

**Физика**

**Научная статья**

УДК: 535.012.2:544.252.2:530.182:530.145.81

**МОДЕЛЬ ОПТИЧЕСКИХ СОЛИТОНОВ В ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ**

Виктор Васильевич Беляев<sup>1,2\*</sup>, Тимур Фянович Камалов<sup>2</sup>, Юрий Тимурович Камалов<sup>2</sup>,  
Андрей Дмитриевич Латипов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Российский университет дружбы народов, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Государственный университет просвещения, Москва, Россия*

---

**ИНФОРМАЦИЯ**

**История статьи:**

Поступила 9.09.2024

Одобрена 7.10.2024

Принята 6.02.2025

**Ключевые слова:**

жидкий кристалл,  
оптический солитон,  
квантовые вычисления,  
бифотон,  
нелинейная оптика

**АННОТАЦИЯ**

Рассмотрены условия формирования в слое жидкого кристалла (ЖК) солитона для генерации пары фотонов в запутанном квантовом состоянии (бифотонов) при выполнении квантовых вычислений. Выполнена оценка геометрических размеров солитона, генерируемого импульсом оптического излучения, его динамики и стабильности с использованием знаний о физических параметрах жидкого кристалла и его нелинейно оптических свойств. В нематических ЖК можно реализовать одиночные солитоны с пространственным размером в несколько десятков микрометров и меньше, временем формирования от миллисекунд до десятков миллисекунд и временем существования от долей миллисекунды до сотен миллисекунд. Рассмотрена возможность перекрытия соседних в пространстве или времени оптических солитонов (или областей внутри слоя ЖК, в которых возникает индуцируемая полем световой волны деформация от последовательных световых импульсов). На этой основе можно «кодировать» запутанные состояния с высоким уровнем различения сигналов и осуществлять квантовые вычисления.

---

**DOI:**

**10.18083/LCApl.2025.1.80**

**EDN:**

**<https://elibrary.ru/brvkfk>**

---

**Для цитирования:**

Беляев В. В., Камалов Т. Ф., Камалов Ю. Т., Латипов А. Д. Модель оптических солитонов в жидких кристаллах // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2025. Т. 25, № 1. С. 80–89.

*Physics*

*Research Article*

**MODEL OF OPTICAL SOLITONS IN LIQUID CRYSTALS**

Victor V. Belyaev<sup>1,2\*</sup>, Timur F. Kamalov<sup>2</sup>, Yuri T. Kamalov<sup>2</sup>, Andrey D. Latipov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>RUDN University – Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

<sup>2</sup>State University of Education, Moscow, Russia

**ARTICLE INFO:**

**ABSTRACT**

**Article history:**

Received 9 September 2024

Approved 7 October 2024

Accepted 6 February 2025

**Key words:**

liquid crystal,  
optical soliton,  
quantum calculations,  
biphoton,  
non-linear optics

The conditions of soliton formation in a liquid crystal (LC) layer for generation of a pair of photons in an entangled quantum state (biphoton) during quantum calculations are considered. The geometrical dimensions of the soliton generated by a pulse of optical radiation, its dynamics and stability are estimated by using the knowledge of physical parameters as well as its non-linear optical properties of the liquid crystal. In nematic LCs, the realisation of single solitons with a spatial size of several tens of micrometers or even less is possible. The formation time of these solitons can be from fractions of a millisecond to tens of milliseconds, and their existence time ranges from fractions of a millisecond to hundreds of milliseconds. A possibility of overlapping of neighboring in space or time optical solitons (or regions inside the liquid crystal layer, in which the deformation is induced by the light wave field from successive light pulses) is considered. On this basis it is possible to "encode" entangled states with high distinction level of signal and to carry out quantum calculations.

**DOI:**

10.18083/LCAppl.2025.1.80

**EDN:**

<https://elibrary.ru/brvkfk>

**For citation:**

Belyaev V. V., Kamalov T. F., Kamalov Yu. T., Latipov A. D. Model of optical solitons in liquid crystals. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2025, **25** (1), 80–89 (in Russ.).

## Введение

Одной из важных проблем современной теоретической физики является создание научных основ алгоритмов и элементной базы квантовых компьютеров [1–6].

Одним из возможных направлений выполнения квантовых вычислений является использование кубитов на основе пары фотонов в запутанном квантовом состоянии (бифотона) в нелинейной среде, запутанных по поляризации. Одиночный фотон, входя в нелинейно-оптическую среду, конвертируется (превращается) в два фотона с частотой в два раза меньше в зависимости от вида кристалла или геометрии эксперимента. Световые пучки, соответствующие такой паре фотонов, имеют взаимно ортогональные поляризации. Если воздействовать на состояние поляризации одного из сгенерированных фотонов, то у другого его поляризация мгновенно изменится, оставаясь ортогональной по отношению к первому. Такая система называется бифотоном, а связь между двумя сгенерированными фотонами – сцепленностью или связанностью (*entanglement*).

Согласно требованиям ди-Винченцо, предъявляемым к кубитам квантовых компьютеров, характеристики кубитов на основе бифотонов не уступают по параметрам кубитам, построенным на основе других физических реализаций, таких как кубиты на квантовых точках, на ионных ловушках, на сверхпроводимости и др. Поэтому актуальной задачей является создание надежных, экономичных, простых по технологии элементов для выполнения квантовых вычислений с кубитами на основе пар фотонов, имеющих запутанные поляризации.

