

Золотько Александра Степановича

**"Оптическая ориентация жидких кристаллов",
представленную на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности 01.04.05
- оптика**

Диссертация посвящена исследованиям (в основном экспериментальным) взаимодействия интенсивного оптического излучения с жидкими кристаллами. Предмет диссертации актуален как с точки зрения фундаментальных исследований, так и с точки зрения современных многочисленных эффективных приложений жидких кристаллов.

Жидкие кристаллы характеризуются большой оптической анизотропией и пространственной неоднородностью, которая присутствует изначально или возникает под действием внешних факторов. Эти свойства жидких кристаллов, в сочетании с высокой восприимчивостью к внешним воздействиям, обуславливают специфику и разнообразие эффектов в оптике жидких кристаллов и, особенно, в оптике интенсивного оптического излучения.

Оптика интенсивного оптического излучения жидких кристаллов начала активно развиваться во второй половине прошлого века и пионерские работы в этой области были выполнены отечественными исследователями в группе Б.Я.Зельдовича. Эти работы продемонстрировали, что нелинейная оптика жидких кристаллов существенно богаче, чем нелинейная оптика традиционных для того времени объектов исследований, конденсированных сред. И что особенно важно, помимо известных механизмов нелинейности в оптика жидких кристаллов проявляется новый механизм, ориентационная нелинейность, приводящий к фантастическому усилению нелинейных явлений и возможности наблюдать качественно новые эффекты, недоступные для исследований на традиционных объектах. Фундаментальная значимость и перспективы эффективных приложений соответствующих исследований были своевременно оценены в группе ФИАН под руководством В.Ф.Китаевой, в которой соискатель, А.С.Золотько, и включился в исследования, результатами которых стала представленная им диссертация.

Сказанное выше определяет фундаментальную и прикладную актуальность темы диссертации.

Несколько слов о предистории исследований. Как известно, наиболее важные применения жидких кристаллов связаны с влиянием на их структуру внешних низкочастотных электрических полей. Основу для названных применений заложили исследования первой трети 20 века по ориентации жидких кристаллов низкочастотными электрическими полями, выполненные в России В.К.Фредериксом с сотрудниками. Ими было открыто и исследовано классическое явление, получившее название «Эффект Фредерикса», заключающееся в пороговой (по электрическому полю) переориентации молекул жидкого кристалла и ведущее к изменению оптических характеристик ячейки, содержащей этот жидкий кристалл. Представляет интерес наблюдение аналога Эффекта Фредерикса под действием на жидкий кристалл света (высокочастотных электрических полей). Однако экспериментальные наблюдения эффекта в световых полях отсутствовали вплоть до 1980г.

В то же время, взаимодействие световых полей с жидким кристаллом (далее в основном речь пойдет о разновидности жидких кристаллов нематиках (НЖК)) во многих отношениях принципиально отличается от эффектов в низкочастотных полях — эти отличия обусловлены рассеянием и поглощением света, влиянием НЖК на поляризацию света, влиянием света на поверхностные ориентирующие слои и другими факторами. Поэтому возникшее новое направление, исследование взаимодействия света с жидкими кристаллами, представляет интерес как для их возможного применения в схемах чисто оптической модуляции, так и в целях поиска новых механизмов такого взаимодействия.

Посвященная исследованиям взаимодействия интенсивного оптического излучения с жидкими кристаллами диссертация включает в себя результаты экспериментального и теоретического исследования ориентационного воздействия света на жидкие кристаллы (в основном, нематические), вызванного разными механизмами, а также результаты детального изучения эффектов трансформации световых пучков, полученные автором.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав и Заключения.

Во Введении дано обоснование актуальности темы диссертации, показаны новизна, научная и практическая значимость работы, сформулированы защищаемые положения. Приведен обзор предшествующих работ о взаимодействии света с жидкими кристаллами. Также изложены основные свойства ориентации НЖК во внешних низкочастотных полях и описан переход Фредерикса.

Первая глава диссертации посвящена, в основном, изложению результатов исследования оптической ориентации непоглощающих НЖК.

