

Выявление оптимальных условий функционирования ЖК-ячеек

Я. В. Барнаш^{1,2,3✉}, А. А. Тягунов¹, Н. В. Каманина^{1,2,3}

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

²АО "НПО Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова",
Санкт-Петербург, Россия

³Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", Гатчина, Россия

✉ barnash.yaroslav@yandex.ru

Аннотация

Введение. Жидкокристаллические (ЖК) ячейки на основе нематических материалов, таких, как 5СВ, широко используются в оптико-электронных устройствах благодаря их высокой чувствительности к внешним воздействиям. Однако эксплуатационные характеристики таких ячеек существенно зависят от условий работы, в том числе от наличия наночастиц в составе. Несмотря на активные исследования влияния электрических полей на ЖК-структуры, комплексный анализ динамики переключения при различных формах управляющих сигналов и добавлении магнитных наночастиц, таких, как CoFe_2O_4 , остается ограниченным. В данной статье рассматривается влияние формы управляющего напряжения на динамический отклик ЖК-композиата с магнитными наночастицами.

Цель работы. Определение оптимальной формы управляющего сигнала, способствующей минимизации времени переключения и обеспечивающей стабильные электрооптические свойства жидкокристаллической ячейки с CoFe_2O_4 .

Материалы и методы. Исследование проводилось на ЖК-ячейке, содержащей нематик 5СВ с равномерно распределенными магнитными наночастицами. Воздействие осуществлялось синусоидальными, прямоугольными и треугольными напряжениями, сгенерированными с помощью функционального генератора. Измерения выполнялись в оптической схеме с лазером, скрещенными поляризаторами и фотодиодом, регистрирующим сигнал на осциллографе.

Результаты. Минимальное время отклика (4 мс) достигалось при синусоидальном сигнале. При прямоугольной форме – 6 мс, при треугольной – 5 мс. Амплитуда сигнала возрастала с длительностью импульса, но скорость переключения оставалась неизменной.

Заключение. Исследование подтвердило, что форма управляющего сигнала существенно влияет на поведение ЖК-ячейки с CoFe_2O_4 . Наиболее эффективной формой сигнала оказалась синусоида, что важно для разработки высокоскоростных оптических устройств нового поколения.

Ключевые слова: жидкокристаллическая ячейка, наночастицы CoFe_2O_4 , электрооптический отклик

Для цитирования: Барнаш Я. В., Тягунов А. А., Каманина Н. В. Выявление оптимальных условий функционирования ЖК-ячеек // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 1. С. 114–125.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-1-114-125

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование частично поддержано за счет гранта Российского научного фонда № 24-23-00021, https://rscf.ru/prjcard_int?24-23-00021.

Благодарности. Авторы благодарят своих сербских коллег (Sonja Jovanović and Zoran Jovanović from Laboratory of Physics, Vinča Institute of Nuclear Sciences – National Institute of the Republic of Serbia, University of Belgrade, Serbia) за предоставление для исследований магнитных наночастиц. Авторы признательны сотрудникам отдела "Фотофизика наноструктурированных материалов и устройств" АО "НПО ГОИ им. С. И. Вавилова" за возможность проведения исследования и обсуждения результатов. Авторы признательны кандидату физ.-мат. наук П. В. Кужакову за помощь в проведении квантово-химических расчетов.

Статья поступила в редакцию 30.06.2025; принята к публикации после рецензирования 07.10.2025; опубликована онлайн 27.02.2026

Determination of Optimal Operating Conditions for Liquid Crystal Cells

Yaroslav V. Barnash^{1,2,3✉}, Alexander A. Tyagunov¹, Natalia V. Kamanina^{1,2,3}

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

²JSC S. I. Vavilov State Optical Institute, Saint Petersburg, Russia

³Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov
of NRC "Kurchatov Institute", Gatchina, Russia

✉ barnash.yaroslav@yandex.ru

Abstract

Introduction. Due to their high sensitivity to external influences, liquid crystal (LC) cells based on nematic materials, such as 5CB, are widely used in optoelectronic devices. However, the performance characteristics of such cells are significantly affected by operating conditions, including the presence of nanoparticles in their composition. Despite extensive research into the influence of electric fields on LC structures, a comprehensive analysis of switching dynamics under different driving signal shapes in the presence of magnetic nanoparticles such as CoFe_2O_4 remains limited. This study set out to investigate the effect of driving voltage waveform on the dynamic response of an LC composite with magnetic nanoparticles.

Aim. To determine an optimal shape of the driving signal that minimizes switching time and ensures stable electro-optical properties of a LC cell with CoFe_2O_4 .

Materials and methods. The study was carried out on an LC cell containing nematic 5CB with uniformly distributed magnetic CoFe_2O_4 nanoparticles. The cell was driven by sinusoidal, rectangular, and triangular voltage signals generated by a function generator. Measurements were performed using an optical setup including a laser source, crossed polarizers, and a photodiode connected to an oscilloscope.

Results. The shortest switching time (4 ms) was achieved with a sinusoidal signal. Rectangular signals produced a 6 ms response, while triangular signals resulted in 5 ms. An increase in the pulse duration led to a greater signal amplitude, having no effect on the switching speed.

Conclusion. The study confirmed that the shape of the driving signal significantly affects the behavior of LC cells with CoFe_2O_4 . The sinusoidal signal was found to be the most effective in terms of response time, which is important for the development of next-generation high-speed optical devices.

Keywords: liquid crystal cell, CoFe_2O_4 nanoparticles, electro-optical response

For citation: Barnash Ya. V., Tyagunov A. A., Kamanina N. V. Determination of Optimal Operating Conditions for Liquid Crystal Cells. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 1, pp. 114–125.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-1-114-125

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. This research was partially supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 24-23-00021, https://rscf.ru/prjcard_int?24-23-00021.

Acknowledgements. The authors thank their Serbian colleagues (Sonja Jovanović and Zoran Jovanović from the Laboratory of Physics, Vinča Institute of Nuclear Sciences – National Institute of the Republic of Serbia, University of Belgrade, Serbia) for providing magnetic nanoparticles for the research. The authors are grateful to the staff of the "Photophysics of Nanostructured Materials and Devices" department of JSC "Vavilov State Optical Institute" for enabling the research and discussing the results. The authors are grateful to P. V. Kuzhakov, Cand. Sci. (Phis.-Math.), for his assistance in performing quantum chemical calculations.

Submitted 30.06.2025; accepted 07.10.2025; published online 27.02.2026

Введение. Жидкокристаллические (ЖК) материалы, в особенности нематические соединения, такие, как 4-пентил-4'-цианофенил (5CB), широко применяются в современных оптоэлектронных и дисплейных технологиях

благодаря их способности быть легко управляемыми внешним воздействием. Этому способствует сам вид нематических молекул в форме неупорядоченных (без внешнего воздействия) нитей (рис. 1).

