Письма в ЖЭТФ, том 122, вып. 5, с. 299 – 305

Светоиндуцированное упорядочение скирмионов с образованием кубической фазы в хиральном нематике

П. В. Долганов[+1)], *Е. А. Максимов*[+], *Н. В. Баленко*[*]

[+]*Институт физики твердого тела им. Ю. А. Осипьяна РАН, 142432 Черноголовка, Россия*

[*]*Химический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 17 июля 2025 г.
После переработки 30 июля 2025 г.
Принята к публикации 31 июля 2025 г.

В короткошаговом хиральном нематике, образующем кристаллические жидкости (Голубые фазы жидких кристаллов), исследовано влияние облучения светом на структуру, фазовые переходы и оптические характеристики. Обнаружено упорядочение топологических дефектов (скирмионов) при освещении образцов, приводящее к фазовому переходу из изотропной жидкой фазы в упорядоченную кубическую структуру скирмионов (BPII фазу жидких кристаллов).

DOI: 10.31857/S0370274X25090085, EDN: HCWKRG

Введение. Более 60 лет назад Т. Скирм [1] в далекой от жидких кристаллов области – ядерной физике, предсказал возможность образования частицеподобных особенностей, используя нелинейную теорию поля, что могло объяснить существование барионов. Развитый подход к описанию топологически устойчивых конфигураций, названных впоследствии скирмионами, оказался плодотворным при описании структурных особенностей в различных областях физики конденсированного состояния [2–7], в том числе в хиральных нематических жидких кристаллах [8–12]. В теории Скирма частицы являются протяженными объектами без сингулярности, подобно тому, как отсутствует сингулярность в топологическом солитоне в жидкокристаллическом смектике-C [13, 14]. Поле параметра порядка (например, нематический $\mathbf{n}$-директор [8]) непрерывно поворачивается от центра скирмиона к его границе (рис. 1a). В целочисленном скирмионе поворот происходит на угол π (топологический заряд скирмиона равен 1). В полуцелом скирмионе (half-skyrmion или мерон) $\mathbf{n}$-директор поворачивается на угол $\pi/2$ (топологический заряд 1/2), в четверть-скирмионе (quarter-skyrmion) происходит поворот на угол $\pi/4$ (топологический заряд 1/4). Свободная энергия в этих системах содержит слагаемое типа $\mathbf{n}(\nabla\times\mathbf{n})$, разрешенное при отсутствии инверсионной симметрии.

В Голубых фазах (ГФ) BPI и BPII (Blue Phase I и Blue Phase II) жидких кристаллов, называемых также кристаллическими жидкостями, кристаллическую структуру образуют четверть-скирмионы. Эти фазы одни из наиболее удивительных структур не только в жидких кристаллах, но и в физике конденсированного состояния вещества. Размер элементарных ячеек ГФ – несколько тысяч ангстрем [15–17]. Название "кристаллические жидкости" связано с текучестью материала в этих фазах. ГФ могут быть получены с высококачественными брэгговскими рефлексами, отвечающими различным кристал-

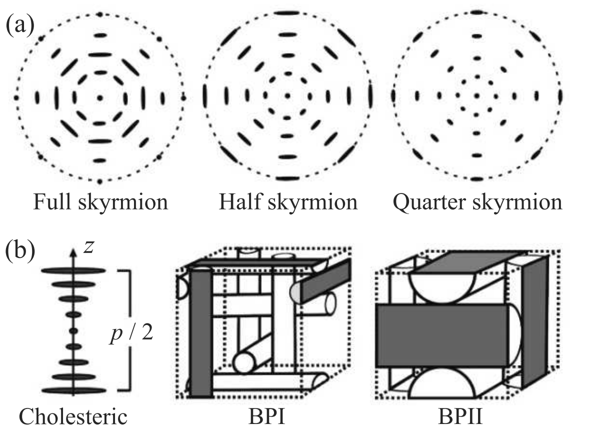

Рис. 1. (a) – Схематическое изображение целочисленного скирмиона с поворотом $\mathbf{n}$-директора на π, полуцелого скирмиона с поворотом $\mathbf{n}$-директора на $\pi/2$, четверть-скирмиона с поворотом $\mathbf{n}$-директора на $\pi/4$. (b) – Схематическое изображение холестерика, элементарных ячеек BPI и BPII фаз. Кристаллические жидкости BPI и BPII образованы упорядоченными четверть-скирмионами (цилиндрами с двойной закруткой)

