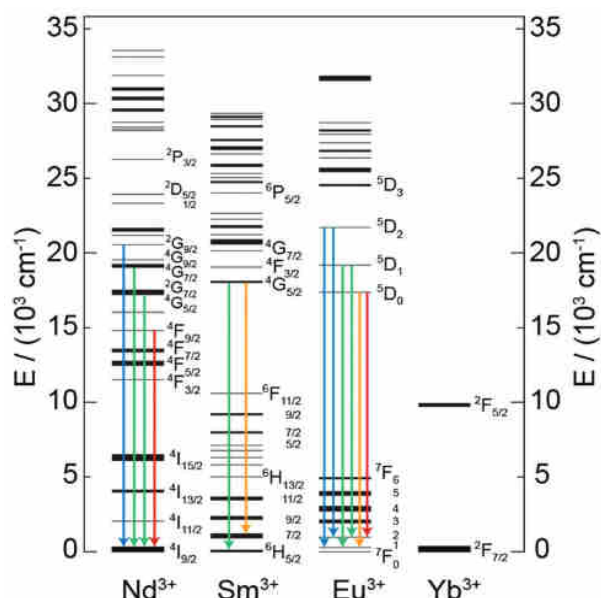


Рис. 1. Диаграмма Яблонского некоторых лантаноидов [77]

Fig. 1. Jablonski diagram of some lanthanides [77]

В более ранних работах впервые были получены лантанидомезогены на основе неионных поверхностно-активных веществ [78]. Н. М. Селивановой и соавторами исследованы процессы самоорганизации в растворах и мезофазах [79–81]. Показано, что эффективность люминесценции зависит от ориентации ЖК. Обнаружено 7-кратное увеличение люминесценции при переходе от неориентированных систем к ориентированным [79]. Дальнейшие исследования ряда факторов, таких как лигандная среда, тип ионов и метод супрамолекулярной организации на эффективность люминесценции лиотропных систем на основе лантаноидов представлены в [82]. Впервые сообщалось, что в комплексах европия  $\text{Eu}^{3+}$  значительный вклад вносит тип супрамолекулярной организации мезофазы: в гексагональной фазе эффективность люминесценции повышается в 2 раза по сравнению с ламеллярной мезофазой. Проведено комплексное исследование тепловых свойств и структурных

параметров лиотропных систем на основе неионного поверхностно-активного вещества (эфира тетраэтиленгликоля  $\text{C}_{12}\text{EO}_4$ ), нитрата лантана и воды [83]. Найдена корреляция между молекулярной структурой амфифильных молекул и супрамолекулярной организацией. Уменьшение содержания воды в системе  $\text{C}_{12}\text{EO}_4/\text{La}^{3+}/\text{H}_2\text{O}$  вызывает изменение молекулярного расположения. Согласно квантово-химическим расчетам и данным рентгеновской дифракции предложены модели упаковки ламеллярной мезофазы. Другая система лантанид-содержащих ЖК на основе оксиэтилированных групп, но с добавлением холестерина фрагмента, изучалась в сравнении с полученными ранее результатами [84]. Жесткий гидрофобный фрагмент оказывает сильное влияние на лиотропный мезоморфизм в водных средах. Присутствие иона лантаноида приводит к существенному увеличению температурного диапазона мезофазы. Новые мезогенные комплексы с ионами тербия  $\text{Tb}^{3+}$  и европия  $\text{Eu}^{3+}$  демонстрируют более длительное время жизни возбужденного состояния по сравнению с алифатическим эквивалентом. Полученные системы обладают достаточными люминесцентными характеристиками для их выделения в качестве перспективных кандидатов для биосовместимых молекулярных систем доставки с возможностью спектрального мониторинга.

Новый подход к изготовлению композитов холестерических жидких кристаллов (ХЖК) с редкоземельными элементами путем растворения и сборки РЗЭ в матрице ХЖК реализован в [59]. Продemonстрирована двухмодовая оптическая модуляция селективного отражения и фотолюминесценции полученных композитов, работающая при низких напряжениях ( $\sim 10$  В) и с временами отклика не более 3 мс.

Возможность получения композитов  $\text{Yb}(\text{NO}_3)_3$  в бис(2-этилгексил)сульфосукцинате натрия описана в [85, 86]. Малоугловое рентгеновское рассеяние показало, что  $\text{Yb}(\text{NO}_3)_3$  однородно распределен растворителе в виде очень малых ионных кластеров (обратных мицелл) размером 2–3 нм, заключенных в типичные для лиотропных ЖК гексагональные домены. В результате межфазных эффектов ионные кластеры проявляют фотофизические свойства, отличные от тех, что наблюдаются в объемном состоянии или в отдельных компонентах системы.

В водном растворе ундекана с триацетатом гадолиния обнаружено формирование мицеллярной структуры [87]. Пластинчатые мицеллы триацетата гадолиния толщиной 0,4 нм и поперечным размером 14 нм определяют ферромагнитное поведение системы, что открывает возможность манипулирования макросвойствами такой среды [61].

Легирование ионных ЖК различными галогенидами лантаноидов позволяет получать новые жидкокристаллические материалы с интересными люминесцентными свойствами [88–90]. Наиболее примечательно в таких материалах то, что цвет излучения для ЖК, легированных  $\text{TbBr}_3$  и  $\text{DyBr}_3$ , может быть настроен в диапазоне от голубовато-белого до зеленого (для  $\text{TbBr}_3$ ) и оранжево-желтого (для  $\text{DyBr}_3$ ) в зависимости от длины волны возбуждающего света [88]. Исследуемые материалы показывают сильную зеленую люминесценцию от уровня  $^5\text{D}_4$  при возбуждении перехода  $4\text{f}^8 \rightarrow 4\text{f}^7 5\text{d}^1$  в  $\text{Tb}^{3+}$  [90].

В литературе описано не так много примеров лантанидомезогенов на основе порфиринов [91–97]. Кроме того, большая часть исследований в области люминесцентных комплексов лантаноидов посвящена соединениям  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Sm}^{3+}$ . В работе [98] синтезирован ряд комплексов порфиринов гольмия и всесторонне изучены электрохимические, полупроводниковые и люминесцентные свойства этих соединений. Полученные комплексы являются дискотическими мезогенами, формирующими гексагональную колончатую фазу  $\text{Col}_h$ . Циклическая вольтамперометрия показывает, что в этих соединениях проявляются две одноэлектронные обратимые окислительно-восстановительные реакции. Квантовый выход таких систем находится в диапазоне 0,0045–0,21 при комнатной температуре.

### **Жидкокристаллические композиты с редкоземельными наночастицами**

За последние два десятилетия многочисленные работы по модифицированию композитов ЖК наноразмерными включениями показали, что для улучшения их физико-химических и эксплуатационных свойств предъявляются существенные требования к включаемым наноматериалам. Такие частицы должны быть слабопроводящими и сохранять прозрачность жидкокристаллической системы. Особый интерес в данном случае представляют наночастицы оксидов редкоземельных элементов, обладающие высоким показателем пре-

ломления, большой диэлектрической проницаемостью и прозрачностью в видимом диапазоне.

Возможность модифицирования функциональных свойств жидкокристаллических полимерных композитов путем добавления наночастиц  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ce}:\text{Y}_2\text{O}_3$  и  $\text{Nd}_2:\text{Y}_2\text{O}_3$  показана в [99–101]. В зависимости от химического состава инкорпорированных НЧ, их концентрации и условий получения можно изменить не только электрооптические характеристики композитов, но и физико-химические свойства конечного материала, морфологию и ориентацию ЖК в полимерной матрице. Присутствие оксидов РЗЭ уменьшило управляющее напряжение (для систем с оксидом иттрия в 1,5 раза), необходимое для переориентации молекул ЖК, а в случае композитов, содержащих НЧ оксида иттрия, легированного  $\text{CeO}_2$ , увеличивалась также и контрастность. Полученные композиты обладают высокими значениями показателя преломления, диэлектрической проницаемости и термостабильностью, не изменяют своих свойств при длительном хранении. Наблюдаемые изменения в жидкокристаллических композитах связаны с тем, что НЧ лантаноида увеличили диэлектрическую проницаемость и показатель преломления системы [102]. Этот эффект вызвал уменьшение управляющего напряжения и улучшение контраста при приложении электрического импульса. Авторами проведены дальнейшие исследования влияния оксидов РЗЭ на свойства композитов ЖК с более сложной супрамолекулярной структурой [103, 104]. Были получены голографические дифракционные и поляризационные решетки, сформированные в жидкокристаллическом композите, допированном НЧ редкоземельных оксидов. Допирование НЧ оксида иттрия приводит к уменьшению дифракционной эффективности голографических дифракционных решеток, дифракционная эффективность поляризационных дифракционных решеток, напротив, возрастает.