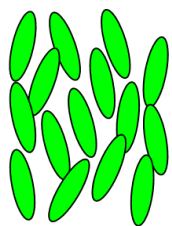


Рис. 1. Вид нематических молекул жидкого кристалла (а); структурная формула нематического жидкого кристалла из группы цианобифенилов (б)

Fig. 1. View of nematic LC molecules (a); structural formula of a nematic LC from the cyanobiphenyl group (δ)

К таким воздействиям можно отнести: термическое, акустическое, магнитное, световое. Особый интерес вызывает процесс управления жидкими кристаллами именно при прохождении через такую мезофазу света [1–3]. Одна из простых схем регистрации прошедшего света через ЖК-мезофазу, в том числе при исследовании временных процессов в эффекте Фредерикса, представлена на рис. 2.

Один из ключевых параметров, определяющих эффективность таких устройств, – время отклика ЖК-ячейки – в частности, время включения, отражающее скорость переориентации молекул под диэлектрическим воздействием за счет подачи управляющего напряжения, и время выключения, что связано с преодолением вязкостных свойств жидких кристаллов после выключения напряжения питания. Поскольку жидкие кристаллы – вязкая система, поворот ЖК-молекул происходит не мгновенно, а за достаточно большое время (единицы или даже десятки миллисекунд). Учет вязкости жидких кристаллов изучается рядом научно-технических групп [4–6]. Так, в [4] довольно глубоко

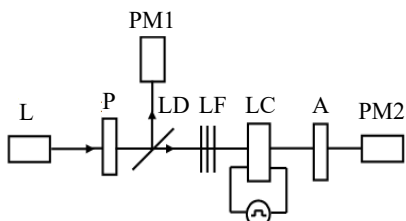


Рис. 2. Один из вариантов схемы управления параметрами ЖК-ячейки: L – лазер; P – поляризатор; LD – делительная пластина; LF – набор светофильтров; А – анализатор; PM1 и PM2 – регистрирующие фотодетекторы

Fig. 2. A variant of the scheme for controlling LC cell parameters:
L – laser; P – polarizer; LD – splitting plate; LF – set of light filters;
A – analyzer; PM1 and PM2 – recording photodetectors

анализируется влияние вязкости на процесс релаксации ЖК-молекул. Устанавливается влияние граничных условий, скорости течения и вращения жидких кристаллов, акцентируется влияние светорассеяния на релаксацию директора жидкого кристалла, учитывается даже размер массы вещества для корректного определения вязкоупругих параметров. В связи с этим одним из ключевых параметров становится антисимметричный тензор вязких напряжений. В [5] ЖК-мезофаза была структурирована углеродными нанотрубками (УНТ) для выяснения механизмов изменения вязкости. Было установлено, что есть две возможные причины, объясняющие, почему вращательная вязкость изменяется в ячейке, сенсibilизированной УНТ. Первая связана с разницей скоростей вращения между чистым нематиком и допирующей примесью. Поскольку на допированную ячейку действует значительное электрическое поле, то как молекулы жидких кристаллов, так и молекулы УНТ испытывают крутящий момент из-за их нетривиальной и разной диэлектрической анизотропии. Различная диэлектрическая анизотропия и неодинаковые динамические отклики в чистых и сенсibilизированных ячейках приводят к изменению вращательной вязкости. Другая возможная причина заключается в том, что смешивание УНТ в жидких кристаллах нарушает параметр порядка ЖК-матрицы, а это в свою очередь изменяет вращательную вязкость материала. Как результат, динамические параметры созданного композита отличаются от изначально существующих значений для матричной основы. В публикации [6] рассмотрено влияние молекулярной массы органического вещества на изменение вязкости, что также полезно учитывать при изучении релаксационных процессов. Показано, что особенности реакции полимеризации при синтезе органического вещества определяют дальнейшее изменение его вязкости.

Перспективны и специфические подходы, рассмотренные в [7–9]. Так, в [7] при использовании ЖК-системы внимание уделяется разработке и усовершенствованию в области интеллектуальных окон с угловой селективностью. Здесь, с особым акцентом на статическое состояние, используются системы гость–хозяин

при введении в жидкие кристаллы определенных красителей. Окна с угловой селективностью предназначены для регулировки своей светопропускаемости в зависимости от угла падающего света, что обеспечивает повышенную энергоэффективность и визуальный комфорт как в лабораторных приборах, так и в автомобильных приложениях. Используя анизотропные поглощающие свойства дихроичных красителей, окна на такой основе могут выборочно блокировать косой солнечный свет, сохраняя четкую видимость с нормальных углов обзора. В [8] предлагается для управления ЖК-слоем использовать нестандартный электрод. Сегментированный по окружности концентрический электрод позволяет создать ЖК-линзу с большой апертурой для решения проблемы отклонения фазы от параболического профиля, вызванного управляющими напряжениями переменного тока. Эта конструкция предлагает простой и эффективный метод реализации ЖК-линз, которые поддерживают стабильный параболический фазовый профиль в более широком диапазоне частот. Анализ показывает, что увеличение количества сегментов электрода приближает распределение напряжения к параболическому профилю. Такой подход также ведет к специфичному управлению ЖК-мезофазой. В [9] описан интерферометр на основе жидкокристаллической мезофазы, что обеспечивает высокую стабильность и четкость изображения.

Оптимизация временных параметров особенно актуальна в условиях, когда требуется высокая скорость переключения и стабильность оптических характеристик. Естественно, зачастую используются классические подходы, связанные с изменением толщины ЖК-слоя, заменой постоянного напряжения питания на импульсное, выбором задержки между засветкой и прикладываемым импульсом напряжения питания, оптимизацией границы раздела фаз при использовании различных ориентирующих покрытий или голографически созданного микрорельефа и др. [3, 10, 11].

Один из перспективных современных подходов к улучшению характеристик ЖК-систем – введение в состав жидкого кристалла наночастиц [13–18]. Так, в [13] проведены исследования оптического пропускания ЖК-слоя при

введении в него многостенных углеродных нанотрубок. Выявлен аномальный характер зависимости пропускания от внешнего управляющего напряжения в скрещенных поляризаторах. В [14] изучалась дифракционная решетка жидких кристаллов с УНТ и был оценен нелинейный рефрактивный параметр, близкий к $5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{Вт}$. В [15] для варьирования свойств жидких кристаллов применены наночастицы TiO_2 , что позволило изучить разницу в рефрактивных параметрах матрицы и вводимых частиц. В [16] на основе жидких кристаллов и кремнеземного волокна создан сенсор для тестирования ацетона в выдыхаемом воздухе. В жидкие кристаллы также вводятся фуллерены, квантовые точки, шунгиты, WS_2 и др. наночастицы, имеющие высокое сродство к электрону. Это позволяет изменять локальную поляризуемость единицы объема такой среды, а следовательно, и макрополяризацию системы в целом, выявлять увеличение светоиндуцированного изменения показателя преломления, тестировать квазипереход из нематика в смектик и др. [17–19]. Часть таких наночастиц показана на рис. 3.

Таким образом, введение разных наночастиц существенно влияет на изменение характеристик ЖК-слоя, в том числе на быстроедействие.