[1)]e-mail: pauldol@issp.ac.ru

лографическим направлениям. К настоящему времени из ГФ наиболее детально экспериментально и теоретически исследованы кубические BPI и BPII фазы (рис. 1b). Первую соответствующую современным представлениям модель ГФ предложил А. Заупе [18]. Согласно этой модели, фазы образованы упорядоченными цилиндрами, впоследствии названными скирмионами [19–26]. Другой теоретический подход к изучению структуры и оптических характеристик ГФ связан с использованием теории Ландау и гармоник тензора диэлектрической проницаемости [16, 27, 28]. Пионерские работы в этом направлении были сделаны С. Бразовским и С. Дмитриевым [29]. К настоящему времени установлено, что BPI образует объемно-центрированную кубическую структуру (группа O^8 ($I4_132$)), BPII имеет примитивную кубическую ячейку (группа O^2 ($P4_232$)).

Образование ГФ связано с геометрической фрустрацией. Фрустрация в жидких кристаллах, как и в других состояниях вещества, часто приводит к образованию нетривиальных структур. В смектических жидких кристаллах конкуренция различных взаимодействий может привести к образованию так называемой SmC_α-фазы [30–32]. В хиральном нематике локальный поворот длинных осей молекул во всех направлениях энергетически выгоден, но образующаяся таким образом структура не может заполнить трехмерное пространство [8, 15]. Выход из этой геометрической фрустрации может состоять в образовании одномерной холестерической (Ch) структуры (рис. 1b) или, в случае большой хиральности, в формировании цилиндров конечного диаметра с двойной закруткой поля нематического **n**-директора. Цилиндры упорядочены в кубическую структуру и отделяются друг от друга линейными дефектами с топологическими зарядами $-1/2$. Цилиндры с двойной закруткой можно рассматривать как возбуждения скирмионного типа однородного поля с образованием в локальной области пространства закрученного **n**-директора. Структура и спектральные особенности упорядоченных BPI и BPII в основном поняты. Что касается третьей ГФ BPIII, называемой также Фоговой фазой, ситуация с ней до конца не ясная. BPIII образуется в веществах с большой хиральностью при температуре выше температуры существования BPI и BPII. BPIII – термодинамически стабильная фаза. При нагревании BPIII переходит в обычную изотропную жидкость. Спектр дифракции BPIII [33, 34] существенно шире узкополосной дифракции BPI и BPII. Скейлинг показывает, что ширина дифракционного спектра BPIII подобна дифракции от изотропных фаз органических и неорганических веществ или от их стеклообразного состояния [35]. По-видимому, плавление кристаллических жидкостей BPI и BPII может происходить в два этапа (с двумя фазовыми переходами плавления): вначале плавится кристаллическая структура BPI и BPII с образованием жидкости из спиралей с двойной закруткой [15–18] (BPIII) или, на языке топологических дефектов, жидкости скирмионов [20–26]. Затем при дальнейшем нагревании жидкость скирмионов плавится с образованием обычной жидкости (переход BPIII–изотропная молекулярная жидкость).

Фазовые переходы из изотропной жидкости в ГФ, а также переходы между ГФ и между фазами BPI и Ch относятся к слабым фазовым переходам I рода [15]. Обычно ширина диапазона ГФ менее 1 °C. Фаза BPI у различных веществ проявляет склонность к переохлаждению: как правило, ее можно переохладить относительно равновесной температуры перехода BPI-Ch на $\sim 2\,^\circ$C. Корреляционная длина вблизи перехода из изотропной фазы в ГФ порядка 400 Å [36]. ГФ обладают кристаллической упругостью [37, 38], однако типичные значения их упругих модулей сдвига существенно меньше, чем у обычных кристаллов, порядка 10^3 дин/см^2 [15]. Теория [37] дает согласующиеся с экспериментом оценки значений модулей упругости. Ch и ГФ с возможностью обратимой перестройки их структуры перспективны для практических приложений, таких как лазеры с перестраиваемой длиной волны [39, 40], управляемые светом фотонные устройства: решетки, зеркала, фильтры и т.д. [41–43].