Значительное улучшение электрооптических свойств нематических жидких кристаллов (НЖК) при допировании их малыми концентрациями НЧ оксида иттрия  $\text{Y}_2\text{O}_3$  было обнаружено и другими авторами [105]. Время отклика было уменьшено почти на 53 %, а пороговое напряжение с 4,2 В до 2,6 В. Предполагается, что улучшение электрооптических характеристик жидкокристаллического композита достигается за счет уменьшения эффекта экранирования поля примесными ионами путем их адсорбции НЧ [106].

Влияние ряда НЧ оксидов РЗЭ ( $Gd_2O_3$ ,  $Dy_2O_3$ ,  $Nd_2O_3$ ,  $Y_2O_3$  и  $Sm_2O_3$ ) на магнитооптические свойства жидких кристаллов исследовано в [107]. Все образцы, за исключением легированного НЧ  $Sm_2O_3$ , претерпевают структурные деформации при приложении внешнего магнитного поля параллельно поверхности ячейки ввиду различного сцепления молекул ЖК с поверхностью НЧ. Присутствие НЧ  $Sm_2O_3$  в ЖК не вызывает структурной деформации жидкокристаллической матрицы, поскольку директор параллелен магнитному моменту в данной системе. Для композитов на основе  $Nd_2O_3$  директор наклонен к магнитному моменту, а для систем с НЧ  $Gd_2O_3$ ,  $Dy_2O_3$  и  $Y_2O_3$  – перпендикулярен ему.

Оксид церия примечателен своими физико-химическими свойствами: высокой электропроводностью [108], термостабильностью [109] и коэффициентом диффузии и широко применяется для создания катализаторов, огнеупорных и абразивных материалов. Так, легирование НЧ церия  $CeO_2$  позволяет значительно повысить термическую стабильность и электрооптические свойства нематических жидкокристаллических систем без агрегации и снижения коэффициента пропускания [110]. В частности, пороговое напряжение уменьшилось с 3,03 до 2,28 В, а время отклика с 13,1 до 10,0 мс.

Для дисперсии классического жидкого кристалла 5ЦБ (5CB) и немагнитных НЧ оксида церия установлена особенность пороговой напряженности магнитного поля при переходе Фредерикса. Обнаружено, что наносферы  $CeO_2$  значительно снижают пороговое значение магнитного поля, что связано с уменьшением эффективных упругих констант ЖК [111]. Две различные зоны на концентрационной зависимости магнитного порога Фредерикса показывают, что изолированные НЧ (ниже 0,05 массовой доли) более эффективны в снижении порогового значения магнитного поля, чем агрегированные.

Спектральные и анкерные характеристики дисперсий наночастиц чистых редкоземельных металлов (церий Ce, празеодим Pr и самарий Sm) изучены Н. В. Каманиной [112]. Структурирование жидкокристаллической матрицы наночастицами редкоземельных металлов приводит к батохромному спектральному сдвигу и формированию двумерной сети, что схоже с полученными ранее ре-

зультатами для дисперсий ЖК с фуллеренами, квантовыми точками, ДНК и другими нано- и биочастицами [113].

Жидкокристаллические материалы с голубой фазой в ближайшее время могут стать основой для дисплеев следующего поколения и приложений фотоники за счет их привлекательных характеристик [114–117]. Для их равномерной ориентации не требуется применения специальных ориентирующих слоев, а их отклик лежит в диапазоне микросекундных значений [118]. Несмотря на активные исследования в этой области, главными препятствиями для их широкого применения являются узкий диапазон рабочих температур и высокое рабочее напряжение в несколько десятков вольт [119, 120]. Однако недавно сообщалось, что низкие управляющие напряжения могут быть достигнуты путем допирования ЖК НЧ фторида лантана  $LaF_3$ . Вместе со стабилизацией голубой фазы полимером это позволяет расширить диапазон ее существования более чем на 90 °С и снизить рабочее напряжение на 41 % [121].

Совсем недавно ферронематические ЖК (ферронематики, ФН) были получены в виде суспензий магнитных нанопластин гексаферрита бария, легированного скандием,  $BaSc_xFe_{12-x}O_{19}$  в НЖК, а их макроскопические и ориентационные свойства подробно описаны в [122–126]. Такая система описывается двумя параметрами ориентационного порядка, поэтому число мод ориентационных флуктуаций удваивается, что подтвердилось экспериментально [127, 128]. Как следствие, оптический и магнитный отклики в данных материалах связаны, что делает их особенно интересными в качестве мультиферроиков. Оптическими свойствами можно манипулировать с помощью слабого внешнего магнитного поля (сильный магнитооптический эффект) и, напротив, спонтанная намагниченность может быть переориентирована внешним электрическим полем (обратный магнитоэлектрический эффект). Схематическое представление такой системы показано на рис. 2 [123]. Сравнительный анализ зависимости генерации второй гармоники от приложенного напряжения и внешнего магнитного поля такой системы проведен в [129]. Полученный ФН может быть использован для визуализации магнитных полей и позволяет измерять одновременно величину и направление внешнего магнитного поля [130].

Позже сообщалось о генерации моды шепчущей галереи (МШГ) микрокаплями ФН с частицами  $\text{BaSc}_x\text{Fe}_{12-x}\text{O}_{19}$  и флуоресцентным красителем, диспергированными в глицерин-лецитиновой матрице [131]. Капли ФН имеют радиальную структуру директора и демонстрируют упругое искажение в очень слабых магнитных полях. Таким образом, МШГ, генерируемая флуоресцентным красителем, может быть настроена внешним магнитным полем. Настройка режимов генерации МШГ является линейно-зависимой от магнитного поля с коэффициентом сдвига волны порядка 1 нм/100 мТл. Такие

микрорезонаторы обладают чрезвычайно высокой плотностью мощности, добротностью и очень узкой шириной спектральной линии [132, 133], что в сумме предоставляет возможность делать на их основе сверхчувствительные датчики [134]. Чувствительность представленных ферронематических капель ограничена шириной линии испускаемого лазерного излучения, которая составляет около 0,1 нм. Поэтому магнитные поля порядка 10 мТл возможно обнаружить, измеряя вызванные магнитным полем сдвиги линий излучения МШГ.

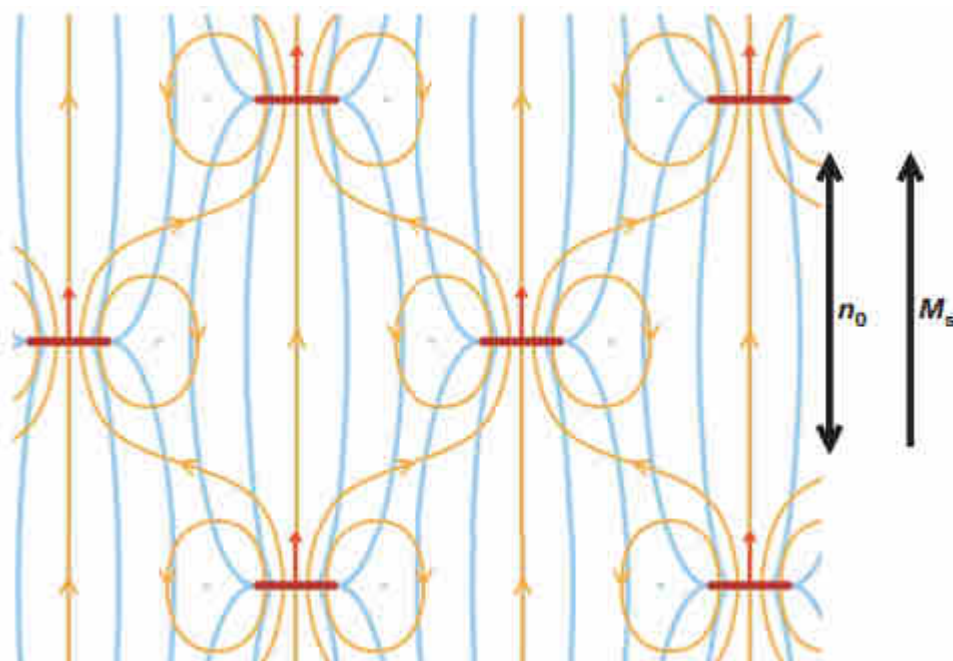


Рис. 2. Схема искажения поля директора (синий) и магнитного поля (оранжевый) вокруг нанопластин. Синие точки показывают поперечные сечения линий дискликации, а красные – стрелки направления магнитных моментов [123]

Fig. 2. Distortion scheme of the director (blue) and magnetic field (orange) around nanoplatelets. Blue dots indicate cross-sections of disclination lines, and red arrows show directions of magnetic moments [123]

Богатство электронных переходов внутри 4f оболочек у НЧ, легированных ионами РЗЭ, превратило их в уникальных класс оптических наноматериалов [135]. Такие НЧ могут преобразовывать два или более низкоэнергетических фотона (как правило, в ИК-диапазоне) в один высокоэнергетический фотон [136–138]. Данное явление получило название ап-конверсии и используется во многих областях от бесконтактного биологического зондирования и доставки лекарств до аккумуляли-

рования солнечной энергии и микроскопии сверхвысокого разрешения [139–141].