Известны решения спонтанного параметрического рассеяния света, в которых используются нелинейно оптические кристаллы различного состава: бета-барий борат  $Ba(BO_2)_2$  (в англоязычной литературе *Beta Barium Borate (BBO)*), периодически поляризованный титанил фосфат калия  $KTiOPO_4$  (в англоязычной литературе *Periodically Poled Potassium Titanyl Phosphate (PPKTP)*), триборат лития  $LiB_3O_5$  (в англоязычной литературе *lithium triborate (LBO)*) и другие материалы [7–11]. При падении некоторого фотона с заданной модой накачки в квадратично нелинейной среде из ультрафиолетового (УФ) диапазона могут рождаться два фотона, называемые основным и сигнальным, с запутанными поляризациями. При таком процессе вследствие нелинейно-оптического эффекта в этом случае может происходить удвоение длины

волны выходящих фотонов (конверсия УФ-диапазона в красный), суммарные энергия и импульс которых равны энергии и импульсу входных фотонов.

Трудностями при использовании таких элементов являются высокие требования к изготовлению подходящего образца нелинейно-оптического кристалла, к защите кристалла от параметров окружающей среды, вследствие чувствительности оптических и механических характеристик кристалла к влажности и температуре, необходимость использования высокоэнергетического инфракрасного или ультрафиолетового облучения для накачки кристалла, что приводит к необходимости использования средств защиты для пользователя, использование высокого напряжения при работе кристалла в электрооптическом режиме, что ограничивает применение элемента в квантовых компьютерах. Например, в [7] для формирования импульсов 500 мВт длительностью 200 фс на длине волны 400 нм используется удвоение частоты титан-сапфирового лазера с излучением на длине волны 800 нм мощностью 1,5 Вт с частотой повторения импульсов 76 МГц при облучении кристалла ВВО толщиной 2 мм. Аналогичные условия приведены для генерации бифотона в системе с двумя ортогонально ориентированными кристаллами ВВО толщиной по 0,5 мм [8]. При этом величина расхождения двух лучей с ортогональными поляризациями составляла всего  $0,03154^\circ$ .

В работе [12] предложен вариант описания бифотонов в виде пар запутанных по поляризации оптических солитонов с целью применения алгоритмов квантовых вычислений при использовании вместе с нелинейно-оптическим кристаллом ВВО жидкокристаллических ячеек. Возможность конверсии падающего излучения с удвоением длины волны показана в [13–16]. Следующим этапом может стать дальнейшее практическое использование ЖК-элементов для квантовых вычислений.

Для этой задачи необходимо выполнить комплекс работ по формированию оптического элемента на основе жидких кристаллов с учетом особенностей ЖК (симметрия, анизотропия физических свойств, ориентация, взаимодействие с внешним электрическим полем, в том числе полем световой волны, нелинейно-оптические свойства ЖК и ряд других). Общая идея этих работ представлена в заявке на патент Российской Федерации [17]. По всем видам работ выполняется комплексное исследование.

Поэтому в настоящей работе мы ограничились целью описания формирования оптического солитона в жидком кристалле при реализации нелинейно-оптического эффекта, описания его геометрических параметров, динамики, устойчивости к излучению.

### Теоретическая модель оптического солитона в кристалле

Сначала опишем оптические солитоны в кристалле, не конкретизируя их и используя формализм [18–22]. Примем расположение центров оптических солитонов не в узлах кубической решетки, а будем считать их распределенными случайно. При такой реализации предположим, что вещественное поле  $\phi$  описывает  $n$  солитонов

$$\phi(t, r) = \sum_{k=1}^n \phi^{(k)}(t, r), \quad (1)$$

где  $\text{supp } \phi^{(k)} \cap \text{supp } \phi^{(k')} = 0, k \neq k'$ , и то же самое верно для канонических импульсов:

$$\pi(t, r) = \partial \mathcal{L} / \partial \phi_t = \sum_{k=1}^n \pi^{(k)}(t, r),$$

где  $\mathcal{L}$  обозначает лагранжиан плотность для поля  $\phi$ . Определим вспомогательные функции

$$\phi^k(t, r) = \frac{1}{\sqrt{2}} (v_k \phi^{(k)} + i \pi^{(k)} / v_k) \quad (2)$$

с константами  $v_k$ , удовлетворяющими условию нормировки

$$\hbar = \int d^3x |\phi^{(k)}|^2.$$

В [18, 19] предложена оптическая солитонная модель бифотонов для описания их квантовых корреляций поляризаций при влиянии случайных воздействий

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{2}} (v \vec{A} + \frac{i}{v} \pi), \quad \pi = -\varepsilon \vec{E},$$

$$\phi^{(12)}(t, z_1, z_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} [\phi_L(t, -z_1) \otimes \phi_R(t, z_2) - \phi_R(t, -z_1) \otimes \phi_L(t, z_2)], \quad (3)$$

где  $\phi_L$  обозначает левую поляризацию, а  $\phi_R$  – правую поляризацию.

Теперь рассмотрим, что происходит с жидким кристаллом вследствие падения мощного светового пучка на слой ЖК (рис.).