ГФ могут претерпевать существенную трансформацию при внешних воздействиях, в частности при облучении светом. К настоящему времени проведено большое число исследований на смесях из различных веществ [41–52]. В фоточувствительных составляющих смесей форма молекул в основном состоянии близка к палочкообразным молекулам термотропных жидких кристаллов (*транс*-изомер, E-изомер). При облучении ультрафиолетовым (УФ) светом молекулы трансформируются из *транс* в *цис* конфигурацию (Z-изомер). Наблюдалось низкотемпературное смещение температур фазовых переходов, коротковолновый и длинноволновый сдвиг рефлексов, обратимые при последующем облучении видимым светом фазовые переходы BPI $\rightarrow$ Ch (или в ряде веществ BPII $\rightarrow$ Ch), BPI $\rightarrow$ BPII, BPII $\rightarrow$ изотропная жидкость [41–52].

В настоящей работе мы демонстрируем упорядочение изотропной жидкости скирмионов в кубическую BPII структуру под действием света. Исследования проведены с использованием жидкокристаллического материала, содержащего фоточувствительное хиральное вещество MeAzoSorb [51, 52]. Это производное изосорбида включает две азобензольные группы, которые под воздействием УФ света претерпевают *транс–цис* изомеризацию (рис. 2). Этот процесс приводит к значительным изменениям

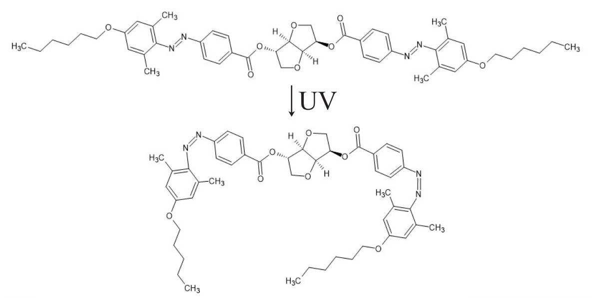

Рис. 2. Схема *транс–цис* (E–Z) изомеризации фоточувствительного соединения MeAzoSorb при облучении УФ светом

в форме молекулы и вызывает снижение закручивающей силы данного хирального соединения. Вещество MeAzoSorb синтезировано по методике, описанной в [51]. При освещении УФ светом образца с бесструктурным спектром в области температур выше температур существования упорядоченных кристаллических жидкостей обнаружен фазовый переход в упорядоченную структуру с образованием в спектре дифракции кристаллического рефлекса BPII. Рефлекс сохраняется при выключении освещения. Переход обратим, рефлекс пропадает при освещении видимым светом.

Эксперимент. Базовым материалом для приготовления фоточувствительных кристаллических жидкостей служила смесь нематического жидкого кристалла 7OCB (51 вес. %; Synthon Chemicals) и хирального правовращающего нематика CB15 (49 вес. %; TCI Europe), образующая холестерическую фазу и кристаллические жидкости BPI и BPII. В смесь добавлялось 1.5 вес. % хирального правовращающего фоточувствительного вещества MeAzoSorb [51]. Получившийся фоточувствительный материал вводился в плоскую оптическую ячейку, образованную двумя стеклянными пластинками с зазором между ними 9 мкм. Внутренние поверхности пластинок покрыты ориентантом, создающим гомогенную (параллельную поверхностям пластинок) ориентацию **n**-директора. Ячейки помещались в термостатирующее устройство LTS120 (Linkam Scientific), позволяющее проводить оптические и спектральные исследования. Спектры селективного отражения и пропускания измерялись с использованием оптических микроскопов Olympus BX51 и Altami Lum LED, оснащенных оптоволоконным спектрометром Avaspec-2048 (Avantes).

В спектре поглощения MeAzoSorb имеется интенсивная широкая полоса с максимумом порядка 370 нм и менее интенсивное поглощение в длинноволновой области вплоть до 500 нм [51]. С этими полосами поглощения связаны переходы E-изомера молекул MeAzoSorb в Z-изомер (при облучении УФ светом) и обратная Z-E изомеризация (при облучении видимым светом). Перекрытие интенсивного поглощения с рефлексом [200] в BPI и с рефлексом от холестерика в УФ области затрудняет регистрацию этих рефлексов. Для того, чтобы нивелировать влияние поглощения, проводилась нормировка спектров ГФ и Ch как на спектр лампы без образца, так и на спектр излучения лампы, прошедшего через образец при высокой температуре в изотропной фазе. Это позволило уверенно регистрировать рефлекс [200] в BPI и рефлекс Ch в спектрах пропускания.