Однако решающей проблемой для применения апконверсионных частиц в оптических устройствах является управление откликом большого количества НЧ. В связи с этим в последнее время синтезируются лиотропные металломезогены на основе лантаноидов, главными структурными элементами которых являются апконверсионные наностержни  $\beta\text{-NaYF}_4\text{:Yb/Er}$  [142], выстраивающиеся

в виде анизотропной матрицы, обеспечивая перестраиваемую поляризованную люминесценцию в композиционном материале [143–145]. Таким образом, разработан новый класс перестраиваемых ап-конверсионных жидкокристаллических материалов с простым откликом на внешние электрические и магнитные поля.

Умные наноустройства, которые изменяют свои характеристики в ответ на внешние раздражители, обеспечивая тем самым полезные биологические эффекты, являются новой парадигмой в наномедицине [146]. НЧ оксида церия становятся все более популярными в качестве функционального имитатора супероксиддисмутазы (нанозима) [147]. Недавно были проведены исследования, использующие преимущества имитации фермента-

тивной способности НЧ на основе церия для получения нового поколения антимикробных агентов [148–150]. Последние исследования показали возможность синтеза системы лиотропного ЖК, содержащего НЧ  $\text{Ce}(\text{OH})_3$  [151]. Такая система обладает высокой антиоксидантной активностью и может быть активирована в заданном месте действия *in vivo* в соответствии с потребностями пациента.

Изменения физических свойств, обнаруженные различными научными группами в жидкокристаллических композитах с редкоземельными НЧ, представлены в сводной таблице. Из представленных данных следует, что внедрение НЧ на основе РЗЭ является эффективным подходом в улучшении эксплуатационных свойств ЖК и устройств на их основе.

Таблица. Влияние НЧ на основе РЗЭ на физические параметры жидкокристаллических НК

Table. Effects of REM-based NP on the physical parameters of liquid crystal nanocomposites

Свойства	Тип наночастиц						
	$\text{Y}_2\text{O}_3$	$\text{Ce:Y}_2\text{O}_3$	$\text{Nd:Y}_2\text{O}_3$	$\text{CeO}_2$	$\text{LaF}_3$	$\text{BaSc}_x\text{Fe}_{12-x}\text{O}_{19}$	$\beta\text{-NaYF}_4\text{:Yb/Er}$
Пороговое напряжение $V_{th}$	У [100, 101, 105]	У [99]	У [99]	У [110]	У [121]	У [125, 126]	–
Пороговая напряженность $H_{th}$	–	–	–	У [111]	–	–	–
Время отклика $\tau_{on}$	У [100, 101, 105]	У [99]	–	У [110]	–	–	–
Время затухания $\tau_{off}$	У [100, 101, 105]	У [99]	–	У [110]	–	–	–
Коэффициент пропускания $T$	Н [100, 105] В [101]	У [99]	У [99]	Н [110]	–	–	–
Относительная диэлектрическая анизотропия $\Delta\epsilon/\epsilon$	В [100]	–	–	–	–	–	–
Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$	В [104]	–	–	–	–	–	–
Угол преднаклона $\theta$	В [105]	–	–	У [110]	–	–	–
Энергия сцепления $W$	–	–	–	У [110]	–	–	–
Коэффициент диффузии $D$	–	–	–	В [111]	–	–	–
Параметр порядка $S$	–	–	–	–	–	–	В [144]

Н – незначительное изменение, В – возрастание, У – убывание



## Выводы

Нарастающий интерес к редкоземельным наночастицам и супрамолекулярным системам на их основе связан с их многообещающими приложениями в биомедицинских технологиях и системах преобразования энергии. Слияние жидкокристаллических систем с данным классом наноматериалов является перспективной стратегией к созданию перестраиваемых устройств нового поколения. Подробно рассмотрены возможные воздействия редкоземельных элементов на функциональные особенности жидких кристаллов. Как и в случае других неорганических наночастиц, редкоземельные наноматериалы существенным образом влияют на ионную чистоту жидкого кристалла, адсорбируя примесные ионы и ослабляя так называемый эффект экранирования поля. Все это приводит к существенным улучшениям электрооптических и эксплуатационных свойств конечной смеси: уменьшается отклик, рабочие напряжения, усиливается контрастность. Показано, что позитивный эффект от внедрения таких наночастиц может достигать 50 % и более.

Кроме этого, композит наделяется характерными особенностями семейства редкоземельных элементов, а именно выраженными магнитными и люминесцентными свойствами (в том числе интересными нелинейными эффектами, такими как апконверсия). Варьированием типами внедряемых элементов, внешними воздействиями и структурными особенностями жидкокристаллической системы можно добиться эффективной люминесценции от ближнего ультрафиолетового до ближнего инфракрасного диапазона электромагнитного спектра. Все это делает данные системы перспективными для применения в различных областях электроники. Интересными являются приложения в области биомиметической химии, а лиотропное комплексообразование на основе редкоземельных наноматериалов позволяет осуществлять доставку и активацию по требованию. Дальнейшие исследования в этой области, несомненно, принесут значительный прогресс как в научном, так и прикладном аспектах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-17-50159 Экспансия.

The reported study was funded by RFBR, project number №19-17-50159.

## Список литературы / References

1. Kato T., Uchida J., Ichikawa T., Sakamoto T. Functional liquid crystals towards the next generation of materials. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, **57** (16), 4355–4371. DOI: 10.1002/anie.201711163.
2. Goodby J.W., Mandle R.J., Davis E.J., Zhong T., Cowling S.J. What makes a liquid crystal? The effect of free volume on soft matter. *Liquid Crystals*, 2015, **42** (5–6), 593–622. DOI: 10.1080/02678292.2015.1030348.
3. Guillamat P., Ignés-Mullol J., Sagués F. Control of active liquid crystals with a magnetic field. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, **113** (20), 5498–5502. DOI: 10.1073/pnas.1600339113.
4. Liu M., Fan K., Padilla W., Powell D.A., Zhang X., Shadrivov I.V. Tunable Meta-Liquid Crystals. *Advanced Materials*, 2016, **28** (8), 1553–1558. DOI: 10.1002/adma.201504924.
5. Беляев В. В., Чилая Г. С. Жидкие кристаллы в начале XXI века. М. : ИИУ МГОУ, 2017. 142 с. [Belyaev V.V., Chilaya G.S. Liquid crystals at the beginning of the XXI century. Moscow : IPD MRSU, 2017, 142 p. (in Russ.).]
6. Беляев В. В. Перспективные применения и технологии жидкокристаллических устройств отображения информации и фотоники // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2015. Т. 15, № 3. С. 7–27. [Belyaev V.V. Promising applications and technologies of liquid crystal displays and photonics devices. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2015, **15** (3), 7–27. (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2015.3.7].
7. Alex-Amor A., Tamayo-Domínguez A., Palomares-Caballero Á., Fernández-González J.M., Padilla P., Valenzuela-Valdés J., Palomares A. Analytical approach of director tilting in nematic liquid crystals for electronically tunable devices. *IEEE Access*, 2019, **7**, 14883–14893. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2894167.
8. Kurochkin O., Buluy O., Varshal J., Manevich M., Glushchenko A., West J.L., Reznikov Yu., Nazarenko V. Ultra-fast adaptive optical micro-lens arrays based on stressed liquid crystals. *Journal of Applied Physics*, 2018, **124** (21), 214501. DOI: 10.1063/1.5057393.
9. Vasić B., Zografopoulos D.C., Isić G., Beccherelli R., Gajić R. Electrically tunable terahertz polarization converter based on overcoupled metal-isolator-metal metamaterials infiltrated with liquid crystals. *Nanotechnology*, 2017, **28** (12), 124002. DOI: 10.1088/1361-6528/aa5bbd.