Наиболее интересными в этом контексте являются магнитные наночастицы, такие, как феррит кобальта (CoFe_2O_4), которые обладают высокой магнитной восприимчивостью и могут влиять на структурные и электрооптические свойства ЖК-композиций. Введение таких частиц в матрицу нематика способно изменить вязкость, диэлектрическую проницаемость, порядок ориентации и, как следствие, скорость отклика системы [20, 21]. Исследования показывают, что магнитные наночастицы могут как ускорять, так и замедлять процессы переориентации молекул в зависимости от их концентрации, размера, поверхностной модификации и взаимодействия с жидкокристаллической матрицей [22, 23].

Кроме свойств самой композиции важнейшим фактором, влияющим на динамику отклика ячейки, является форма подаваемого управляющего сигнала; заметим, что такие исследования немногочисленны. В большинстве случаев для включения ЖК-модуляторов применя-

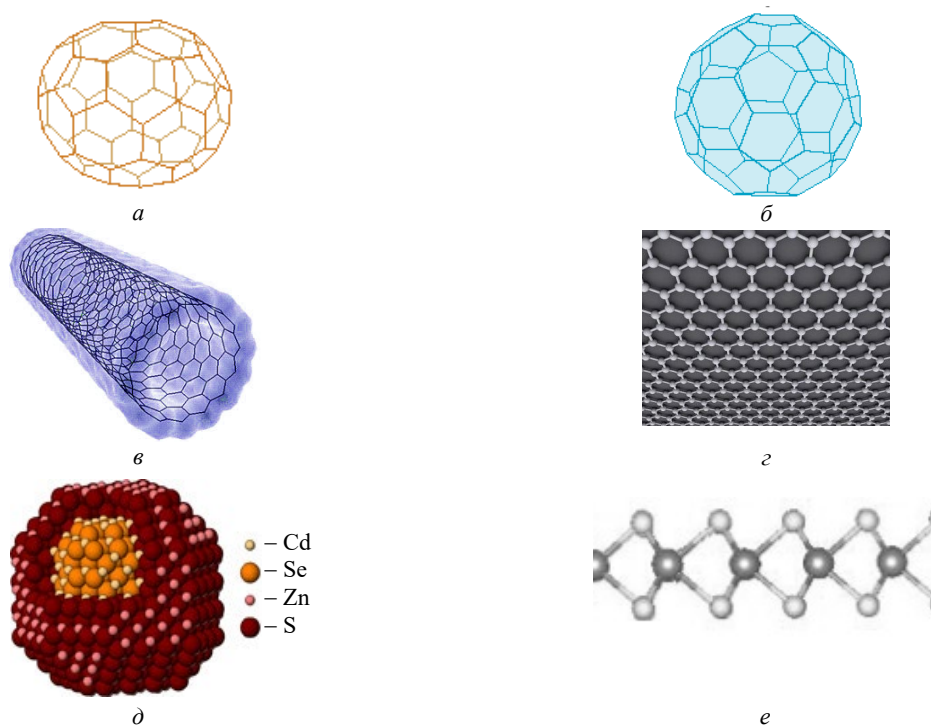


Рис. 3. Наночастицы, используемые при сенсбилизации ЖК-мезофаз: а – фуллерен C₇₀; б – фуллерен C₆₀; в – углеродная нанотрубка; г – графен; д – квантовые точки; е – наночастицы (нанотрубки) MoS₂ или WS₂

Fig. 3. Nanoparticles used in the sensitization of LC mesophases: а – fullerene C₇₀; б – fullerene C₆₀; в – carbon nanotube; г – graphene; д – quantum dots; е – MoS₂ or WS₂ nanoparticles (nanotubes)

ются синусоидальные или прямоугольные сигналы, однако возможны и другие формы, включая треугольную. Каждая форма сигнала по-разному взаимодействует с поляризуемой средой: прямоугольный сигнал позволяет резко изменять напряжение и может вызывать быструю реакцию, тогда как синусоидальный и треугольный обеспечивают более плавное изменение поля, а следовательно, другой отклик ЖК-среды. Итак, комплексные исследования, посвященные сравнительному анализу времени включения при различных формах сигнала в ячейках, модифицированных ферритовыми наночастицами, остаются единичными [25].

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью определения оптимальных условий работы ЖК-ячеек с магнитными наночастицами, направленных на минимизацию времени отклика и повышение стабильности их работы. Полученные результаты могут найти применение при разработке высокоскоростных и энергоэффективных оптоэлектронных устройств нового поколения.

Цель описываемой работы – экспериментально выявить оптимальную форму управляю-

щего сигнала (синусоидальную, прямоугольную или треугольную), обеспечивающую минимальное время включения жидкокристаллической ячейки, модифицированной наночастицами CoFe₂O₄. Для достижения этой цели была проведена серия сравнительных измерений временных характеристик оптического отклика ячеек при воздействии различных типов сигналов с одинаковыми амплитудой и частотой.

Материалы и методы. Для проведения экспериментов использовались композиционные материалы на основе нематической жидкокристаллической структуры с добавлением наночастиц CoFe₂O₄. ЖК-ячейки были изготовлены на основе нематического состава 4-циано-4'-пентилбифенила (5CB), приобретенного у компании Alfa Aesar Co. Для конструирования ЖК-ячейки использовались дополнительные выравнивающие слои. Проводящие покрытия ИТО подвергались обработке CO₂-лазером для создания рельефа, что позволило точно выровнять ЖК-молекулы.

Наночастицы CoFe₂O₄ были синтезированы методом, предложенным в [26], с целью получения неагломерированных частиц с однородной формой, размером и химическими пара-

В описываемой работе для создания однородной ЖК-композиции с повышенной поляризуемостью в матрицу жидких кристаллов было введено 0.1 % наночастиц. Такая массовая доля позволила получить гомогенную композицию, что должно было обеспечить высокую скорость отклика ЖК-ячейки. Кроме того, на основе предыдущих экспериментов было показано, что введение наночастиц CoFe_2O_4 в нематические жидкие кристаллы существенно влияет на его оптические и электрические свойства, включая

В описываемом исследовании композиция 5CB и CoFe_2O_4 была изучена в условиях различных форм, амплитуд, длительностей и частот прикладываемых электрических импульсов.

В качестве источника света в установке использовался красный полупроводниковый лазер с длиной волны $\lambda = 630$ нм и мощностью 200 мВт (модель: LSM-SRA650-200, Китай). Лазер генерировал стабильный узкий пучок, что было необходимо для его прохождения через ЖК-ячейку. Питание лазера обеспечивалось источником постоянного напряжения 12 В, что гарантировало стабильность его работы. Для регулировки интенсивности света применялись нейтральные светофильтры. Лазерный луч поляризовался с использованием поляризатора, размещенного перед жидкокристаллической ячейкой. После ячейки устанавливался анализатор, ориентированный перпендикулярно поляризатору. Это позволяло фиксировать изменения световой интенсивности, обусловленные переориентацией молекул жидких кристаллов в электрическом поле.