Результаты и обсуждение. В основном состоянии исследованных нами образцов фоточувствительные молекулы находятся в E-конфигурации. Это состояние может быть получено выдержкой образца в темноте порядка суток или путем освещения светом видимого диапазона (лазерным диодом с $\lambda = 455$ нм).

При освещении УФ светом (лазерным диодом с $\lambda = 365$ нм) происходит E–Z изомеризация молекул MeAzoSorb, в результате чего закручивающая способность вещества уменьшается. Чтобы уверенно перевести все фоточувствительные молекулы в Z-изомер, образец пять минут освещался УФ светом. При освещении светом видимого диапазона длин волн происходит обратная Z–E изомеризация с восстановлением закручивающей способности и с переходом образца в основное состояние.

В используемой хиральной смеси в основном состоянии (образец, не облученный УФ светом) происходит фазовый переход первого рода из изотропной фазы в BPII при $\sim 29.2\,^{\circ}$C. Ширина BPII составляет около $0.2\,^{\circ}$C. При охлаждении образуется BPI фаза. При дальнейшем охлаждении BPI переходит в низкотемпературную Ch фазу. Спектры селективного отражения BPI, BPII и Ch приведены на рис. 3.

Область стабильности BPI фазы (около $0.3\,^{\circ}$C) определена при медленном нагревании Ch. В планарной ячейке всегда образовывалась BPII фаза с ориентацией кристаллографической плоскости (100), параллельной плоскости ячейки. Ориентация в оптической ячейке кубической структуры BPI зависела от способа ее получения: при охлаждении BPII,

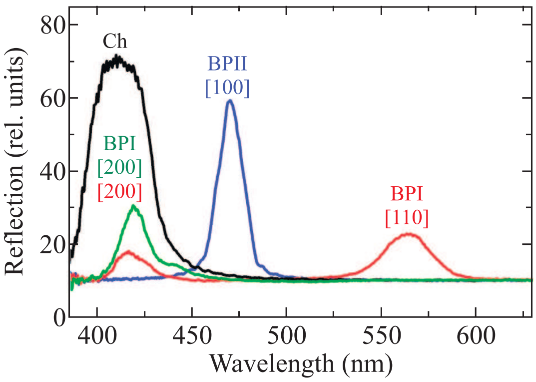

Рис. 3. (Цветной онлайн) Спектры дифракции холестерика (Ch, $T = 24\,^\circ$C), ГФ BPI ($T = 28.9\,^\circ$C) и BPII ($T = 29.1\,^\circ$C). Спектр BPI с рефлексом [200] получен при нагреве из холестерика, спектр BPI с рефлексами [200] и [110] при охлаждении из BPII

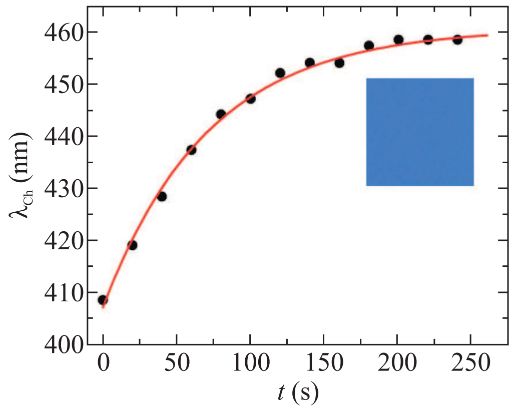

Рис. 4. (Цветной онлайн) Смещение длины волны $\lambda_{\rm Ch}$ селективного отражения холестерика при УФ освещении. t – Время освещения. Сплошная кривая – экспоненциальная зависимость (1) с характерным временем $\tau = 71.5$ с. На вставке приведена фотография образца после освещения; фотография снята в скрещенных поляризаторах в отраженном свете

как правило, образуется BPI с ориентацией (110), параллельной плоскости ячейки, при нагревании Ch плоскость (100) образующейся BPI фазы параллельна плоскости ячейки. Поэтому в исследованной спектральной области ($\lambda > 370$ нм) мы могли наблюдать рефлексы [200] и [110] в BPI и [100] в BPII как в спектрах отражения, так и в спектрах пропускания.