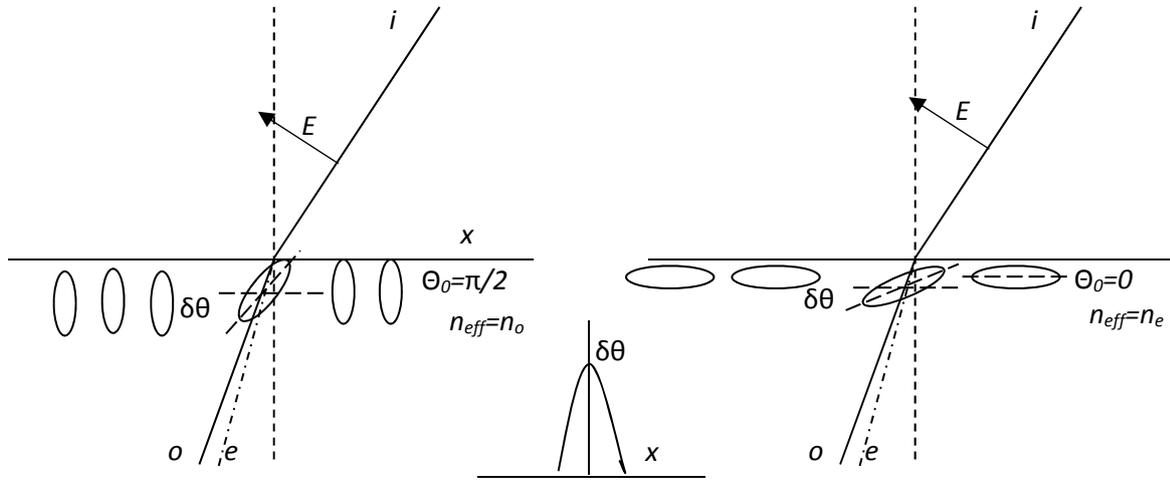


Рис. Образование оптического солитона в слое ЖК с гомеотропной (вертикальной) ориентацией (слева) или планарной (справа) Луч света  $i$  падает на границу раздела воздух–ЖК.  $E$  – напряженность электрического поля световой волны. Вследствие взаимодействия поля со средой в ЖК возникает отклонение угла директора ЖК  $\delta\theta$ . На вставке между двумя геометриями ячейки схематически показано распределение значений этого отклонения по координате  $x$  в плоскости раздела

Fig. Formation of the optical soliton in the LC layer with a homeotropic (vertical), on the left, or planar, on the right, orientations. A beam of light  $i$  is incident onto the air-LC interface.  $E$  is the electric field strength of the light wave. Due to the interaction of the field with the medium, a deviation of the LC director angle  $\delta\theta$  occurs in the LC. The inset between the two cell geometries schematically shows the distribution of the values of this deviation along the  $x$  coordinate in the interface plane

Пусть пучок света  $i$  с малой апертурой (сечением) наклонно падает на слой ЖК с начальной гомеотропной (вертикальной) или планарной ориентацией (рисунки слева и справа, соответственно). Буквой  $E$  обозначена напряженность электрического поля световой волны, буквой  $\theta$  – угол наклона ЖК. Проекция вектора  $E$  составляет угол  $45^\circ$  с обоими горизонтальными направлениями поверхности раздела. Вследствие взаимодействия поля со средой в ЖК возникает отклонение угла директора ЖК  $\delta\theta$ , а из-за нелинейно-оптических свойств ЖК каждый фотон падающего света с некоторой частотой генерирует два фотона с взаимно ортогональными поляризациями и частотой в два раза больше или в два раза меньше в зависимости от типа нелинейно-оптического эффекта. На рисунке деформация ЖК показана схематически на поверхности раздела, хотя она может распространяться и в объем ЖК.

Пионерскими работами по нелинейно-оптическим свойствам ЖК, в частности по генерации второй оптической гармоники, являются статьи [23–25]. Теоретическим обоснованием эффекта в жидком кристалле как centrosymmetric среде стала работа [26] с привлечением представлений о мультипольном механизме удвоения частоты света.

В [27] отмечено, что преобразование частоты может быть связано с изменением симметрии поля директора в нематическом или смектическом ЖК из-за эффекта светоиндуцированной переориентации. В этой статье отмечается, что удвоение частоты оптического излучения в однородно ориентированном НЖК возможно только благодаря электродипольной нелинейно-оптической восприимчивости, которая меньше электро-дипольной примерно на два порядка. Реализация эффекта удвоения частоты оптического излучения на электродипольной нелинейности возможна только при нарушении инверсионной симметрии НЖК, например, воздействием внешнего электрического поля. Правда, необходимы исследования возможности генерации бифотонов с частотой, меньше частоты первичного пучка. В [28] сообщается о формировании бифотона в образце сегнетоэлектрического НЖК методом спонтанного четырех-волнового смешения (или спонтанного параметрического понижающего преобразования). В [4, 29] описаны проблемы управления спектром бифотонных полей в кристаллах.

Будем считать эту область со светоиндуцированной деформацией оптическим солитоном, генерирующим бифотон. Из-за вязкоупругих свойств ЖК такая деформация распространяется

по поверхности и в объеме слоя ЖК. Ниже мы оценим размер и динамику этой области. На вставке между иллюстрациями обеих геометрий ЖК-ячейки схематически показано распределение значений этого отклонения (угол  $\delta\theta$ ) по координате  $x$  в плоскости раздела от максимальной величины в центре области, соответствующей месту падения светового луча, до нуля (рис.).