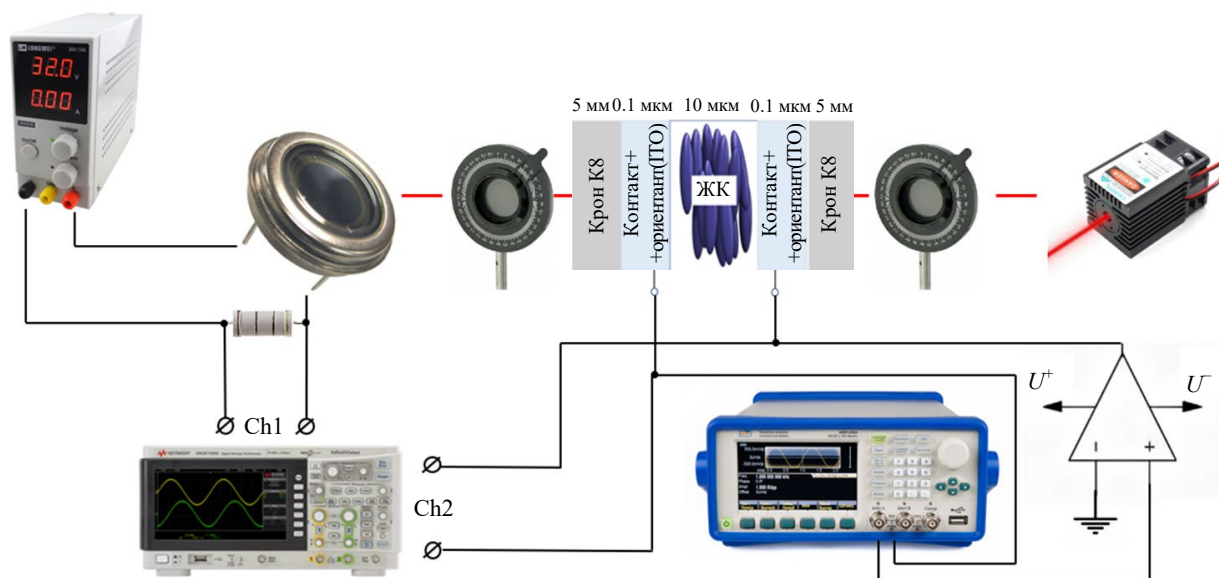


Fig. 4. Experimental setup

Прошедший через анализатор свет детектировался фотодиодом FD-26 (производство России), который преобразовывал оптический сигнал в электрический ток, пропорциональный интенсивности света. Этот ток затем проходил через резистор с напряжением смещения 12 В от источника Xibo XBI3005, преобразуя его в напряжение для регистрации изменений интенсивности света. Далее эти сигналы анализировались с помощью осциллографа.

Сигнал, подаваемый с генератора Tektronix AFG3011C, поступал на неинвертирующий усилитель с операционным усилителем ОРА445. Затем он усиливался до 15 В и подавался на ЖК-ячейку, управляя процессом ориентации молекул.

Система была настроена на регистрацию времени отклика устройства, включая время включения (реакция среды) и время выключения (релаксация) электрооптического отклика.

Для исследования структур использовалось квантово-химическое моделирование. Расчеты были выполнены в программных пакетах GaussView 5.0 и Gaussian 09W [27–29] методом

Хартри–Фока с базисным набором STO-3G (HF/STO-3G SP). Модель жидкого кристалла включала 16 атомов углерода, 1 атом азота и 14 атомов водорода. Модель частицы CoFe_2O_4 состояла из 2 атомов железа, 4 атомов кислорода и 1 атома кобальта.

Результаты. В результате серии экспериментов были получены 4 осциллограммы (рис. 5), иллюстрирующие оптический отклик жидкокристаллической ячейки с наночастицами CoFe_2O_4 при разных формах управляющего сигнала. Во всех случаях период повторения сигналов составлял 40 мс, амплитуда изменялась от 0 до 13 В. Осциллограммы записывались одновременно по двум каналам: второй канал – форма управляющего напряжения после неинвертирующего усилителя (ОРА445), первый канал – напряжение на резисторе смещения фотодиода FD-26, пропорциональное интенсивности прошедшего через ячейку лазерного луча.

На первой осциллограмме виден прямоугольный импульс длительностью 5 мс и пери-

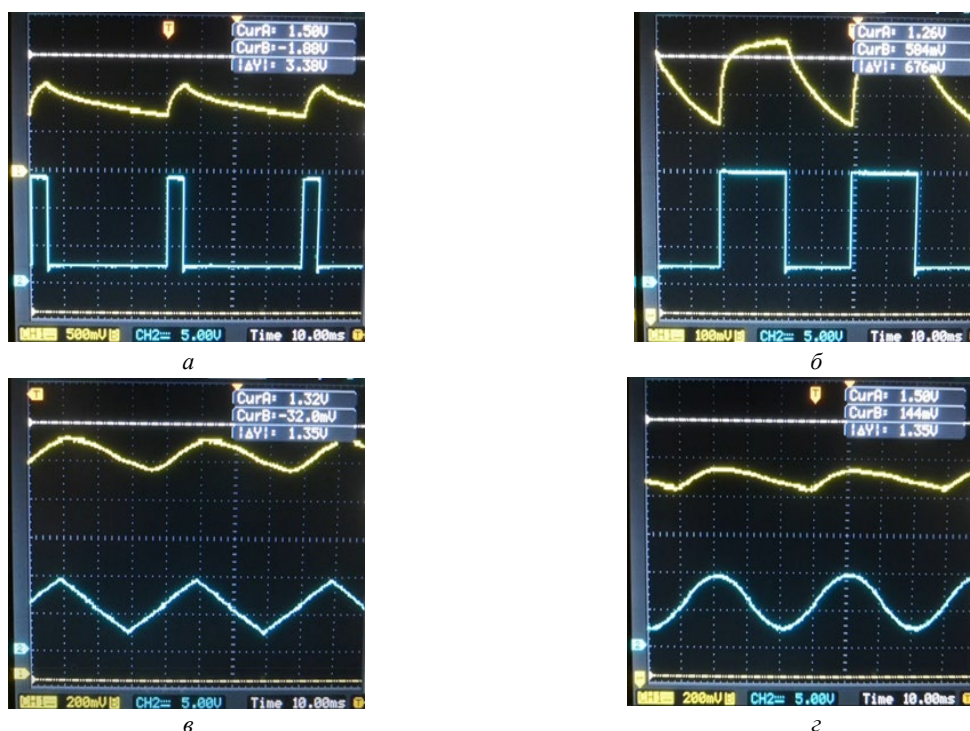


Рис. 5. Осциллограммы отклика жидкокристаллической ячейки при различных формах управляющего сигнала: а – прямоугольный импульс длительностью 5 мс; б – прямоугольный импульс длительностью 20 мс; в – пилообразный сигнал; з – синусоидальный сигнал. Нижний канал на всех осциллограммах – форма управляющего сигнала; верхний канал – отклик жидкокристаллической ячейки, зафиксированный через фотодиод FD-26