При освещении УФ светом длины волн селективного отражения Ch увеличиваются, что связано с увеличением периода структуры. На рис. 4 приведена длина волны селективного отражения холестерика $\lambda_{\rm Ch}$ как функция времени освещения лазерным УФ диодом. Уменьшение скорости длинноволнового смещения $\lambda_{\rm Ch}$ связано с уменьшением количества E-изомера при освещении. Зависимость $\lambda_{\rm Ch}$ от времени хорошо описывается экспоненциальной функцией [49]

$$\lambda_{\rm Ch} = \lambda_{\rm Ch}^{\rm UV} + (\lambda_{\rm Ch}^{\rm VL} - \lambda_{\rm Ch}^{\rm UV})e^{-t/\tau}, \qquad (1)$$

где τ – характерное время изменения $\lambda_{\rm Ch}$ при освещении УФ диодом, $\lambda_{\rm Ch}^{\rm UV}$ – длина волны Ch, когда образец переходит в конечное состояние при длительном освещении УФ диодом, $\lambda_{\rm Ch}^{\rm VL}$ – длина волны Ch в основном состоянии образца.

УФ излучение, помимо длинноволнового смещения рефлексов, вызывает сдвиг температур фазовых переходов Ch–BPI и BPI–BPII в низкотемпературную область. Такой сдвиг в исследуемом материале может быть связан с тем, что форма Z-изомера менее близка к палочкообразной структуре по сравнению с исходной молекулой E-изомера.

При УФ освещении нами наблюдались фазовые переходы Ch $\to$ BPI, BPI $\to$ BPII, BPII $\to$ изотропная жидкость. Подчеркнем, что все эти переходы происходят с образованием более высокотемпературных фаз. Аналогичные скачкообразные переходы при освещении УФ светом ранее наблюдались в веществах с другими фоточувствительными молекулами [41, 42]. Переходы обратимы: при освещении видимым светом происходят переходы в основное состояние Ch, BPI и BPII. Типично исследовались переходы между тремя упорядоченными фазами (Ch, BPI и BPII) или переход из одной из упорядоченных фаз в изотропную жидкость. В настоящей работе проведены эксперименты другого типа: исследовано влияние облучения при высоких температурах выше температуры существования BPI и BPII. Полученные данные являются наиболее важными результатами статьи.

В отличие от переходов между упорядоченными структурами Ch, BPI и BPII, о которых шла речь в предыдущем абзаце, нами наблюдался индуцированный УФ освещением переход другого типа из высокотемпературной изотропной фазы в более низкотемпературную упорядоченную BPII фазу (рис. 5a, b) с появлением в спектрах дифракции и пропускания рефлекса [100]. Этот переход является обратимым, при освещении видимым светом образец возвращается в основное (изотропное) состояние (рис. 5c). Второе отличие от наблюдавшихся ранее переходов состоит в том, что у структуры, образовавшейся при УФ освещении, – конечная область существования на шкале освещенности. При дальнейшем УФ освещении фотоиндуцированной BPII структуры (рис. 6) рефлекс пропадает с образованием изотропной фазы (рис. 6c). В каждом из состояний образец может находиться длительное время. Фазовые переходы обратимы: при

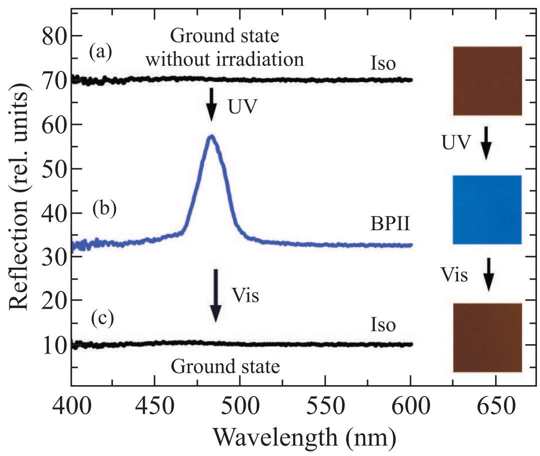

Рис. 5. (Цветной онлайн) Освещение образца УФ светом (30 с) в изотропной (Iso) фазе (a) приводит к упорядочению скирмионов с образованием кубической структуры BPII (b) в области температур T–$T_{\text{BPII-Iso}} < 0.2\,^{\circ}$C, где $T_{\text{BPII-Iso}}$ – температура перехода BPII–изотропная фаза без освещения. При последующем освещении видимым светом кубическая BPII фаза (b) переходит в изотропную (c). Стрелками указаны переходы при освещении УФ и видимым светом. (a) и (c) – одно и то же состояние образца. Фотографии в изотропной и BPII фазах получены в отраженном свете в скрещенных поляризаторах