10. Wang L., Bisoyi H.K., Zheng Z., Gutierrez-Cuevas K.G., Singh G., Kumar S., Bunning T.J., Li Q. Stimuli-directed self-organized chiral superstructures for adaptive windows enabled by mesogen-functionalized graphene. *Materials Today*, 2017, **20** (5), 230–237. DOI: 10.1016/j.mattod.2017.04.028.
11. Economou E.C., Lovejoy J., Harward I., Nobles J.E., Kula P., Herman J., Glushchenko A., Celinski Z. Electrically tunable open-stub bandpass filters based on nematic liquid crystals. *Physical Review Applied*, 2017, **8** (6), 064012. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.8.064012.
12. Algorri J.F., Zografopoulos D.C., Urruchi V., Sánchez-Pena J.M. Recent advances in adaptive liquid crystal lenses. *Crystals*, 2019, **9** (5), 272. DOI: 10.3390/cryst9050272.
13. Lagerwall J.P., Scalia G. A new era for liquid crystal research: Applications of liquid crystals in soft matter nano-, bio- and microtechnology. *Current Applied Physics*, 2012, **12** (6), 1387–1412. DOI: 10.1016/j.cap.2012.03.019.
14. Hegmann T., Qi H., Marx V.M. Nanoparticles in liquid crystals: synthesis, self-assembly, defect formation and potential applications. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2007, **17** (3), 483–508. DOI: 10.1007/s10904-007-9140-5.
15. Bisoyi H.K., Kumar S. Liquid-crystal nanoscience: an emerging avenue of soft self-assembly. *Chemical Society Reviews*, 2011, **40** (1), 306–319. DOI: 10.1039/B901793N.
16. Blanc C., Coursault D., Lacaze E. Ordering nano- and microparticles assemblies with liquid crystals. *Liquid Crystals Reviews*, 2013, **1** (2), 83–109. DOI: 10.1080/21680396.2013.818515.
17. Kumar S. Discotic liquid crystal-nanoparticle hybrid systems. *NPG Asia Materials*, 2014, **6** (1), e82–e82 (13 p.). DOI: 10.1038/am.2013.75.
18. Shen Y., Dierking I. Perspectives in liquid-crystal-aided nanotechnology and nanoscience. *Applied Sciences*, 2019, **9** (12), 2512. DOI: 10.3390/app9122512.
19. Khushboo Bhargava N., Anand K., Malik P., Sharma P., Jayoti D., Raina K.K. Dielectric and polarization switching studies in nickel nanoparticles dispersed ferroelectric liquid crystal mixtures. *Integrated Ferroelectrics*, 2017, **184** (1), 192–198. DOI: 10.1080/10584587.2017.1368657.
20. Gao L., Dai Y., Li T., Tang Z., Zhao X., Li Z., Meng X., He Z., Li J., Cai M., Wang X. Enhancement of image quality in LCD by doping  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles and reducing friction torque difference. *Nanomaterials*, 2018, **8** (11), 911. DOI: 10.3390/nano8110911.
21. Roy A., Singh B.P., Yadav G., Khan H., Kumar S., Srivastava A., Manohar R. Effect of gold nanoparticles on intrinsic material parameters and luminescent characteristics of nematic liquid crystals. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, **295**, 111872. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.111872.
22. Pandey D.K., Singh U.B., Dhar R., Dabrowski R., Pandey M.B. Dielectric and electro-optic properties of 6CHBT nematic liquid crystals and silver nanoparticles composites. *Phase Transitions*, 2019, **92** (10), 931–938. DOI: 10.1080/01411594.2019.1654107.
23. Yadav G., Katiyar R., Pathak G., Manohar R. Effect of ion trapping behavior of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on different parameters of weakly polar nematic liquid crystal. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 2018, **12** (3), 191–198. DOI: 10.1007/s40094-018-0296-x.
24. Haase W. Dielectric and Electrooptic Investigations of Liquid Crystals and Liquid Crystalline Nanocolloids between Subhertz and 100 Gigahertz Region. *Tutorial. Eduard-Zintl-Institut für Anorganische und Physikalische Chemie, Technische Universität Darmstadt*, 2010, 76 p.
25. Tschierske C. Liquid crystals: materials design and self-assembly. New York : Springer Science & Business Media, 2012, **318**, 409 p. DOI: 10.1007/978-3-642-27591-3.
26. Wang M., He L., Zorba S., Yin Y. Magnetically actuated liquid crystals. *Nano Letters*, 2014, **14** (7), 3966–3971. DOI: 10.1021/nl501302s.
27. Goel P., Arora M., Biradar A.M. Electro-optic switching in iron oxide nanoparticle embedded paramagnetic chiral liquid crystal via magneto-electric coupling. *Journal of Applied Physics*, 2014, **115** (12), 124905. DOI: 10.1063/1.4869740.
28. Khushboo Sharma P., Malik P., Raina K.K. Dielectric and electro-optical studies of a nickel-ferrite-nanoparticle-doped ferroelectric liquid crystal mixture. *Phase Transitions*, 2016, **89** (2), 144–154. DOI: 10.1080/01411594.2015.1078463.
29. Ji Y., Fan F., Xu S., Yu J., Chang S. Manipulation enhancement of terahertz liquid crystal phase shifter magnetically induced by ferromagnetic nanoparticles. *Nanoscale*, 2019, **11** (11), 4933–4941. DOI: 10.1039/C8NR09259A.
30. Jia D., Yang C., Li X., Peng Z., Liu Y., Cao Z., Mu Q., Hu L., Li D., Yao L., Lu X. Optical hyperbolic metamaterials based on nanoparticles doped liquid crystals. *Liquid Crystals*, 2014, **41** (2), 207–213. DOI: 10.1080/02678292.2013.847126.
31. Kasyanova I.V., Geivandov A.R., Artemov V.V., Gorkunov M.V., Palto S.P. Nematic liquid crystal alignment on subwavelength metal gratings. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2018, **9** (1), 42–47. DOI: 10.3762/bjnano.9.6.
32. Yadav S.P., Singh S. Carbon nanotube dispersion in nematic liquid crystals: An overview. *Progress in Materials Science*, 2016, **80**, 38–76. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.12.002.

33. Lagerwall J.P., Scalia G. Carbon nanotubes in liquid crystals. *Journal of Materials Chemistry*, 2008, **18** (25), 2890–2898. DOI: 10.1039/B802707B.
34. Rahman M., Lee W. Scientific duo of carbon nanotubes and nematic liquid crystals. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, **42** (6), 063001. DOI: 10.1088/0022-3727/42/6/063001.
35. Podgornov F.V., Gavril'yak M., Karaawi A., Boronin V., Haase W. Mechanism of electrooptic switching time enhancement in ferroelectric liquid crystal/gold nanoparticles dispersion. *Liquid Crystals*, 2018, **45** (11), 1594–1602. DOI: 10.1080/02678292.2018.1458256.
36. Rahman M.L., Biswas T.K., Sarkar S.M., Yusoff M.M., Yuvaraj A.R., Kumar S. Synthesis of new liquid crystals embedded gold nanoparticles for photoswitching properties. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2016, **478**, 384–393. DOI: 10.1016/j.jcis.2016.06.039.
37. Garbovskiy Y., Glushchenko A. Ferroelectric nanoparticles in liquid crystals: recent progress and current challenges. *Nanomaterials*, 2017, **7** (11), 361. DOI: 10.3390/nano7110361.
38. Al-Zangana S., Turner M., Dierking I. A comparison between size dependent paraelectric and ferroelectric BaTiO<sub>3</sub> nanoparticle doped nematic and ferroelectric liquid crystals. *Journal of Applied Physics*, 2017, **121** (8), 085105. DOI: 10.1063/1.4976859.
39. Liu Y., Wang D., Gao H., Zhang J.J., Tao Y., Ye C., He W.L., Yang Z., Cao H. TiO<sub>2</sub> nanorod arrays induced broad-band reflection in chiral nematic liquid crystals with photo-polymerization network. *Liquid Crystals*, 2019, **46** (2), 210–218. DOI: 10.1080/02678292.2018.1485977.
40. Zhang X., Yu B., Cong H. Recent developments in fullerene-containing thermotropic liquid crystals. *Current Organic Chemistry*, 2017, **21** (16), 1600–1611. DOI: 10.2174/1385272821666170407113058.
41. Chausov D.N., Kurilov A.D., Kazak A.V., Smirnova A.I., Belyaev V.V., Gevorkyan E.V., Usolt'seva N.V. Conductivity and dielectric properties of cholesteryl tridecylate with nanosized fragments of fluorinated graphene. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, **291**, 111259. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.111259.
42. Chausov D.N., Kurilov A.D., Kazak A.V., Smirnova A.I., Velichko V.K., Gevorkyan E.V., Rozhkova N.N., Usolt'seva N.V. Dielectric properties of liquid crystalline composites doped with nano-dimensional fragments of shungite carbon. *Liquid Crystals*, 2019, **46** (9), 1345–1352. DOI: 10.1080/02678292.2019.1566503.
43. Wang Y.F., Sun L.D., Xiao J.W., Feng W., Zhou J.C., Shen J., Yan C.H. Rare-Earth Nanoparticles with Enhanced Upconversion Emission and Suppressed Rare-Earth-Ion Leakage. *Chemistry – A European Journal*, 2012, **18** (18), 5558–5564. DOI: 10.1002/chem.201103485.
44. Liu C., Hou Y., Gao M. Are Rare-Earth Nanoparticles Suitable for in Vivo Applications? *Advanced Materials*, 2014, **26** (40), 6922–6932. DOI: 10.1002/adma.201305535.
45. Bouzigues C., Gacoin T., Alexandrou A. Biological applications of rare-earth based nanoparticles. *ACS Nano*, 2011, **5** (11), 8488–8505. DOI: 10.1021/nn202378b.
46. Garbovskiy Y. Switching between purification and contamination regimes governed by the ionic purity of nanoparticles dispersed in liquid crystals. *Applied Physics Letters*, 2016, **108** (12), 121104. DOI: 10.1063/1.4944779.
47. Garbovskiy Y., Glushchenko I. Ion trapping by means of ferroelectric nanoparticles, and the quantification of this process in liquid crystals. *Applied Physics Letters*, 2015, **107** (4), 041106. DOI: 10.1063/1.4926988.
48. John V.N., Varanakkottu S.N., Varghese S. Flexible, ferroelectric nanoparticle doped polymer dispersed liquid crystal devices for lower switching voltage and nanoenergy generation. *Optical Materials*, 2018, **80**, 233–240. DOI: 10.1016/j.optmat.2018.05.003.
49. Бумбина Н. В., Акопова О. Б., Усольцева Н. В., Знойко С. А., Зубкова О. Н., Майзлиш В. Е., Шапошников Г. П. Синтез и исследование спектральных и жидкокристаллических свойств производного фталоцианина с бензотриазолильными и сульфонафтокси-группами и его комплекса с эрбием // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2015. Т. 15, № 2. С. 19–25. [Bumbina N.V., Akopova O.B., Usolt'seva N.V., Znoiko S.A., Zubkova O.N., Maizlish V.E., Shaposhnikov G.P. Synthesis and investigation of spectral and liquid crystal properties of the phthalocyanine derivative with benzotriazolyl and sulfonaphoxy-groups and its erbium complex. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2015, **15** (2), 19–25. (in Russ.)].
50. Полушин С. Г., Рогожин В. Б., Лезова А. А., Полушина Г. Е., Рюмцев Е. И., Галяметдинов Ю. Г. Предпереходные явления в изотропных расплавах смектических металломезогенов // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2015. Т. 15, № 2. С. 44–49. [Polushin S.G., Rogozhin V.B., Lezova A.A., Polushina G.E., Rjuntsev E.I., Galyametdinov Yu.G. Pretransition phenomena in isotropic melts of smectic metallomesogens. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2015, **15** (2), 44–49. (in Russ.)].
51. Галяметдинов Ю. Г., Князев А. А., Селиванова Н. М. Металломезогены – становление и развитие // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2015. Т. 15, № 4. С. 6–20. [Galyametdinov Yu.G., Knyazev A.A., Selivanova N.M. Metallomesogens – formation and development. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2015, **15** (4), 6–20. (in Russ.)]. DOI: 10.18083/LCAppl.2015.4.6].