Рассмотрим изменение параметров ЖК-среды с произвольным распределением директора ЖК под действием оптического излучения.

Уравнение электрического поля для входного поляризованного света  $E$  [30] по отношению к углу директора НЖК описывается выражением:

$$i \frac{\partial E}{\partial z} + \frac{1}{2} \nabla^2 E - \cos 2\phi E = 0;$$

$$v \nabla^2 \phi + q \cos(2\phi + 2\psi) + 2|E^2| \sin(2\phi) = 0, \quad (4)$$

где  $q$  – относительная напряженность внешнего электрического поля, угол  $\psi$  – угол падения задается наклоном статического электрического поля по отношению направления распространения, угол  $\phi$  – азимутальный угол между проекциями направления поля  $E$  и директора ЖК,  $v$  – канонический импульс. Тогда описание упрощается для напряженности  $E$  и нулевых значений угла  $\psi$ :

$$i \frac{\partial E}{\partial z} + \frac{1}{2} \nabla^2 E + \sin 2\theta E = 0;$$

$$v \nabla^2 \theta + q \sin(2\theta) + 2|E^2| \cos(2\theta) = 0. \quad (5)$$

С учетом близости граничных условий к нулю (например, планарные граничные условия), когда  $r$  – радиус-вектор положения солитона стремится к бесконечности, уравнение директора может быть выражено в виде:

$$-q \sin(2\theta) + 2|E^2| \cos(2\theta) = 0,$$

$$\tan(2\theta) = \frac{2|E^2|}{q}, \quad (6)$$

что приводит нас к нелинейному уравнению Шрёдингера:

$$i \frac{\partial E}{\partial z} + \frac{1}{2} \nabla^2 E + \frac{2|E^2|E}{(q^2 + 4|E^4|)^{1/2}} = 0. \quad (7)$$

Получаемое электрическое поле световой волны взаимодействует с жидким кристаллом, вызывая его переориентацию. Примеры такого взаимодействия и теоретического описания деформации поля директора ЖК под действием электрического поля с учетом комплекса физических параметров ЖК (коэффициенты упругости по Франку, диэлектрические постоянные и показатели преломления с учетом их анизотропии и др.) приведены в [27, 30].

Тогда для солитон-подобного импульса можно написать [31]:

$$E(0, r) = A \operatorname{sech} \frac{r}{w}, \quad (8)$$

где  $r$  – радиальная координата, а  $w$  – ширина солитона.

### Оценка параметров солитона в слое жидкого кристалла

Выполним оценку параметров такого солитона в ЖК, используя простые модели переориентации ЖК во внешнем электрическом поле. Для описания поведения оптических солитонов в нематическом жидком кристалле (НЖК), рассмотрим параметры части объема ЖК, подвергающегося воздействию мощного оптического излучения. Процесс формирования оптических солитонов определяется увеличением показателя преломления НЖК с увеличением интенсивности света. Зависимость показателя преломления НЖК  $n$  от интенсивности света  $I$  выражается простым соотношением нелинейной оптики [13]:

$$n = n_0 + n_2 I, \quad (9)$$

где  $n_0$  – показатель преломления ЖК в отсутствие интенсивного излучения, а  $n_2$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от нелинейной восприимчивости (гиперполяризуемости) второго порядка. У типичных НЖК величина  $n_2 \approx 10^{-9} - 10^{-8} \text{ м}^2/\text{Вт}$  при выражении интенсивности через плотность мощности светового пучка, а гиперполяризуемость второго и третьего порядка составляют  $\chi^{(2)} \sim 10^{-10} \text{ СГСЭ}$  ( $4 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}$ ),  $\chi^{(3)} \sim 10^{-15} \text{ СГСЭ}$  ( $4 \cdot 10^{-17} \text{ м/В}$ ), как и у большинства молекулярных жидкостей [32]. В свою очередь, нелинейная восприимчивость зависит от фазового состояния вещества и температуры [15] и для типичного НЖК может меняться в пределах от  $\chi^{(3)} \sim 10^{-12}$  до  $10^{-7} \text{ СГСЭ}$  ( $4 \cdot 10^{-14} \text{ м/В} - 4 \cdot 10^{-9} \text{ м/В}$ ).

Величина коэффициента  $n_2$  зависит от физических параметров НЖК [33, 34]:

$$n_2 = (\Delta \varepsilon n)^2 / (24 \varepsilon_{\parallel}^2 K c), \quad (10)$$

где  $\varepsilon_{\parallel}$ ,  $\varepsilon_{\perp}$  – компоненты диэлектрической проницаемости ЖК, соответственно, параллельная и перпендикулярная его директору (направлению преимущественной ориентации),  $\Delta \varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$  – анизотропия диэлектрической проницаемости,  $n$  – показатель преломления ЖК (обычно  $n_0$  – показатель преломления для обыкновенного луча),  $L$  – толщи-

на образца ЖК (размер вдоль прохождения луча),  $K$  – коэффициент упругости Франка, описывающий изменение ориентации ЖК при воздействии внешнего поля,  $c$  – скорость света.

Под действием электрического поля световой волны изменение угла ориентации  $\theta$  ЖК составляет  $\delta \theta = I \Delta \varepsilon (L/\pi)^2 (2Kcn)$ .