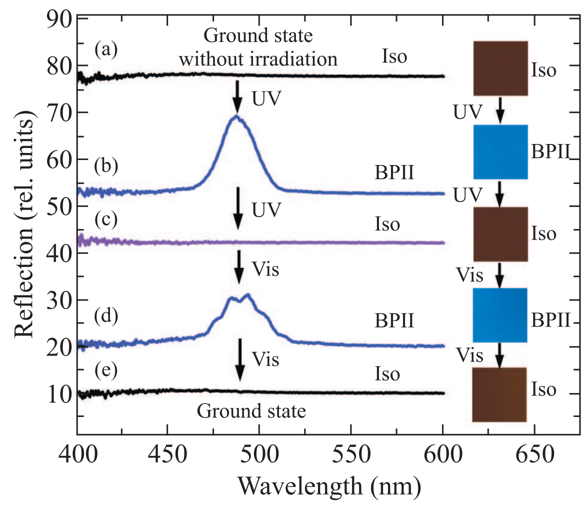

Рис. 6. (Цветной онлайн) Освещение УФ светом вызывает переход из изотропной (a) в BPII фазу (b). При дальнейшем освещении УФ светом происходит переход в изотропную структуру (c). Освещение структуры (c) видимым светом инициирует переходы в обратном порядке в BPII (d) и затем в изотропную фазу (e). Стрелками указаны переходы при освещении УФ и видимым светом. (a) и (e) – одно и то же состояние образца

освещении видимым светом образуется BPII фаза с рефлексом [100] (рис. 6d), при дальнейшем освещении рефлекс пропадает, образец переходит в основное состояние (рис. 6e).

В веществах с короткошаговым холестериком (λ_{Ch} порядка и меньше 400 нм) типично образование изотропной фазы BPIII (аморфная жидкость скирмионов). При больших λ_{Ch} (меньшей хиральности) BPIII, жидкость скирмионов не образуется, становясь неустойчивой по отношению к переходу в кубическую BPII фазу и к переходу в обычную жидкость [15–17, 53]. В наших экспериментах уменьшение хиральности, вызванное освещением УФ светом, приводит к упорядочению аморфного состояния из скирмионов с образованием упорядоченной кубической BPII структуры. Светоиндуцированная BPII структура находится между двумя изотропными фазами: между (a) и (c) на рис. 6 при УФ освещении и между (c) и (e) при освещении видимым светом.

Следует еще раз подчеркнуть необычность наблюдаемого явления. При освещении УФ светом уменьшается хиральность, однако область существования BPII расширяется, в том числе за счет изотропной фазы. Одной из возможных причин этого может быть исчезновение при освещении УФ светом аморфной BPIII фазы – BPII занимает ее место. Расчет локальной структуры неупорядоченной трехмерной аморфной BPIII фазы показал [54], что пересечение линейных дисклинаций в заметном числе случаев происходит с участием четырех дисклинаций. Аналогичное пересечение четырех дисклинаций происходит в элементарной ячейке BPII, т.е. локальное упорядочение в аморфной фазе близко к BPII [54]. Наблюдаемый нами светоиндуцированный переход с упорядочением скирмионов согласуется с этими расчетами.

Заключение. Скирмионные кубические структуры могут быть получены из жидкой фазы скирмионов в короткошаговых хиральных нематиках в результате термотропных фазовых переходов, могут образовываться во внешнем поле. Нами продемонстрировано образование упорядоченной фотонной структуры (BPII фаза) из жидкости при УФ световом воздействии. У упорядоченной структуры узкое окно интенсивности облучения, в которой она образуется. Структура сохраняется при выключении света и может быть разрушена при освещении светом как видимого, так и УФ диапазона.

Авторы выражают благодарность В. Е. Дмитриенко за плодотворные обсуждения.