52. Полушин С. Г., Добрун Л. А., Ковшик А. П., Рогожин В. Б., Полушина Г. Е., Рюмцев Е. И., Князев А. А., Галяметдинов Ю. Г. Оптические, электрооптические и диэлектрические свойства жидкокристаллического аддукта трис(β-дикетоната) с иттербием // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2015. Т. 15, № 4. С. 79–87. [Polushin S.G., Dobrun L.A., Kovshik A.P., Rogozhin V.B., Polushina G.E., Rjuntsev E.I., Knyazev A.A., Galyametdinov Yu.G. Optical, electrooptical and dielectric properties of liquid crystalline tris(β-diketonates) ytterbium adduct. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2015, **15** (4), 79–87. (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2015.4.79].
53. Селиванова Н. М., Вандюков А. Е., Губайдуллин А. Т., Галяметдинов Ю. Г. Инкапсулирование глобулярных молекул в структуру ламеллярных лантан-содержащих мезофаз // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2015. Т. 15, № 4. С. 88–95. [Selivanova N.M., Vandyukov A.E., Gubaidullin A.T., Galyametdinov Yu.G. Encapsulation of globular molecules in the structure of the lamellar lanthanum-containing mesophases. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2015, **15** (4), 88–95. (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2015.4.88].
54. Binnemans K. Lanthanide-based luminescent hybrid materials. *Chemical Reviews*, 2009, **109** (9), 4283–4374. DOI: 10.1021/cr8003983.
55. Muller G. Luminescent chiral lanthanide (III) complexes as potential molecular probes. *Dalton Transactions*, 2009, **44**, 9692–9707. DOI: 10.1039/B909430J.
56. Eliseeva S.V., Bünzli J.C.G. Lanthanide luminescence for functional materials and bio-sciences. *Chemical Society Reviews*, 2010, **39** (1), 189–227. DOI: 10.1039/B905604C.
57. Bünzli J.C.G. Lanthanide luminescence for biomedical analyses and imaging. *Chemical Reviews*, 2010, **110** (5), 2729–2755. DOI: 10.1021/cr900362e.
58. Knyazev A.A., Krupin A.S., Heinrich B., Donnio B., Galyametdinov Y.G. Controlled polarized luminescence of smectic lanthanide complexes. *Dyes and Pigments*, 2018, **148**, 492–500. DOI: 10.1016/j.dyepig.2017.08.018.
59. Lin P., Yan Q., Wei Z., Li X., Wang H., Huang Z., Wang X., Cheng Z. Electrically modulated optical properties of fluorescent chiral nematic liquid crystals. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **341**, 565–577. DOI: 10.1016/j.cej.2018.02.007.
60. Selivanova N.M., Gubaidullin A.T., Haase W., Galyametdinov Y.G. Novel lanthanidomesogens based on poly (ethylene glycol) cholesterol ether: liquid crystal phase behavior and luminescence properties. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, **275**, 402–408. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.11.091.
61. Mirgorod Y.A., Chekadanov A.S., Yanushkevich K.I., Storozhenko A.M. Magnetic properties of Gd (III) in aqueous micellar systems. *Magnetohydrodynamics*, 2018, **54** (3), 299–308. DOI: 10.22364/mhd.54.3.9.
62. Галяметдинов Ю. Г., Иванова Г. И., Овчинников И. В. Жидкокристаллические комплексы редкоземельных элементов с основаниями Шиффа // *Известия АН СССР. Серия химическая*. 1991. Т. 40, № 5. С. 1232. [Galyametdinov Y.G., Ivanova G.I., Ovchinnikov I.V. Liquid-crystalline complexes of rare-earth elements with a Schiff base. *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Division of Chemical Sciences*, 1991, **40** (5), 1232].
63. Binnemans K., Galyametdinov Y.G., Van Deun R., Bruce D.W., Collinson S.R., Polishchuk A.P., Bikhantaev I., Haase W., Prosvirin A.V., Tinchurina L., Litvinov I. Rare-earth-containing magnetic liquid crystals. *Journal of the American Chemical Society*, 2000, **122** (18), 4335–4344. DOI: 10.1021/ja993351q.
64. Li J., Zhang Z., Tian J., Li G., Wei J., Guo J. Dicyanodistyrylbenzene-Based Chiral Fluorescence Photoswitches: An Emerging Class of Multifunctional Switches for Dual-Mode Phototunable Liquid Crystals. *Advanced Optical Materials*, 2017, **5** (8), 1700014. DOI: 10.1002/adom.201700014.
65. Binnemans K., Lodewyckx K. Coordinatively unsaturated metal centers as building blocks for high coordination number metallomesogens. *Angewandte Chemie International Edition*, 2001, **40** (1), 242–244. DOI: 10.1002/1521-3773(20010105)40:1<242:AID-ANIE242>3.0.CO;2-O.
66. Binnemans K., Moors D. Narrow band photoluminescence of europium-doped liquid crystals. *Journal of Materials Chemistry*, 2002, **12** (12), 3374–3376. DOI: 10.1039/B206810A.
67. Bünzli J.C.G. Rising stars in science and technology: luminescent lanthanide materials. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2017, **2017** (44), 5058–5063. DOI: 10.1002/ejic.201701201.
68. Zhou Y., Zhang H.Y., Zhang Z.Y., Liu Y. Tunable luminescent lanthanide supramolecular assembly based on photoreaction of anthracene. *Journal of the American Chemical Society*, 2017, **139** (21), 7168–7171. DOI: 10.1021/jacs.7b03153.
69. Long J. Luminescent Schiff-Base Lanthanide Single-Molecule Magnets: the Association Between Optical and Magnetic Properties. *Frontiers in Chemistry*, 2019, **7**, 63. DOI: 10.3389/fchem.2019.00063.
70. Mironov V.S., Galyametdinov Y.G., Ceulemans A., Binnemans K. On the magnetic anisotropy of lanthanide-containing metallomesogens. *The Journal of Chemical Physics*, 2000, **113** (22), 10293–10303. DOI: 10.1063/1.1323230.