Fig. 5. Oscillograms of the LC cell response under different control signal waveforms: а – rectangular pulse with a duration of 5 ms; б – rectangular pulse with a duration of 20 ms; в – sawtooth signal; з – sinusoidal signal. The lower trace in all oscillograms represents the control signal waveform, while the upper trace shows the response of the LC cell recorded via the FD-26 photodiode

одом 40 мс, в ответ на который значение выходного сигнала возрастает от 10 до 90 % за 6 мс. Вторая осциллограмма демонстрирует прямоугольный импульс длительностью 20 мс при том же периоде. Время переходного процесса остается неизменным (6 мс), а максимальный уровень выходного сигнала оказывается более высоким. Третья осциллограмма получена при подаче пилообразного (треугольного) напряжения с линейным нарастанием и спадом в пределах одного периода 40 мс: время включения уменьшилось до 5 мс, однако амплитуда фотодиодного сигнала оказалась несколько сниженной. На четвертой осциллограмме представлен синусоидальный управля-

ющий сигнал с тем же периодом, при котором переход 10...90 % занимает 4 мс, а амплитуда отклика находится между значениями, полученными для треугольного и длительного прямоугольного импульсов.

Заключение и выводы. Сравнение времени включения ячейки при разных формах управляющего сигнала показывает, что наиболее быстрый отклик (4 мс) достигается при синусоидальном сигнале, тогда как прямоугольные импульсы, независимо от их длительности, обеспечивают скорость переключения на уровне 6 мс. Пилообразный сигнал оказывается промежуточным вариантом по скорости (5 мс) и по амплитуде отклика. Увеличение длительности прямоугольного

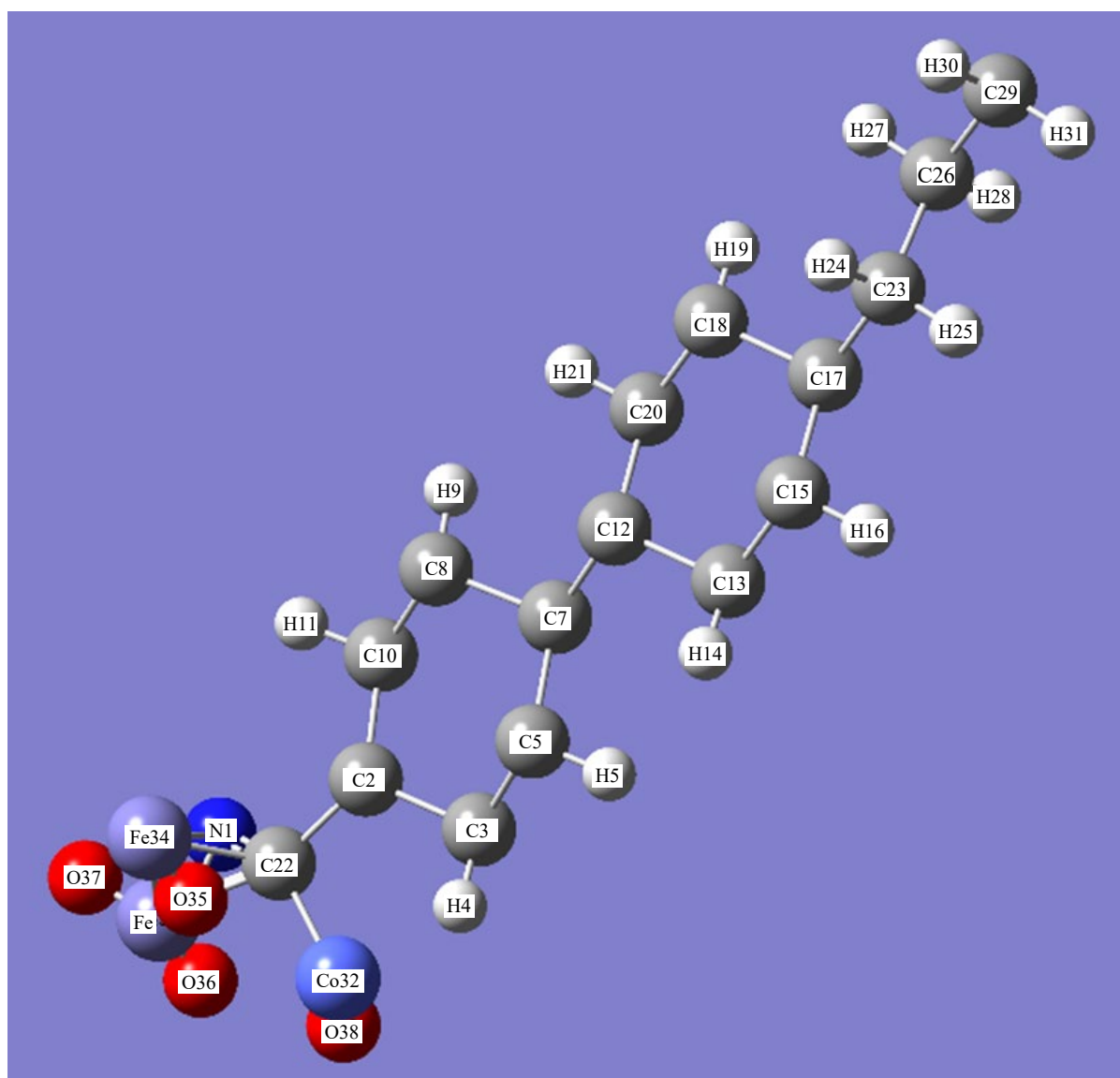


Рис. 6. Квантово-химическое моделирование картины взаимодействия между ЖК-молекулой и наночастицей феррита кобальта

Fig. 6. Quantum chemical simulation of the interaction between an LC molecule and a cobalt ferrite nanoparticle

импульса до 20 мс повышает глубину переориентации молекул (контраст), что подтверждает более высокая амплитуда фотодиодного сигнала, но не влияет на саму скорость включения. Более "мягкое" нарастание электрического поля при треугольном и синусоидальном сигналах снижает вязкое сопротивление в составе ЖК-матрицы с наночастицами CoFe_2O_4 , что сокращает время переходного процесса.

В отличие от классических нематиков без добавок в описываемом случае ферритовые наночастицы варьируют внутреннюю вязкость и создают дополнительные локальные энергетические барьеры, усиливающие эффект замедления при резких импульсах. В то же время при плавном изменении поля эти барьеры становятся менее значимыми, что подтверждается быстрым откликом в синусоидальном режиме. Заметим, что этому способствует и органическое встраивание данного типа сенситизатора (CoFe_2O_4) в нематическую мезофазу. Данные квантово-химического расчета подтверждают процесс комплексообразования в такой системе. На рис. 6 показан вид комплексной системы жидкие кристаллы + наночастица CoFe_2O_4 .

В таблице представлены длины связи между взаимодействующими атомами.