Финансирование работы. Исследование выполнено в рамках Государственного задания Института физики твердого тела имени Ю. А. Осипьяна Российской академии наук и Государственного задания Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, регистрационный номер АААА-А21-121011990022-4 (“Современные проблемы химии и физико-химии высокомолекулярных соединений”).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

---

1. T. H. R. Skyrme, Nucl. Phys. **31**, 556 (1962).
2. А. Н. Богданов, Д. А. Яблонский, ЖЭТФ **95**, 178 (1989).
3. L. Brey, H. A. Fertig, R. Côte, and A. H. MacDonald, Phys. Rev. Lett. **75**, 2562 (1995).
4. T. L. Ho, Phys. Rev. Lett. **81**, 742 (1998).
5. U.K. Rößer, N. A. Bogdanov, and C. Pfleiderer, Nature **442**, 797 (2006).
6. И. С. Лобанов, В. М. Уздин, Письма в ЖЭТФ **119**(10), 744 (2024).
7. N. D. Mermin and T. L. Ho, Phys. Rev. Lett. **36**(11), 594 (1976).
8. J. V. Selinger, *Introduction to Topological Defects and Solitons in Liquid Crystals, Magnets, and Related Materials*, Springer (2024).
9. А. Н. Богданов, А. А. Шестаков, ЖЭТФ **113**, 1675 (1998).
10. J. Fukuda and S. Žumer, Nat. Commun. **2**, 246 (2011).
11. P. J. Ackerman, R. P. Triverdi, B. Senyuk, J. van de Lagemaat, and I. I. Smalyukh, Phys. Rev. E **90**, 012505 (2014).
12. J. Pišljar, M. Marinčič, S. Ghosh, S. Turlapita, R. Nandiraju, A. Nuch, M. Skarabot, A. Mertely, A. Petelin, A. Pusovnic, M. Ravnik, and I. Musevic, Liquid Crystals **50**(7–10), 1406 (2023).
13. P. V. Dolganov and B. M. Bolotin, JETP Lett. **77**(8), 429 (2003).
14. P. V. Dolganov, V. M. Zhilin, V. K. Dolganov, and E. I. Kats, JETP Lett. **89**(3), 161 (2009).
15. P. Oswald and P. Pieranski, *Nematic and Cholesteric Liquid Crystals*, Taylor & Francis, Boca Raton, USA (1995).
16. В. А. Беляков, В. Е. Дмитриенко, УФН **146**(3), 369 (1985).
17. D. C. Wright and N. D. Mermin, Rev. Mod. Phys. **61**, 385 (1989).
18. A. Saupe, Mol. Cryst. **7**(1), 59 (1969).
19. A. Nych, J. Fukuda, U. Ognysta, S. Zumer, and I. Musevic, Nature Phys. **13**, 1215 (2017).
20. J. Fukuda, A. Nych, U. Ognysta, S. Žumer, and I. Musevic, Sci. Rep. **8**, 17234 (2018).
21. J. S. B. Tai and I. I. Smalyukh, Phys. Rev. E **101**, 042702 (2020).
22. C. Reichhardt, C. J. O. Reichhardt, and M. V. Miloševič, Rev. Mod. Phys. **94**(3), 035005 (2022).
23. J. Fukuda, A. Nych, U. Ognysta, S. Žumer, and I. Muševič, Ann. Phys. (Berlin) **534**, 2100336 (2022).
24. J. Pišljar, S. Ghosh, S. Turlapita, V. S. Rao, M. Skarabot, A. Mertely, A. Petelin, A. Nuch, M. Marinčič, A. Pusovnic, M. Ravnik, and I. Musevic, Phys. Rev. X **12**, 011003 (2022).
25. R. C. V. Coelho, H. Zhao, M. Tasinkevich, I. I. Smalyukh, and M. M. Telo da Gama, Phys. Rev. Research **5**, 033210 (2023).
26. Y. Shen, M. Qaiser, and I. Dierking, Soft Matter **19**, 9325 (2023).
27. R. M. Hornreich, M. Kugler, and S. Shtrikman, Phys. Rev. Lett. **54**, 2099 (1985).
28. R. M. Hornreich and S. Shtrikman, Phys. Rev. A **41**, 1978 (1990).
29. С. А. Бразовский, С. Г. Дмитриев, ЖЭТФ **69**, 979 (1975) [S. A. Brazovskii and S. G. Dmitriev, Sov. Phys. JETP **42**, 497 (1978)].
30. M. Čepič, B. Žekš, Mol. Cryst. Liq. Cryst. Sci. Technol. Sect. A **263**, 61 (1995).
31. P. V. Dolganov, Y. Suzuki, and A. Fukuda, Phys. Rev. E **65**(3), 031702 (2002).
32. P. V. Dolganov, V. M. Zhilin, V. K. Dolganov, and E. I. Kats, Phys. Rev. E **82**(4), 040701 (2010).
33. E. I. Demikhov, V. K. Dolganov, and S. P. Krylova, JETP Lett. **42**(1), 16 (1985).
34. V. K. Dolganov, JETP **81**(2), 593 (1995).
35. E. I. Demikhov, V. K. Dolganov, and S. P. Krylova, JETP **66**(5), 998 (1987).
36. E. P. Koistinen and P. H. Keyes, Phys. Rev. Lett. **74**, 4460 (1995).
37. В. Е. Дмитриенко, Письма в ЖЭТФ **43**, 324 (1986).
38. В. А. Чижиков, А. В. Мамонова, В. Е. Дмитриенко, ЖЭТФ **166**(6), 900 (2024).
39. A. Chanishvili, G. Chilaya, G. Petriashvili, R. Barberi, R. Bartolino, G. Cipparone, A. Mazzulla, and L. Oriol, Appl. Phys. Lett. **83**, 5353 (2003).
40. K. Kim, S.-T. Hur, S. Kim, S.-Y. Jo, B. R. Lee, M. H. Song, and S.-W. Choi, J. Mater. Chem. C **3**, 5383 (2015).
41. L. Ma, W. Hu, Z. Zheng, S. Wu, P. Chen, Q. Li, and Y. Lu, Adv. Opt. Mater. **7**(16), 1900393 (2019).
42. S. Jiang, C. Wu, T. Mo, S. Huang, J. Lin, and C. Lee, Crystals **10**, 906 (2020).
43. E. Oton, M. Cigl, P. Morawiak, S. Mironov, A. Bubnov, and W. Piecek, Sci. Rep. **14**, 9910 (2024).
44. T. Lin, Y. Li, C. Wang, H. Jau, C. Chen, C. Li, H. K. Bisoyi, T. J. Bunning, and Q. Li, Adv. Mater. **25**, 5050 (2013).
45. K. Zhou, H. K. Bisoyi, J. Jin, C. Yuan, Z. Liu, D. Shen, Y. Lu, Z. Zheng, W. Zhang, and Q. Li, Adv. Mater. **30**, 1800237 (2018).
46. M. Wang, W. Hu, L. Wang, D. Guo, T. Lin, L. Zhang, and H. Yang, J. Mater. Chem. C **6**, 7740 (2018).