Для типичных параметров ЖК ( $I \sim 10^8 \text{ Вт м}^{-2}$ ,  $\Delta \varepsilon \sim 10$  в низкочастотной области и  $\Delta \varepsilon \sim 0,3-1$  в области оптических частот,  $L \sim 0,1 \text{ мм}$ ,  $K \sim 10^{-11} \text{ Н}$ ,  $n \sim 1,5$ ) эта величина составляет порядка  $0,001$  рад. С учетом возможных флуктуаций интенсивности этот параметр с трудом регистрируется оптическими методами. Поэтому в эксперименте приходится увеличивать толщину ЖК-ячейки и мощность светового пучка. При  $I \sim 10^9 \text{ Вт м}^{-2}$  и  $L \sim 50 \text{ мкм}$  значение  $\delta \theta$  может составить  $0,005$  рад ( $\sim 0,3^\circ$ ), тогда величина деформации слоя ЖК может дать дискретные значения фазовой задержки двух генерируемых поляризованных лучей, соответствующие разным квантовым состояниям при квантовых вычислениях.

Размер области в слое ЖК, деформированной под воздействием электрического поля световой волны, несколько превышает толщину слоя ЖК и размер светового пучка вследствие учета упругости ЖК. В [35] показано, что при формировании дифракционной решетки с периодом  $36$  и  $75 \text{ мкм}$  внутри слоя ЖК под действием излучения мощностью  $0,56 \text{ мДж см}^{-2}$  длительностью от  $50$  до  $160 \text{ мс}$  размер переходной области составляет  $10-20 \%$  от расстояния между элементами решетки. Тогда изменение показателя преломления при изменении энергии пучка  $E$  от  $0,05$  до  $0,6 \text{ мДж см}^{-2}$  составило  $0,05$ . При длительности лазерного импульса  $0,4 \text{ нс}$  и значении коэффициента в выражении (9)  $n_2 \sim 4 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{Вт}$  изменение показателя преломления в зависимости от энергии пучка составляет  $\delta n = -0,00465 + 0,0902 E$ , т.е.  $n_2 = 90,2 \text{ м}^2/\text{Дж}$ .

Размер области деформации, внутри которой показатель преломления ЖК отличается от начального, равен  $1,2 L$ .

С учетом описанных величин размер возмущения слоя ЖК под действием светового излучения оценивается размером и динамикой оптического солитона. С учетом формы солитон-подобного импульса в виде (6) ширина солитона приблизительно равна размеру деформированной области ЖК.

Оценивая возможную динамику фотонов в ЖК с помощью оптических солитонов запуск таких световых импульсов с определенными значениями фазовой задержки соответствует разным квантовым состояниям. При формировании одного бифотона, задаваемого оптическим солитоном с некоторым определенным квантовым состоянием, следующий бифотон может быть сгенерирован, если первый солитон релаксировал до начального состояния.

Время релаксации при деформации ЖК составляет  $\tau_{rel} \sim 0,1 \eta L^2/K$  ( $\eta$  – эффективная величина вращательной вязкости НЖК), для оптического отклика оно в два раза меньше. При этом уровень 1/10 от величины начального пропускания достигается за время примерно в 2 раза меньшее. Кроме того, время формирования солитона на порядок меньше времени релаксации, так как оно обратно пропорционально напряженности электрического поля, в данном случае поля световой волны. Поэтому оценка времени обновления солитона  $\tau \sim 0,1 \eta L^2/K$  является физически обоснованной. Если  $\eta \sim 0,2$  Па с,  $K \sim 10^{-11}$  Н (типичные значения параметров НЖК), а  $L \sim 50$  мкм, то  $\tau \sim 5$  мс.

С учетом термомеханических эффектов при облучении образца ЖК мощным пучком света [35] скорость распространения молекулярного разупорядочения в образце достигает  $100 \text{ м с}^{-1}$ . Следовательно, при толщине слоя ЖК 50 мкм время распространения составляет 0,5 мкс. А время хранения записанного оптическим путем состояния [35] изменяется от 0,1 до 0,4 с в зависимости от мощности облучения. Проблемы стабильности конденсированных сред под действием ударных волн рассматриваются также в [36].

Оценивая дополнительную возможность перекрытия соседних в пространстве или времени оптических солитонов (или областей внутри слоя ЖК, в которых возникает индуцируемая полем световой волны деформация от последовательных световых импульсов), расчет интегралов движения оптического солитона с функциональной формой фотона в жидком кристалле, получим функцию вида:

$$E = a \operatorname{sech} \frac{r}{w} \exp(i\sigma) + i g \exp(i\sigma), \quad (11)$$

где первый член отображает изменяющийся солитонный импульс, а второй – дополнительное внефазовое взаимодействие солитонов;  $g$  – константа, определяющая взаимодействие солитонов,  $\sigma$  характеризует изменение солитон-подобного импульса. В соответствии с предыдущими рассу-

ждениями можно оценить пространственный масштаб взаимодействия соседних солитонов, равный размеру деформированной области (порядка 1,2 толщины слоя ЖК).

Обзоры публикаций по солитонам в ЖК приведены в [37, 38].

## Вывод

Таким образом, в нематических ЖК можно реализовать одиночные солитоны с пространственным размером в несколько десятков микрометров и меньше, временем формирования от миллисекунд до десятков миллисекунд и временем существования от долей миллисекунды до сотен миллисекунд. На этой основе можно «кодировать» запутанные состояния с высоким уровнем различия сигналов и осуществлять квантовые вычисления.