Такое квантово-химическое рассмотрение расширяет базы данных материалов, способных модифицировать базовые параметры жидких кристаллов.

Практическая значимость работы заключается в том, что для систем, где критичным яв-

Длины связи между взаимодействующими атомами
Bond lengths between the interacting atoms

Связь	Длина связи, мкм
$\text{N}_1\text{--Fe}_{34}$	$1.81 \cdot 10^{-4}$
$\text{N}_1\text{--Fe}_{33}$	$1.16 \cdot 10^{-4}$
$\text{N}_1\text{--O}_{35}$	$1.32 \cdot 10^{-4}$
$\text{Fe}_{34}\text{--C}_{22}$	$1.54 \cdot 10^{-4}$
$\text{C}_{22}\text{--O}_{35}$	$1.05 \cdot 10^{-4}$
$\text{O}_{32}\text{--C}_{22}$	$1.58 \cdot 10^{-4}$

ляется время включения (модуляторы, быстродействующие электрооптические элементы), оптимальным вариантом управления будет синусоидальный сигнал, по крайней мере, при сенситизации ЖК-матрицы именно магнитными наночастицами. В задачах, требующих максимального оптического контраста, следует применять прямоугольные импульсы с высоким временем импульса. Треугольный режим можно рекомендовать в качестве компромиссного решения, сочетающего ускоренный отклик и приемлемый уровень сигнала.

Для дальнейших исследований целесообразно изучить влияние концентрации и размера наночастиц CoFe_2O_4 на описанное поведение, а также исследовать скажность и частоту повторения импульсов для выявления возможных накопительных эффектов в электронно-оптическом отклике ЖК-композиата. Кроме того, интерес представляет разработка комбинированных форм управляющего сигнала, объединяющих плавные фронты с плоской вершиной, что может дополнительно оптимизировать баланс между скоростью и контрастом.

Список литературы

1. Пространственные модуляторы света / А. А. Васильев, Д. Касасент, И. П. Компанец, А. В. Парфенов. М.: Радио и связь, 1987. 320 с.
2. Парфенов А. В., Компанец И. Н., Попов Ю. М. Пространственная модуляция света в фоточувствительных высокоразрешающих структурах МДП с жидким кристаллом // Квантовая электроника. 1980. Т. 7, № 2. С. 290–298.
3. Исследование динамических свойств жидкокристаллических оптически управляемых транспарантов / И. И. Кузьмина, А. П. Комаров, В. В. Никитин, А. П. Онохов // Оптический журн. 1993. № 7. С. 49–53.
4. Беляев В. В. Физические методы измерения коэффициентов вязкости нематических жидких кристаллов // Успехи физических наук. 2001. Т. 171, вып. 3. С. 267–298.
doi: 10.3367/UFNr.0171.200103b.0267

5. Chen Hui-Yu, Lee Wei, Clark N. A. Faster electro-optical response characteristics of a carbon-nanotube-nematic suspension // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90, № 3. Art. № 033510.
doi: 10.1063/1.2432294
6. Yang J., Yang D. A Brief Discussion on the Control of PTMEG Molecular Weight and Viscosity // Nanomaterials and Nanotechnology Advances. 2024. Vol. 1, № 1. P. 10–14.
doi: 10.26855/nna.2024.12.003
7. An C.-H., Oh S.-W. Review of Angular-Selective Windows with Guest-Host Liquid Crystals for Static Window Applications // Crystals. 2024. Vol. 14, № 11. Art. № 931.
doi: 10.3390/cryst14110931
8. Feng W. Frequency-stable liquid crystal lenses using a circumferentially segmented concentric electrode // Optics Express. 2024. Vol. 32, № 27. P. 48315–48328.

doi: 10.1364/OE.546602

9. Bag D., Chakraborty S., Sinha A. Nanoscale surface metrology with a liquid crystal-based phase-shifting angular shearing interferometer // *Optics Let.* 2024. Vol. 49, № 7. P. 1705–1708.

doi: 10.1364/OL.514441

10. Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978. 384 с.

11. Каманина Н. В. Временные характеристики нематических жидкокристаллических ячеек с различными ориентирующими покрытиями // *Письма в ЖТФ.* 1996. Т. 22, № 7. С. 53–56.

12. Моделирование дифракции света на структурах с пространственной периодичностью оптических параметров вещества и рельефа поверхности / В. И. Цой, А. В. Тарасишин, В. В. Беляев, С. М. Трофимов // *Оптический журн.* 2003. Т. 70, № 7. С. 18–23.

13. Садовой А. В., Названов В. Ф. Оптическое пропускание диспергированными в полимере жидкими кристаллами с углеродными нанотрубками // *Письма в ЖТФ.* 2006. Т. 32, № 15. С. 30–34.

14. Lee W., Chiu C.-S. Observation of self-diffraction by gratings in nematic liquid crystals doped with carbon nanotubes // *Optics Let.* 2001. Vol. 26, № 8. P. 521–523.

doi: 10.1364/OL.26.000521

15. Electrically switchable photonic crystals based on liquid-crystal-infiltrated TiO_2 -inverse opals / Y. Zhang, K. Li, F. Su, Z. Cai, J. Liu, X. Wu, H. He, Z. Yin, L. Wang, B. Wang, Y. Tian, D. Luo, X. W. Sun, Y. J. Liu // *Optics Express.* 2019. Vol. 27, № 11. P. 15391–15398.

doi: 10.1364/OE.27.015391

16. Liquid-crystal-based fiber laser sensor for non-invasive gas detection / D. Zhou, Q. Wang, Z. Lan, Y. Chen, Z. Peng, L. Zhang, Y. Liu // *Optics Let.* 2023. Vol. 48, № 17. P. 4508–4511.

doi: 10.1364/OL.489552

17. Каманина Н. В. Фуллеренсодержащие диспергированные нематические жидкокристаллические структуры: динамические характеристики и процессы самоорганизации // *Успехи физических наук.* 2005. Т. 175, № 4. С. 445–454.

doi: 10.3367/UFNr.0175.200504f.0445

18. Functional smart dispersed liquid crystals for nano- and biophotonic applications: nanoparticles-assisted optical bioimaging / N. V. Kamanina, S. V. Likhomanova, Y. A. Zubtcova, A. A. Kamanin, A. Pawlicka // *J. of Nanomaterials.* 2016. Vol. 1–4. P. 1–9.

doi: 10.1155/2016/8989250

19. Временные характеристики жидкокристаллической ячейки с наночастицами WS_2 : сенсibilизация мезофазы и особенности рельефа / Н. В. Каманина, Ю. А. Зубцова, А. С. Тойкка, С. В. Лихома-

нова, А. Zak, R. Tenne // *Жидкие кристаллы и их практическое использование.* 2020. Т. 20, № 1. С. 34–40.

doi: 10.18083/LCAppl.2020.1.34

20. Petrescu E., Cirtoaje C., Stan C. Dynamic behavior of a nematic liquid crystal mixed with CoFe_2O_4 ferromagnetic nanoparticles in a magnetic field // *Beilstein J. of Nanotechnology.* 2017. Vol. 8. P. 2467–2473.