47. J. Yang, W. Zhao, W. He, Z. Yang, D. Wang, and H. Cao, J. Mater. Chem. C **7**, 13352 (2019).
48. P. V. Dolganov, K. D. Baklanova, and A. Y. Bobrovsky, Liq. Cryst. **48**, 1339 (2021).
49. K. Thapa, O. Iadlovska, H. K. Bisoyi, D. A. Paterson, J. M. D. Storey, C. T. Imrie, Q. Li, S. V. Shiyanovskii, and O. D. Lavrentovich, Phys. Rev. E **104**, 044702 (2021).
50. N. V. Balenko, A. Yu. Bobrovsky, and P. V. Dolganov, Liq. Cryst. **51**(3), 471 (2024).
51. A. Bobrovsky, A. Ryabchun, M. Cigl, V. Hamplova, M. Kaspar, F. Hampl, and V. Shibaev, J. Mater. Chem. C **2**, 8622 (2014).
52. P. V. Dolganov, S. O. Gordeev, V. K. Dolganov, and A. Yu. Bobrovsky, Mol. Cryst. Liq. Cryst. **633**, 14 (2016).
53. К. Д. Бакланова, В. К. Долганов, Е. И. Кац, П. В. Долганов, Письма в ЖЭТФ **117**, 537 (2023).
54. O. Henrich, K. Stratford, M. E. Cates, and D. Marenduzzo, Phys. Rev. Lett. **106**, 107801 (2011).