71. Mironov V.S., Galyametdinov Y.G., Ceulemans A., Görrler-Walrand C., Binnemans K. Room-temperature magnetic anisotropy of lanthanide complexes: A model study for various coordination polyhedra. *The Journal of Chemical Physics*, 2002, **116** (11), 4673–4685. DOI: 10.1063/1.1450543.
72. Galyametdinov Y.G., Knyazev A.A., Dzhabarov V.I., Cardinaels T., Driesen K., Görrler-Walrand C., Binnemans K. Polarized luminescence from aligned samples of nematogenic lanthanide complexes. *Advanced Materials*, 2008, **20** (2), 252–257. DOI: 10.1002/adma.200701714.
73. Buenzli J.C.G., Eliseeva S.V. Intriguing aspects of lanthanide luminescence. *Chemical Science*, 2013, **4** (5), 1939–1949. DOI: 10.1039/C3SC22126A.
74. Zhang H., Shan X., Zhou L., Lin P., Li R., Ma E., Guo X., Du S. Full-colour fluorescent materials based on mixed-lanthanide (III) metal–organic complexes with high-efficiency white light emission. *Journal of Materials Chemistry C*, 2013, **1** (5), 888–891. DOI: 10.1039/C2TC00414C.
75. Lapaev D.V., Nikiforov V.G., Knyazev A.A., Dzhabarov V.I., Lobkov V.S., Salikhov K.M., Galyametdinov Y.G. Intramolecular energy transfer in mesogenic europium (III) adduct. *Optics and Spectroscopy*, 2008, **104** (6), 851–857. DOI: 10.1134/S0030400X08060088.
76. Lapaev D.V., Nikiforov V.G., Safiullin G.M., Galyaviev I.G., Dzhabarov V.I., Knyazev A.A., Lobkov V.S., Galyametdinov Y.G. Interligand energy transfer in europium (III) mesogenic adducts. *Journal of Structural Chemistry*, 2009, **50**(4), 775–781. DOI: 10.1007/s10947-009-0117-9.
77. Wang Y., Zheng K., Song S., Fan D., Zhang H., Liu X. Remote manipulation of upconversion luminescence. *Chemical Society Reviews*, 2018, **47** (17), 6473–6485. DOI: 10.1039/c8cs00124c.
78. Galyametdinov Y.G., Jervis H.B., Bruce D.W., Binnemans K. Lyotropic mesomorphism of rare-earth trialkylsulphates in the water-ethylene glycol system. *Liquid Crystals*, 2001, **28** (12), 1877–1879. DOI: 10.1080/02678290110093219.
79. Селиванова Н. М., Лобков В. С., Барабанов В. П., Салихов К. М., Хаазе В., Галяметдинов Ю. Г. Лиотропные металломезогены на основе неионного сурфактанта и нитратов лантаноидов // *Доклады Академии наук*. 2005. Т. 401, № 3. С. 353–356. [Selivanova N.M., Lobkov V.S., Salikhov K.M., Galyametdinov Yu.G., Haase W., Barabanov V.P. Lyotropic metal mesogens based on a nonionic surfactant and lanthanide nitrates. *Doklady Chemistry*, 2005, **401** (1–3), 51–54].
80. Селиванова Н. М., Гнездилов О. И., Конов А. Б., Зуев Ю. Ф., Галяметдинов Ю. Г. Самодиффузия в лантансодержащей системе на основе неионного ПАВ в изотропном и мезоморфном состояниях по данным ЯМР // *Изв. Акад. наук. Серия химическая*. 2008. № 3. С. 495–498. [Selivanova N.M., Galyametdinov Y.G., Gnezdilov O.I., Konov A.B., Zuev Yu.F. Self-diffusion in the isotropic and mesomorphic states of the lanthanide-containing system based on nonionic surfactant according to the NMR data. *Russ. Chem. Bull.*, 2008, **57** (3), 506–509. DOI: 10.1007/s11172-008-0078-8].
81. Селиванова Н. М., Галеева А. И., Конов А. Б., Гнездилов О. И., Салихов К. М., Галяметдинов Ю. Г. Фазовая диаграмма жидкокристаллической системы вода – деканол – нитрат лантана – монододециловый эфир // *Журн. физ. хим.* 2010. Т. 84, № 5. С. 902–907. [Selivanova N.M., Galeeva A.I., Galyametdinov Yu.G., Konov A.B., Gnezdilov O.I., Salikhov K.M. Phase diagram of the liquid crystal system of water – decanol – lanthanum nitrate – decaethylene glycol monododecyl ether. *Russ. J. of Phys. Chem. A*, 2010, **84** (5), 802–807. DOI: 10.1134/S003602441005016X].
82. Selivanova N.M., Galeeva A.I., Gubaydullin A.T., Lobkov V.S., Galyametdinov Y.G. Mesogenic and luminescent properties of lyotropic liquid crystals containing Eu (III) and Tb (III) ions. *J. of Phys. Chem. B*, 2012, **116** (2), 735–742. DOI: 10.1021/jp207734b.
83. Selivanova N.M., Konov A.B., Romanova K.A., Gubaidullin A.T., Galyametdinov Yu.G. Lyotropic La-containing lamellar liquid crystals: phase behaviour, thermal and structural properties. *Soft Matter*, 2015, **11** (39), 7809–7816. DOI: 10.1039/C5SM01371B.
84. Selivanova N.M., Gubaidullin A.T., Haase W., Galyametdinov Yu.G. Novel lanthanidomesogens based on poly (ethylene glycol) cholesterol ether: liquid crystal phase behavior and luminescence properties. *J. of Mol. Liq.*, 2019, **275**, 402–408. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.11.091.
85. Ceraulo L., Filizzola F., Longo A., Ruggirello A., Liveri V.T. Physicochemical investigation of the solubilization of ytterbium nitrate in AOT reverse micelles and liquid crystals. *Colloid and Polymer Science*, 2006, **284** (10), 1085–1095. DOI: 10.1007/s00396-006-1485-8.
86. Longo A., Ruggirello A., Liveri V.T. Physicochemical investigation of nanostructures in liquid phases: Ytterbium nitrate ionic clusters confined in ytterbium bis (2-ethylhexyl) sulfosuccinate reversed micelles and liquid crystals. *Chemistry of Materials*, 2007, **19** (5), 1127–1133. DOI: 10.1021/cm0613408.
87. Mirgorod Y.A. Small-angle X-ray scattering of the gadolinium triacetate – undecane – water system. *J. of Struc. Chem.*, 2016, **57** (3), 557–562. DOI: 10.1134/S0022476616030197.