**Благодарность:** публикация выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН. Авторы особо благодарят участников семинара, посвященного памяти С. А. Пикина и состоявшегося 5 февраля 2025 г. в ЦКП МГУ, в частности, С. П. Палто, М. В. Горкунова, Е. С. Пикину, А. С. Золотко за полезное обсуждение и критику.

**Acknowledgments:** the publication was supported by the RUDN University Strategic Academic Leadership Program. The authors are grateful to attendees of a seminar in memory of S.A. Pikin held in MSU on February 5, 2025, special thanks to S.P. Palto, M.V. Gorkunov, E.S. Pikina, A.S. Zolot'ko.

## Список источников / References

1. Валиев К. А. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления // *Успехи физических наук*, 2005. Т. 175, № 3. DOI: 10.3367/UFNr.0175.200501a.0003. [Valiev K.A. Quantum computers and quantum computing. *Physics – Uspekhi*, 2005, **48** (1), 1–36. DOI: 10.1070/PU2005v048n01ABEH002024.
2. Ожигов Ю. И. Квантовые вычисления с ансамблями идентичных фермионов и стационарным взаимодействием // *Письма в ЖЭТФ*. 2011. Т. 93, № 5. С. 321–322. [Ozhigov Yu. I. Quantum computing with ensembles of identical fermions and stationary interaction. *JETP Letters*, 2011, **93** (5), 321–322.
3. Махлин Ю., Бакенс Ш., Шнирман А. Квантовая операция для майорановских кубитов в кубитных цепочках без создания запутанности со вспомогательными степенями свободы // *ЖЭТФ*. 2019. Т. 156, вып. 4. С. 788–793. [Makhlin Yu., Bäckens Sh.,

- Shnirman A. Quantum operation for majorana qubits in qubit chains without creating entanglement with auxiliary degrees of freedom. *JETP Letters*, 2019, **156** (4), 788–793].
4. Катамадзе К. Г., Пашченко А. В., Романова А. В., Кулик С. П. Генерация и применение широкополосных бифотонных полей: *миниобзор* // *Письма в ЖЭТФ*. 2022. Т. 115, № 10. С. 613–628. [Katamadze K.G., Pashchenko A.V., Romanova A.V., Kulik S.P. Generation and application of broadband biphoton fields (*Mini-Review*). *JETP Letters*, 2022, **115** (10), 613–628].
  5. Васильева О. Ф., Зинган А. П., Временная эволюция Бозе-конденсированных атомов в трехъямной ловушке, при условии отличной от нуля начальной заселенности первой ямы // *Вестн. гос. ун-та просвещения. Серия: Физика и Математика*. 2022. № 2. С. 28–41. [Vasilieva O.F., Zingan A.P. Time evolution of Bose-condensed atoms in a three-well trap under the condition of a non-zero initial population of the first well. *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2022, (2), 28–41. DOI: 10.18384/2310-7251-2022-2-28-41 (in Russ.)].
  6. Буньков Ю. М. Квантовая магноника // *ЖЭТФ*. 2020. Т. 158, № 1. С. 24–36. [Bunkov Yu.M. Quantum magnonics. *JETP*, 2020, **131** (1), 18–28. DOI: 10.1134/S1063776120070018.
  7. Lee A., Rozema, Chao Wang, Dylan H. Mahler, Alex Hayat, Aephraim M. Steinberg, John E. Sipe, Marco Liscidini. Characterizing an entangled-photon source with classical detectors and measurements. *Optica*, 2015, **2** (5), 430–433. DOI: 10.1364/OPTICA.2.000430.
  8. Rojpattanakul W., Bongkodmalee T., Boonkham K. Simple experimental setup for producing polarization-entangled photons. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, **1380**, 012023. DOI:10.1088/1742-6596/1380/1/012023.
  9. McLaren M., Romero J., Padgett M.J., Roux F.S., Forbes A. Two-photon optics of Bessel-Gaussian modes. *Physical review A: Atomic, molecular and optical physics*, 2013, **88** (3), 033818. DOI: 10.1103/PhysRevA.88.033818.