doi: 10.3762/bjnano.8.246

21. Influence of a dispersion of magnetic and non-magnetic nanoparticles on the magnetic Fredericksz transition of the liquid crystal 5CB / A. Mouhli, H. Ayeb, T. Othman, J. Fresnais, V. Dupuis, I. R. Nemitz, J. S. Pendery, Ch. Rosenblatt, O. Sandre, E. Lacaze // *Physical Review E.* 2017. Vol. 96, № 1. Art. № 012706.

doi: 10.1103/PhysRevE.96.012706

22. Urbanski M., Lagerwall J. P. F. Nanoparticles dispersed in liquid crystals: impact on conductivity, low-frequency relaxation and electro-optical performance // *J. of Materials Chemistry C.* 2016. Vol. 4, № 16. P. 3485–3491.

doi: 10.1039/C6TC00659K

23. Enhancement of birefringence for liquid crystal with the doping of ferric oxide nanoparticles / P. K. Tripathi, D. P. Singh, T. Yadav, V. Singh, A. K. Srivastava, Y. S. Negi // *Optical Materials.* 2023. Vol. 135. Art. № 113298.

doi: 10.1016/j.optmat.2022.113298

24. Preparation and optical properties of Fe_3O_4 nanoparticles-doped blue phase liquid crystal / W.-L. He, W.-K. Zhang, H. Xu, L.-H. Li, Zh. Yang, H. Cao, D. Wang, Zh.-G. Zheng, H. Yang // *Phys. Chemistry Chemical Physics.* 2016. Vol. 18. P. 29028–29032.

doi: 10.1039/c6cp05421h

25. Барбашов В. А., Ткаченко Т. П., Пожидаев Е. П. Влияние толщины ячейки и формы сигнала на частотные дисперсии диэлектрических характеристик ферроэлектрического жидкого кристалла // *Жидкие кристаллы и их практическое использование.* 2024. Т. 24, № 3. С. 42–51.

doi: 10.18083/LCAppl.2024.3.42

26. Effect of oleic acid concentration on the physicochemical properties of cobalt ferrite nanoparticles / S. Jovanović, M. Spreitzer, M. Tramsšek, Z. Trontelj, D. Suvorov // *J. of Physical Chemistry C.* 2014. Vol. 118, № 25. P. 13844–13856.

doi: 10.1021/jp500578f

27. Бутырская Е. В. Компьютерная химия: Основы теории и работа с программами Gaussian и Gaussview. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011. 224 с.

28. Ochterski J. W. Thermochemistry in Gaussian. Gaussian, Inc., 2000, 19 p.

29. Gaussian 09 Citation. URL: <https://gaussian.com/g09citation/> (дата обращения: 30.01.2026).

Информация об авторах

Барнаш Ярослав Валерьевич – магистр по специальности "Электроника и нанoeлектроника" (2022, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирант кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Младший научный сотрудник Петербургского института ядер-

ной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" (Гатчина). Автор 12 научных работ. Сфера научных интересов – фотоника.
Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: barnash.yaroslav@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3449-9044>

Тягунов Александр Александрович – магистр по специальности "Электроника и нанoeлектроника" (2025, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирант кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – фотоника.
Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: 2001.Alexander.24@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-3905-1218>

Каманина Наталия Владимировна – доктор физико-математических наук (2001), старший научный сотрудник, заведующая лабораторией АО "НПО Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова" (Санкт-Петербург), профессор кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ведущий научный сотрудник Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" (Гатчина). Автор 325 научных публикаций. Сфера научных интересов – фотоника.
Адрес: АО "НПО Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова", ул. Бабушкина, д. 36, к. 1, Санкт-Петербург, 192171, Россия
E-mail: nvkamanina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2903-2685>

References

1. Vasil'ev A. A., Kasasent D., Kompanets I. P., Parfenov A. V. *Prostranstvennye modulyatory sveta* [Spatial Light Modulators]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1987, 320 p. (In Russ.)
2. Parfenov A. V., Kompanets I. N., Popov Yu. M. Spatial Modulation of Light in Photosensitive High-Resolution Metal–Insulator–Semiconductor Structures with Liquid Crystals. *Soviet J. of Quantum Electronics*. 1980, vol. 10, no. 2, pp. 167–171.
doi: 10.1070/QE1980v010n02ABEH009920
3. Kuz'mina I. I., Komarov A. P., Nikitin V. V., Onokhov A. P. *Issledovanie dinamicheskikh svoystv zhidkokristallicheskh opticheskikh upravlyaemykh transparentov* [Investigation of Dynamic Properties of Optically Controlled Liquid Crystal Transparencies]. *Opticheskii Zhurn.* 1993, no. 7, pp. 49–53. (In Russ.)
4. Belyaev V. V. Physical Methods for Measuring the Viscosity Coefficients of Nematic Liquid Crystals. *Physics-Uspokhi*. 2001, vol. 44, no. 3, pp. 255–284.
doi: 10.1070/PU2001v044n03ABEH000831
5. Chen Hui-Yu, Lee Wei, Clark N. A. Faster Electro-Optical Response Characteristics of a Carbon-Nanotube-Nematic Suspension. *Appl. Phys. Lett.* 2007, vol. 90, no. 3, art. no. 033510.
doi: 10.1063/1.2432294
6. Yang J., Yang D. A Brief Discussion on the Control of PTMEG Molecular Weight and Viscosity. *Nanomaterials and Nanotechnology Advances*. 2024, vol. 1, no. 1, pp. 10–14.
doi: 10.26855/nna.2024.12.003
7. An C.-H., Oh S.-W. Review of Angular-Selective Windows with Guest–Host Liquid Crystals for Static Window Applications. *Crystals*. 2024, vol. 14, no. 11, art. no. 931.
doi: 10.3390/cryst14110931
8. Feng W. Frequency-Stable Liquid Crystal Lenses Using a Circumferentially Segmented Concentric Electrode. *Optics Express*. 2024, vol. 32, no. 27, pp. 48315–48328.
doi: 10.1364/OE.546602
9. Bag D., Chakraborty S., Sinha A. Nanoscale Surface Metrology with a Liquid Crystal-Based Phase-Shifting Angular Shearing Interferometer. *Optics Lett.* 2024, vol. 49, no. 7, pp. 1705–1708.
doi: 10.1364/OL.514441
10. Blinov L. M. *Elektro- i magnitooptika zhidkikh kristallov* [Electro- and Magneto-Optics of Liquid Crystals]. Moscow, *Nauka*, 1978, 384 p. (In Russ.)
11. Kamanina N. V. Temporal Characteristics of Nematic Liquid Crystal Cells with Various Alignment Layers. *Technical Physics Lett.* 1996, vol. 22, no. 7, pp. 53–56. (In Russ.)
12. Tsoy V. I., Tarasishin A. V., Belyaev V. V., Trofimov S. M. *Modelirovanie difraktsii sveta na strukturakh s prostranstvennoy periodichnost'yu opticheskikh parametrov veshchestva i reliefa poverkhnosti* [Modeling of Light Diffraction on Structures with Spatial Periodicity of Optical Parameters and Surface Relief]. *J. of Optical Technology*. 2003, vol. 70, no. 7, pp. 18–23. (In Russ.)
13. Sadovoy A. V., Nazvanov V. F. Optical Transmission of Polymer Dispersed Liquid Crystals Doped with Carbon Nanotubes. *Technical Physics Lett.* 2006, vol. 32, no. 8, pp. 659–660.
doi: 10.1134/S1063785006080062
14. Lee W., Chiu C.-S. Observation of Self-Diffraction by Gratings in Nematic Liquid Crystals Doped with Carbon Nanotubes. *Optics Lett.* 2001, vol. 26, no. 8, pp. 521–523.
doi: 10.1364/OL.26.000521