88. Getsis A., Mudring A.V. Lanthanide containing ionic liquid crystals:  $\text{EuBr}_2$ ,  $\text{SmBr}_3$ ,  $\text{TbBr}_3$  and  $\text{DyBr}_3$  in  $\text{C}_{12}\text{mimBr}$ . *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, 2010, **636** (9–10), 1726–1734. DOI: 10.1002/zaac.201000070.
89. Getsis A., Tang S., Mudring A.V. A luminescent ionic liquid crystal:  $[\text{C}_{12}\text{mim}]_4[\text{EuBr}_6]\text{Br}$ . *Europ. J. of Inorg. Chem.*, 2010, **2010** (14), 2172–2177. DOI: 10.1002/ejic.200901220.
90. Getsis A., Mudring A.V. Switchable Green and White Luminescence in Terbium-Based Ionic Liquid Crystals. *Europ. J. of Inorg. Chem.*, 2011, **2011** (21), 3207–3213. DOI: 10.1002/ejic.201100168.
91. Cui X.L., Liu G.F., Yu M. Synthesis and characterization of a new unsymmetrical porphyrin liquid crystal and its lanthanide complexes. *Coordination Chemistry*, 2006, **59** (12), 1361–1370. DOI: 10.1080/00958970600553552.
92. Zhao Z., Liu G. The first lanthanide (III) monoporphyrin complex liquid crystal. *Liquid Crystals*, 2002, **29** (10), 1335–1337. DOI: 10.1080/713935612.
93. Yu M., Liu G., Cheng Y., Xu W. Synthesis and properties of 5, 10, 15, 20-tetra [(4-alkoxy-3-ethyloxy) phenyl] porphyrin hydroxylanthanide liquid crystal complexes. *Liquid crystals*, 2005, **32** (6), 771–780. DOI: 10.1080/02678290500139591.
94. Yu M., Chen G.J., Liu G.F. Photophysical and electrochemical properties of monoporphyrin rare earth liquid crystalline materials. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2007, **68** (4), 541–548. DOI: 10.1016/j.jpcs.2007.01.018.
95. Yu M., Zhang W. Y., Fan Y., Jian W. P., Liu G. F. [5-(p-alkoxy) phenyl-10, 15, 20-tri-phenyl] porphyrin and their rare earth complex liquid crystalline. *Journal of Physical Organic Chemistry*, 2007, **20** (4), 229–235. DOI: 10.1002/poc.1132.
96. Binnemans K. Lanthanides and actinides in ionic liquids. *Chemical Reviews*, 2007, **107** (6), 2592–2614. DOI: 10.1021/cr050979c.
97. Piguet C., Bünzli J.C.G., Donnio B., Guillon D. Thermotropic lanthanidomesogens. *Chemical Communications*, 2006, (36), 3755–3768. DOI: 10.1039/B605737C.
98. Yu M., Zhang Y.J., Shi J.H., Liu G.F., Zhang H.J. Holmium porphyrin compound liquid crystals: Synthesis and properties. *Solid State Sciences*, 2009, **11** (11), 2016–2022. DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2009.06.022.
99. Жаркова Г. М., Осипов В. В., Платонов В. В., Подкин А. В., Стрельцов С. А. Исследование влияния наночастиц оксида иттрия, легированных церием и неодимом, на электрооптику полимерно-жидкокристаллических композитов // *Известия вузов. Физика*. 2016. Т. 59, № 8. С. 153–158. [Zharkova G.M., Strel'tsov S.A., Osipov V.V., Platonov V.V., Podkin A.V. Investigation of the Effect of Yttrium Oxide Nanoparticles Doped with Cerium and Neodymium on Electro-Optics of Liquid Crystal Polymer Composites. *Russ. Phys. J.*, 2016, **59** (8), 1295–1301. DOI: 10.1007/s11182-016-0905-6.].
100. Жданов К. Р., Романенко А. И., Жаркова Г. М. Влияние диэлектрических наночастиц окислов титана, иттрия и кремния на электрооптические характеристики полимерно-дисперсных жидких кристаллов // *Известия вузов. Физика*. 2015. Т. 58, № 9. С. 78–83. [Zhdanov K.R., Romanenko A.I., Zharkova G.M. Effect of Dielectric Titanium, Yttrium, and Silicon Oxide Nanoparticles on Electro-Optical Characteristics of Polymer-Dispersed Liquid Crystals. *Russ. Phys. J.*, 2016, **58** (9), 1291–1296. DOI: 10.1007/s11182-016-0645-7.].
101. Жаркова Г. М., Зобов К. В., Романов Н. А., Сызранцев В. В., Бардаханов С. П. Полимерно-жидкокристаллические композиты, допированные нанопорошками неорганических оксидов // *Российские нанотехнологии*. 2015. Т. 10, № 5–6. С. 45–50. [Zharkova G.M., Zobov K.V., Syzrantsev V.V., Bardakhanov S.P., Romanov N.A. Polymer-liquid crystal composites doped by inorganic oxide nanopowders. *Nanotechnologies in Russia*, 2015, **10** (5–6), 380–387. DOI: 10.1134/S1995078015030210.].
102. Prakash J., Khan S., Chauhan S., Biradar A.M. Metal oxide-nanoparticles and liquid crystal composites: A review of recent progress. *J. of Mol. Liq.*, 2019, **297**, 112052. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.112052.
103. Жаркова Г. М., Стрельцов С. А. Влияние наночастиц оксида иттрия на дифракционную эффективность голографических полимерно-жидкокристаллических решеток // *Известия вузов. Физика*. 2018. Т. 61, № 7(727). С. 83–88. [Zharkova G.M., Strel'tsov S.A. Effect of Yttrium Oxide Nanoparticles on the Diffraction Efficiency of Holographic Polymer-liquid Crystal Gratings. *Russ. Phys. J.*, 2018, **61** (7), 1274–1280. DOI: 10.1007/s11182-018-1529-9.].
104. Zharkova G.M., Strel'tsov S.A. Effect of yttrium oxide nanoparticles on the dielectric properties and dynamics of the formation of holographic polymer-liquid-crystal composites. *Journal of Optical Technology*, 2020, **87** (1), 23–28. DOI: 10.1364/JOT.87.000023.
105. Jung H.Y., Kim H.J., Yang S., Kang Y.G., Oh B.Y., Park H.G., Seo D.S. Enhanced electro-optical properties of  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (yttrium trioxide) nanoparticle-doped twisted nematic liquid crystal devices. *Liquid Crystals*, 2012, **39** (7), 789–793. DOI: 10.1080/02678292.2012.681073.

106. Garbovskiy Y., Glushchenko I. Nano-objects and ions in liquid crystals: ion trapping effect and related phenomena. *Crystals*, 2015, **5** (4), 501–533. DOI: 10.3390/cryst5040501.
107. Gui-Xiang L., Xiang J. Magneto-optical effect of TEB30A liquid crystal doped with thulium oxides. *Chinese Physics B*, 2014, **23** (4), 044216. DOI: 10.1088/1674-1056/23/4/044216.
108. Zhou F., Zhao X., Xu H., Yuan C. CeO<sub>2</sub> spherical crystallites: synthesis, formation mechanism, size control, and electrochemical property study. *J. of Phys. Chem. C*, 2007, **111** (4), 1651–1657. DOI: 10.1021/jp0660435.
109. Hori C.E., Permana H., Ng K.S., Brenner A., More K., Rahmoeller K.M., Belton D. Thermal stability of oxygen storage properties in a mixed CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> system. *Applied Catalysis B: Environmental*, 1998, **16** (2), 105–117. DOI: 10.1016/S0926-3373(97)00060-X.
110. Mun H.Y., Park H.G., Jeong H.C., Lee J.H., Oh B.Y., Seo D.S. Thermal and electro-optical properties of cerium-oxide-doped liquid-crystal devices. *Liquid Crystals*, 2017, **44** (3), 538–543. DOI: 10.1080/02678292.2016.1225838.
111. Mouhli A., Ayeb H., Othman T., Fresnais J., Dupuis V., Nemitz I.R., Pendery J.S., Rosenblatt C., Sandre O., Lacaze E. Influence of a dispersion of magnetic and nonmagnetic nanoparticles on the magnetic Fredericksz transition of the liquid crystal 5CB. *Physical Review E*, 2017, **96** (1), 012706. DOI: 10.1103/PhysRevE.96.012706.
112. Kamanina N.V., Zubtcova Y.A., Kukharchik A.A., Lazar C., Rau I. Control of the IR-spectral shift via modification of the surface relief between the liquid crystal matrixes doped with the lanthanide nanoparticles and the solid substrate. *Optics Express*, 2016, **24** (2), A270–A275. DOI: 10.1364/OE.24.00A270.
113. Каманина Н. В., Комолкин А. В., Евлампиева Н. П. Изменение параметра ориентационного порядка в структуре композита нематический жидкий кристалл-COANP-C<sub>70</sub> // *Письма в Журнал Технической Физики*. 2005. Т. 31, № 11. С. 65–70. [Kamanina N.V., Komolkin A.V., Yevlampieva N.P. Variation of the orientational order parameter in a nematic liquid crystal-COANP-C<sub>70</sub> composite structure. *Technical Physics Letters*, 2005, **31** (6), 478–480. DOI: 10.1134/1.1969770].
114. Tan J., Song Y., Zhu J.L., Ni S.B., Wang Y.J., Sun X.Y., Lu J.G., Yang B.R., Shieh H.P.D. Blue phase LC/polymer Fresnel lens fabricated by holographics. *Journal of Display Technology*, 2013, **10** (2), 157–161. DOI: 10.1109/JDT.2013.2291068.
115. Ni S., Li H., Li S., Zhu J., Tan J., Sun X., Chen C.P., He G., Wu D., Lee K.C., Lo C.C. Low-voltage blue-phase liquid crystals with polyaniline-functionalized graphene nanosheets. *Journal of Materials Chemistry C*, 2014, **2** (9), 1730–1735. DOI: 10.1039/C3TC32138J.
116. Xie H., Wang L., Wang H., Zou C., Wang M., Wang B., Chen Z., Zhang L., Zhang X., Yang Z., Yang H. Electrically tunable properties of wideband-absorptive and reflection-selective films based on multi-dichroic dye-doped cholesteric liquid crystals. *Liquid Crystals*, 2015, **42** (12), 1698–1705. DOI: 10.1080/02678292.2015.1055600.
117. Wang M., Zou C., Sun J., Zhang L., Wang L., Xiao J., Li F., Song P., Yang H. Asymmetric tunable photonic bandgaps in self-organized 3D nanostructure of polymer-stabilized blue phase I modulated by voltage polarity. *Advanced Functional Materials*, 2017, **27** (46), 1702261. DOI: 10.1002/adfm.201702261.
118. Chen Y., Xu D., Wu S.T., Yamamoto S.I., Haseba Y. A low voltage and submillisecond-response polymer-stabilized blue phase liquid crystal. *Applied Physics Letters*, 2013, **102** (14), 141116. DOI: 10.1063/1.4802090.
119. Rao L., Wu S.T. Low-voltage blue phase liquid crystal displays. *Liquid Crystals Today*, 2015, **24** (1), 3–12. DOI: 10.1080/1358314X.2014.973270.
120. Peng F., Lee Y.H., Luo Z., Wu S.T. Low voltage blue phase liquid crystal for spatial light modulators. *Optics letters*, 2015, **40** (21), 5097–5100. DOI: 10.1364/OL.40.005097.
121. Zhu D., Chen B., Chen Z., Huo F., Zhang H., Tang A., Bo S. Low-voltage polymer-stabilised blue-phase liquid crystals with oleic acid (OA)-modified LaF<sub>3</sub> nanoparticles. *Liquid Crystals*, 2018, **45** (11), 1654–1660. DOI: 10.1080/02678292.2018.1468502.
122. Sebastian N., Lisjak D., Čopič M., Buchnev O., Mertelj A. Comparison of dynamic behavior of ferroelectric and ferromagnetic nematic suspensions. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, **267**, 377–383. DOI: 10.1016/j.molliq.2017.11.157.
123. Mertelj A., Lisjak D., Drofenik M., Čopič M. Ferromagnetism in suspensions of magnetic platelets in liquid crystal. *Nature*, 2013, **504** (7479), 237–241. DOI: 10.1038/nature12863.
124. Shuai M., Klittnick A., Shen Y., Smith G.P., Tuchband M.R., Zhu C., Petschek R.G., Mertelj A., Lisjak D., Čopič M., MacLennan J.E. Spontaneous liquid crystal and ferromagnetic ordering of colloidal magnetic nanoplates. *Nature Communications*, 2016, **7** (1), 1–8. DOI: 10.1038/ncomms10394.
125. Mertelj A., Osterman N., Lisjak D., Čopič M. Magneto-optic and converse magnetoelectric effects in a ferromagnetic liquid crystal. *Soft Matter*, 2014, **10** (45), 9065–9072. DOI: 10.1039/C4SM01625D.
126. Mertelj A., Lisjak D. Ferromagnetic nematic liquid crystals. *Liquid Crystals Reviews*, 2017, **5** (1), 1–33. DOI: 10.1080/21680396.2017.1304835.