  10. Chen Y., Hong L., Chen L. Quantum interferometric metrology with entangled photons. *Front. Phys.* 2022, **10**, 892519. DOI: 10.3389/fphy.2022.892519.
  11. Adamson R.B.A., Steinberg A.M. Improving quantum state estimation with mutually unbiased bases. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, **105**, 030406.
  12. Kondakova A.V., Kamalov T.F. Simulation of real entangled systems based on the model of a pair of entangled solitons. *Liq. Cryst.*, 2023, **50** (2), 218–221. DOI: 10.1080/02678292.2022.2113833.
  13. Аракелян С. М., Ляхов Г. А., Чилингарян Ю. С. Нелинейная оптика жидких кристаллов // *УФН*. 1980. Т. 131. С. 3–44. [Arakelyan S.M., Lyakhov G.A., Chilingaryan Yu.S. Nonlinear optics of liquid crystals. *Sov. Phys. Uspekhi*, 1980, **23** (5), 245–268. DOI: 10.1070/PU1980v023n05ABEH004919].
  14. Аракелян С. М., Чилингарян Ю. С. Нелинейная оптика жидких кристаллов. Серия: Современные проблемы физики. М.: Наука, 1984. 360 с. [Arakelyan S.M., Chilingaryan Yu.S. Nonlinear optics of liquid crystals. Series: Modern problems of physics. Moscow: Nauka, 1984. 360 p. (in Russ.)].
  15. Khoo I.C. Nonlinear optics of liquid crystalline materials. *Phys. Rep.*, 2009, **471** (5–6), 221–267. DOI: 10.1016/j.physrep.2009.01.001.
  16. Folcia C.L., Ortega J., Vidal R., Sierra T., Etxebarria J. The ferroelectric nematic phase: an optimum liquid crystal candidate for nonlinear optics. *Liq. Cryst.*, 2022, **49** (6), 899–906. DOI: 10.1080/02678292.2022.2056927.
  17. Заявка на патент РФ № 2023133771 (074373). Жидкокристаллический оптический элемент для квантовых вычислений / Камалов Т. Ф., Беляев В. В., Камалов Ю. Т., Беляев А. А.; опубл. 18.12.2023. Положительное решение о выдаче патента 12.09.2024 [Application for Patent of Russian Federation No. 2023133771 (074373). Liquid crystal optical element for quantum computing / Kamalov T.F., Belyaev V.V., Kamalov Yu.T., Belyaev A.A.; publ. 12.18.2023. Decision on patent issue 12.09.2024].
  18. Рыбаков Ю. П., Камалов Т. Ф. Случайная солитонная реализация квантовой механики и стохастические кубиты // *Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Серия: Физика*. 2003. № 2, вып. 2. С. 117–122. [Rybakov Yu.P., Kamalov T.F. Random soliton realization of quantum mechanics and stochastic qubits. *Bulletin of RUDN University (Peoples' Friendship University of Russia), Series Physics*, 2003, (2), issue 2, 117–122 (in Russ.)].
  19. Rybakov Yu.P., Kamalov T.F. Probabilistic simulation of quantum states. *Proc. SPIE, Quantum Informatics*, 2007, **7023**, Article ID. 702307 (9 p.). DOI: 10.1117/12.801898.
  20. Kamalov T.F., Rybakov Yu.P. Bell's theorem and entangled solitons. *Int. J. Theor. Phys.*, 2016, **55** (9), 4075–4080.
  21. Kamalov T.F., Rybakov Yu.P. Entangled optical solitons in nonlinear Kerr dielectric: Coherent and nonlinear optical phenomena. *Proc. SPIE*, 2007, **6729**, 67291T. DOI: 10.1117/12.752137.
  22. Rybakov Yu.P., Kamalov T.F. Entangled solitons and stochastic q-bits. *Phys. Part. Nucl. Lett.*, 2007, **4** (2), 208–213.
  23. Аракелян С. М., Григорян Г. Л., Нерсисян С. Ц., Ншанян М. А., Чилингарян Ю. С. Генерация второй гармоники в жидких кристаллах; симметрия молекул и макроскопическая нелинейность // *Письма в ЖЭТФ*. 1978. Т. 28. С. 202–205. [Arakelian S.M., Grigoryan G.L., Nersisyan S.Ts., Nshanyan M.A.,