15. Zhang Y., Li K., Su F., Cai Z., Liu J., Wu X., He H., Yin Z., Wang L., Wang B., Tian Y., Luo D., Sun X. W., Liu Y. J. Electrically Switchable Photonic Crystals Based on Liquid-Crystal-Infiltrated TiO_2 -Inverse Opals. *Optics Express*. 2019, vol. 27, no. 11, pp. 15391–15398.
doi: 10.1364/OE.27.015391
16. Zhou D., Wang Q., Lan Z., Chen Y., Peng Z., Zhang L., Liu Y. Liquid-Crystal-Based Fiber Laser Sensor for Non-Invasive Gas Detection. *Optics Lett.* 2023, vol. 48, no. 17, pp. 4508–4511.
doi: 10.1364/OL.489552
17. Kamanina N. V. Fullerene-Dispersed Nematic Liquid Crystal Structures: Dynamic Characteristics and Self-Organization Processes. *Physics-Uspekhi*. 2005, vol. 48, no. 4, pp. 419–427.
doi: 10.1070/PU2005v048n04ABEH002101
18. Kamanina N. V., Likhomanova S. V., Zubitskaya Y. A., Kamanin A. A., Pawlicka A. Functional Smart Dispersed Liquid Crystals for Nano- and Biophotonic Applications: Nanoparticles-Assisted Optical Bioimaging. *J. of Nanomaterials*. 2016, vol. 1–4, pp. 1–9.
doi: 10.1155/2016/8989250
19. Kamanina N. V., Zubitskaya Yu. A., Toykka A. S., Likhomanova S. V., Zak A., Tenne R. Temporal Characteristics of Liquid Crystal Cell with WS_2 Nanoparticles: Mesophase Sensitization and Relief Features. *Liquid Crystals and their Application*. 2020, vol. 20, no. 1, pp. 34–40. (In Russ.)
doi: 10.18083/LCAppl.2020.1.34
20. Petrescu E., Cirtoaje C., Stan C. Dynamic Behavior of a Nematic Liquid Crystal Mixed with CoFe_2O_4 Ferromagnetic Nanoparticles in a Magnetic Field. *Beilstein J. of Nanotechnology*. 2017, vol. 8, pp. 2467–2473.
doi: 10.3762/bjnano.8.246
21. Mouhli A., Ayeb H., Othman T., Fresnais J., Dupuis V., Nemitz I. R., Pendery J. S., Rosenblatt Ch., Sandre O., Lacaze E. Influence of a Dispersion of Magnetic and Non-Magnetic Nanoparticles on the Magnetic Fredericksz Transition of the Liquid Crystal 5CB. *Physical Review E*. 2017, vol. 96, no. 1, art. no. 012706.
doi: 10.1103/PhysRevE.96.012706
22. Urbanski M., Lagerwall J. P. F. Nanoparticles Dispersed in Liquid Crystals: Impact on Conductivity, Low-Frequency Relaxation and Electro-Optical Performance. *J. of Materials Chemistry C*. 2016, vol. 4, no. 16, pp. 3485–3491.
doi: 10.1039/C6TC00659K
23. Tripathi P. K., Singh D. P., Yadav T., Singh V., Srivastava A. K., Negi Y. S. Enhancement of Birefringence for Liquid Crystal with the Doping of Ferric Oxide Nanoparticles. *Optical Materials*. 2023, vol. 135, art. no. 113298.
doi: 10.1016/j.optmat.2022.113298
24. He W.-L., Zhang W.-K., Xu H., Li L.-H., Yang Zh., Cao H., Wang D., Zheng Zh.-G., Yang H. Preparation and Optical Properties of Fe_3O_4 Nanoparticles-Doped Blue Phase Liquid Crystal. *Phys. Chemistry Chemical Physics*. 2016, vol. 18, pp. 29028–29032.
doi: 10.1039/c6cp05421h
25. Barbashov V. A., Tkachenko T. P., Pozhidaev E. P. The Influence of Cell Thickness and Driving Voltage Shape on the Frequency Dispersions of Dielectric Characteristics of Ferroelectric Liquid Crystal. *Liquid Crystals and their Application*. 2024, vol. 24, no. 3, pp. 42–51. (In Russ.)
doi: 10.18083/LCAppl.2024.3.42
26. Jovanović S., Spreitzer M., Tramšek M., Trontelj Z., Suvorov D. Effect of Oleic Acid Concentration on the Physicochemical Properties of Cobalt Ferrite Nanoparticles. *J. of Physical Chemistry C*. 2014, vol. 118, no. 25, pp. 13844–13856.
doi: 10.1021/jp500578f
27. Butyrskaya E. V. *Komp'yuternaya khimiya: Osnovy teorii i rabota s programmami Gaussian i Gaussview* [Computational Chemistry: Basic Theory and Working with Gaussian and Gaussview Programs]. Moscow, *SOLOON-PRESS*, 2011, 224 p. (In Russ.)
28. Ochterski J. W. *Thermochemistry in Gaussian*. Gaussian, Inc., 2000, 19 p.
29. Gaussian 09 Citation. Available at: <https://gaussian.com/g09citation/> (accessed: 30.01.2026).

Information about the authors

Yaroslav V. Barnash, Master's degree in Electronics and nanoelectronics (2022, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate student of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. Junior Researcher in Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of NRC "Kurchatov Institute" (Gatchina). The author of 12 scientific publications. Area of expertise: photonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: barnash.yaroslav@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3449-9044>

Alexander A. Tyagunov, Master's degree in Electronics and nanoelectronics (2025, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate student of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: photonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: 2001.Alexander.24@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0007-3905-1218>

Natalia V. Kamanina, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2001), Senior Researcher, Head of Laboratory of JSC S. I. Vavilov State Optical Institute, Professor of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University; Leading Researcher in Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of NRC "Kurchatov Institute" (Gatchina). The author of 325 scientific publications. Area of expertise: photonics.

Address: JSC S. I. Vavilov State Optical Institute, 36/1, Babushkina St., St Petersburg 192171, Russia

E-mail: nvkamanina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2903-2685>