127. Potisk T., Svenšek D., Brand H.R., Pleiner H., Lisjak D., Osterman N., Mertelj A. Dynamic magneto-optic coupling in a ferromagnetic nematic liquid crystal. *Physical Review Letters*, 2017, **119** (9), 097802. DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.097802.
128. Potisk T., Mertelj A., Sebastián N., Osterman N., Lisjak D., Brand H.R., Pleiner H., Svenšek D. Magneto-optic dynamics in a ferromagnetic nematic liquid crystal. *Physical Review E*, 2018, **97** (1), 012701. DOI: 10.1103/PhysRevE.97.012701.
129. Brence J., Cmok L., Sebastián N., Mertelj A., Lisjak D., Drevensek-Olenik I. Optical second harmonic generation in a ferromagnetic liquid crystal. *Soft Matter*, 2019, **15** (43), 8758–8765. DOI: 10.1039/C9SM01591D.
130. Medle Rupnik P., Lisjak D., Čopič M., Mertelj A. Ferromagnetic liquid crystals for magnetic field visualisation. *Liquid Crystals*, 2015, **42** (12), 1684–1688. DOI: 10.1080/02678292.2015.1049570.
131. Mur M., Sofi J.A., Kvasić I., Mertelj A., Lisjak D., Niranjana V., Mušević I., Dhara S. Magnetic-field tuning of whispering gallery mode lasing from ferromagnetic nematic liquid crystal microdroplets. *Optics Express*, 2017, **25** (2), 1073–1083. DOI: 10.1364/OE.25.001073.
132. Righini G.C., Dumeige Y., Feron P., Ferrari M., Nunzi Conti G., Ristic D., Soria S. Whispering gallery mode microresonators: fundamentals and applications. *La Rivista del Nuovo Cimento*, 2011, **34**, 435–488. DOI: 10.1393/ncr/i2011-10067-2.
133. Chiasera A., Dumeige Y., Feron P., Ferrari M., Jestin Y., Nunzi Conti G., Pelli S., Soria S., Righini G.C. Spherical whispering-gallery-mode microresonators. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, **4** (3), 457–482. DOI: 10.1002/lpor.200910016.
134. Reynolds T., Riesen N., Meldrum A., Fan X., Hall J.M., Monro T.M., François A. Fluorescent and lasing whispering gallery mode microresonators for sensing applications. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, **11** (2), 1600265. DOI: 10.1002/lpor.201600265.
135. Wen S., Zhou J., Zheng K., Bednarkiewicz A., Liu X., Jin D. Advances in highly doped upconversion nanoparticles. *Nature Communications*, 2018, **9** (1), 1–12. DOI: 10.1038/s41467-018-04813-5.
136. Liu Y., Lu Y., Yang X., Zheng X., Wen S., Wang F., Vidal X., Zhao J., Liu D., Zhou Z., Ma C. Amplified stimulated emission in upconversion nanoparticles for super-resolution nanoscopy. *Nature*, 2017, **543** (7644), 229–233. DOI: 10.1038/nature21366.
137. Zhou B., Shi B., Jin D., Liu X. Controlling upconversion nanocrystals for emerging applications. *Nature Nanotechnology*, 2015, **10** (11), 924. DOI: 10.1038/nnano.2015.251.
138. Wang F., Han Y., Lim C.S., Lu Y., Wang J., Xu J., Chen H., Zhang C., Hong M., Liu X. Simultaneous phase and size control of upconversion nanocrystals through lanthanide doping. *Nature*, 2010, **463** (7284), 1061–1065. DOI: 10.1038/nature08777.
139. Wilhelm S. Perspectives for upconverting nanoparticles. *ACS Nano*, 2017, **11** (11), 10644–10653. DOI: 10.1021/acsnano.7b07120.
140. Chan E.M. Combinatorial approaches for developing upconverting nanomaterials: high-throughput screening, modeling, and applications. *Chemical Society Reviews*, 2015, **44** (6), 1653–1679. DOI: 10.1039/C4CS00205A.
141. Liu X., Yan C.H., Capobianco J.A. Photon upconversion nanomaterials. *Chemical Society Reviews*, 2015, **44** (6), 1299–1301. DOI: 10.1039/C5CS90009C.
142. Park S., Mundoor H., Fleury B., Davidson P., Van De Lagemaat J., Smalyukh I.I. Liquid Crystalline Order and Electric Switching of Upconversion Luminescence in Colloidal Nanorod Suspensions. *Advanced Optical Materials*, 2019, **7** (9), 1900041. DOI: 10.1002/adom.201900041.
143. Mundoor H., Smalyukh I.I. Mesoporous composite materials with electrically tunable upconverting properties. *Small*, 2015, **11** (41), 5572–5580. DOI: 10.1002/sml.201501788.
144. Mundoor H., Park S., Senyuk B., Wensink H.H., Smalyukh I.I. Hybrid molecular-colloidal liquid crystals. *Science*, 2018, **360** (6390), 768–771. DOI: 10.1126/science.aap9359.
145. Ye S., Teng Y., Juan A., Wei J., Wang L., Guo J. Modulated Visible Light Upconversion for Luminescence Patterns in Liquid Crystal Polymer Networks Loaded with Upconverting Nanoparticles. *Advanced Optical Materials*, 2017, **5** (4), 1600956. DOI: 10.1002/adom.201600956.
146. Genchi G.G., Marino A., Tapeinos C., Ciofani G. Smart materials meet multifunctional biomedical devices: current and prospective implications for nanomedicine. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2017, **5**, 80. DOI: 10.3389/fbioe.2017.00080.
147. Bhushan B., Gopinath P. Antioxidant nanozyme: a facile synthesis and evaluation of the reactive oxygen species scavenging potential of nanoceria encapsulated albumin nanoparticles. *Journal of Materials Chemistry B*, 2015, **3** (24), 4843–4852. DOI: 10.1039/C5TB00572H.



148. Chen Z., Zhao C., Ju E., Ji H., Ren J., Binks B.P., Qu X. Design of Surface-Active Artificial Enzyme Particles to Stabilize Pickering Emulsions for High-Performance Biphasic Biocatalysis. *Advanced Materials*, 2016, **28** (8), 1682–1688. DOI: 10.1002/adma.201504557.
149. Chen Z., Ji H., Liu C., Bing W., Wang Z., Qu X. A Multinuclear Metal Complex Based DNase-Mimetic Artificial Enzyme: Matrix Cleavage for Combating Bacterial Biofilms. *Angewandte Chemie International Edition*, 2016, **55** (36), 10732–10736. DOI: 10.1002/anie.201605296.
150. Chen Z., Wang Z., Ren J., Qu X. Enzyme mimicry for combating bacteria and biofilms. *Accounts of Chemical Research*, 2018, **51** (3), 789–799. DOI: 10.1021/acs.accounts.8b00011.
151. Bohn D.R., Lobato F.O., Thill A.S., Steffens L., Raabe M., Donida B., Vargas C.R., Moura D.J., Bernardi F., Poletto F. Artificial cerium-based proenzymes confined in lyotropic liquid crystals: synthetic strategy and on-demand activation. *Journal of Materials Chemistry B*, 2018, **6** (30), 4920–4928. DOI: 10.1039/C8TB00479J.

Поступила 14.05.2020 г.

Received 14.05.2020

Принята 04.06.2020 г.

Accepted 04.06.2020