- Chilingaryan Yu.S. Second harmonic generation in liquid crystals; molecular symmetry and macroscopic non-linearity. *JETP Lett.*, 1978, **28**, 202–205 (in Russ.).
24. Штыков Н. М., Блинов Л. М., Дорожкин А. М., Барник М. И. Генерация второй оптической гармоники в жидких кристаллах // *Письма в ЖЭТФ*. 1982. Т. 35, вып.4. С. 142–144. [Shtykov N.M., Blinov L.M., Dorozhkin A.M., Barnik M.I. Second optical harmonic generation in liquid crystals. *JETP Lett.*, 1982, **35**, (4), 142–144 (in Russ.).]
  25. Барник М. И., Блинов Л. М., Дорожкин А. М., Штыков Н. М. Генерация второй оптической гармоники, индуцированная электрическим полем в нематических и смектических жидких кристаллах // *ЖЭТФ*. 1981. Т. 81. С. 1763–1770. [Barnik M.I., Blinov L.M., Dorozhkin A.M., Shtykov N.M. Generation of the second optical harmonic induced by an electric field in nematic and smectic liquid crystals. *Sov. Phys. JETP*, 1981, **54** (5), 935–938].
  26. Ляхов Г. А., Свирко Ю. П. Генерация второй гармоники оптического излучения в ориентационно-упорядоченных жидкостях // *ЖЭТФ*. 1981. Т. 80. С. 1307–1316. [Lyakhov G.A., Svirko Yu.P. Second harmonic generation of optical radiation in orientationally ordered liquids. *Sov. Phys. JETP*, 1981, **80**, 1307–1316.
  27. Еникеева В. А., Золотко А. С., Макаров В. А., Ожередов И. А., Очкин В. Н., Шкуринов А. П. Генерация второй гармоники фемтосекундных лазерных импульсов в нематическом жидком кристалле // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 2007. № 5. С. 25–31. [Enikeeva V.A., Zolotko A.S., Makarov V.A., Ozheredov I.A., Ochkin V.N., Shkurinov A.P. Second harmonic generation of femtosecond laser pulses in a nematic liquid crystal. *Brief Comm. Phys. of the Lebedev Physical Institute*, 2007, (5), 25–31 (in Russ.).]
  28. Sultanov, V., Kavčič, A., Kokkinakis, E. et al. Tunable entangled photon-pair generation in a liquid crystal. *Nature*, 2024, 631, 294–299. DOI: 10.1038/s41586-024-07543-5.
  29. Катамадзе К. Г. Управление частотно-угловым спектром бифотонного поля: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва, 2013. 131 с. [Katamadze K.G. Control of the frequency-angular spectrum of a biphoton field. PhD thesis (Phys.). Moscow, 2013, 131 p. (in Russ.).]
  30. Блинов Л. М. Жидкие кристаллы: Структура и свойства. М.: Книжный дом «Либроком», 2013. 480 с. ISBN 978-5-397-03468-5. [Blinov L.M. Structure and properties of liquid crystals. Springer, 2011, 439 p. DOI: 10.1007/978-90-481-8829-1].
  31. Базыкчи А. Н., Золотовский И. О., Коробко Д. А., Куприянов А. С. Модуляционная неустойчивость и компрессия солитоноподобных импульсов в световодах с уменьшающейся аномальной дисперсией // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2013. Т. 15, № 4(3). С. 719–731. [Bazykchi A.N., Zolotovskiy I.O., Korobko D.A., Kupriyanov A.S. Modulation instability and compression of soliton-like pulses in optical fibers with decreasing anomalous dispersion. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2013, **15** (4), 719–731 (in Russ.).]
  32. Коренева Л. Г., Золин В. Ф., Давыдов Б.Л. Нелинейная оптика молекулярных кристаллов. М.: Наука, 1985. 200 с. [Koreneva L.G., Zolin V.F., Davydov B.L. Nonlinear optics of molecular crystals. Moscow: Nauka, 1985. 200 p. (in Russ.).]
  33. Чилингарян Ю. С. Нелинейная оптика жидких кристаллов: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. 1984. 371 с. [Chilingaryan Yu.S. Nonlinear optics of liquid crystals. Diss.... Dr. Phys. Math. Sci., 1984, 371 p. (in Russ.).]
  34. Sarkissian H. Applications of linear and nonlinear optical effects in liquid crystals. Dissertation for the PhD degree in College of Optics and Photonics (CREOL&FPCE) at the University of Central Florida Orlando, 2006. <https://stars.library.ucf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2066&context=etd>
  35. Katayama K., Kato D., Nagasaka K.-I., Miyagawa M., Sohn W. Y., Lee K.-W. Origin of optical nonlinearity of photo-responsive liquid crystals revealed by transient grating imaging. *Nature Scientific Reports*. 2019, **9** (1), 5754 (9 p.). DOI: 10.1038/s41598-019-42140-x.
  36. Кузнецов М. М., Кузнецов Г. В., Паренкина В. И., Сатюков Д. Г., Халиков Р. Ф. Аналитические модели поступательно неравновесной динамики ударно-сжатых бинарных смесей газов // *Вестн. гос. ун-та просвещения. Серия: Физика и Математика*. 2023. № 4. С. 34–48. [Kuznetsov M.M., Kuznetsov G.V., Parenkina V.I., Satyukov D.G., Halikov R.F. Analytical models of translationally nonequilibrium dynamics of shock-compressed binary gas mixtures. *Bulletin of the Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 2023, (4), 36–48 (in Russ.). DOI: 10.18384/2949-5067-2023-4-34-48].
  37. Assanto G. Nematicons: reorientational solitons from optics to photonics. *Liq. Cryst. Rev.*, 2018, **6** (2), 170–194. DOI: 10.1080/21680396.2019.1588797.
  38. Assanto G., Smyth N. F. Self-confined light waves in nematic liquid crystals. *Physica D*, 2020, 402, 132182. DOI: 10.1016/j.physd.2019.132182.
- Вклад авторов:**  
<sup>1</sup>Беляев В. В. – оценка размеров, времени генерации и жизни солитона в слое ЖК, подготовка текста.  
<sup>2</sup>Камалов Т. Ф. – разработка теоретической модели оптического солитона.  
<sup>3</sup>Камалов Ю. Т. – теоретическая модель оптического солитона в жидком кристалле.  
<sup>4</sup>Латинов А. Д. – оценка перекрытия последовательно возникающих солитонов в слое ЖК.

**Contribution of the authors:**

<sup>1</sup>*Belyaev V. V.* – evaluation of the size, generation time and lifetime of the soliton in the liquid crystal layer, preparation of the text

<sup>2</sup>*Kamalov T. F.* – development of the theoretical model of the optical soliton

<sup>3</sup>*Kamalov Y. T.* – theoretical model of the optical soliton in the liquid crystal

<sup>4</sup>*Latipov A. D.* – evaluation of the overlap of successively arising solitons in the liquid crystal layer

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

<sup>1</sup><http://orcid.org/0000-0003-0553-9358>

<sup>2</sup><http://orcid.org/0000-0002-4349-4747>

<sup>3</sup><http://orcid.org/0000-0003-0475-7556>

<sup>4</sup><http://orcid.org/0009-0005-5144-8635>

*Поступила 9.09.2024, одобрена 7.10.2024, принята 6.02.2025*  
*Received 9.09.2024, approved 7.10.2024, accepted 6.02.2025*