Описаны эксперименты, в которых было установлено влияние направления распространения и поляризации световой волны на характер светоиндуцированной переориентации директора НЖК.

В случае взаимно перпендикулярной ориентации светового поля и директора НЖК впервые наблюдался пороговый по интенсивности света поворот директора НЖК, являющийся оптическим аналогом перехода Фредерикса в низкочастотных полях. Наблюдалась пороговая переориентация директора в циркулярно поляризованном свете.

Были установлены принципиальные отличия светоиндуцированного перехода Фредерикса от перехода Фредерикса в низкочастотных полях, в частности, возникновение колебаний поля директора в световой волне обыкновенной поляризации. Показано, что в узком световом пучке пороговое поле светоиндуцированного перехода Фредерикса зависит от толщины жидкокристаллического слоя. Скорость релаксации поля директора в световом пучке демонстрирует сложную зависимость от мощности светового пучка.

Установлено, что ориентирующее молекулы воздействие светового пучка на НЖК приводит к абберационной самофокусировке и дефокусировке — возникновению в рассеянном и прошедшем НЖК пучке системы колец. Показано что угол поворота директора НЖК и его динамика могут быть определены из результатов измерения параметров абберационной картины.

В диссертации построены простые теоретические модели осцилляций поля директора в обыкновенной световой волне, хорошо описывающие экспериментальные результаты. В основе этих моделей лежит модовое представление деформации поля директора и учет энергообмена обыкновенной и необыкновенной волн в деформированном НЖК.

Развита теория переориентации и релаксации поля директора при светоиндуцированном переходе Фредерикса в узком световом пучке. Она основана на учете упругих сил, возникающих из-за поперечной (по отношению к волновому вектору светового пучка) деформации поля директора. Результаты расчеты динамики директора НЖК в световом пучке, а также порога светоиндуцированного перехода Фредерикса, достаточно хорошо согласуются с экспериментом.

В первой главе диссертации также проведено рассмотрение поведения директора НЖК в циркулярно поляризованном световом поле, объясняющее обнаруженную в работах других авторов оптическую бистабильность поля директора в этом случае.

Во второй главе диссертации детально рассматривается трансформация светового пучка при его распространении в НЖК.

Автором наблюдается, что после прохождения светового пучка через жидкокристаллический слой его поляризация изменяется и приобретает зависимость от угловых координат лучей, образующих абберационную картину. В случае наклонного падения луча с поляризацией необыкновенной волны происходит поворот плоскости поляризации, но сама поляризация остается линейной. При нормальном падении линейная поляризация трансформируется в эллиптическую, при этом угол поворота большой ось эллипса поляризации относительно направления исходной линейной поляризации может достигать 90° . Трансформация поляризации светового пучка в НЖК является эффектом нелинейной оптической активности. Экспериментально измерена соответствующая константа поворота плоскости поляризации.

Развита теоретическое описание эффекта нелинейной оптической активности в НЖК. Оно основано на решении системы уравнений для медленно меняющихся амплитуд необыкновенной и обыкновенной волн в заданном деформированном поле директора. Результаты расчета хорошо описывают эксперимент.

Показано, что экспериментально наблюдаемая вытянутость абберационной картины в направлении, перпендикулярном плоскости поляризации, обусловлена различием констант упругости НЖК. Экспериментальные исследования профиля светового пучка двукратно прошедшего через жидкокристаллический слой продемонстрировали возможность определения направления поворота директора НЖК в условиях проявления теплового самовоздействия в пучке света.

Представлены результаты экспериментального исследования трансформации светового пучка, прошедшего через слой НЖК, к которому приложено постоянное электрическое поле. Установлено, что при прохождении светового пучка через жидкокристаллический слой абберационная картина качественно отличается от концентрической системы абберационных колец. Исходя из поляризационных свойств абберационной картины, показано что самовоздействие светового пучка происходит в условиях снятия экранировки внешнего электрического поля поверхностными зарядами благодаря их удалению с поверхности под воздействием светового поля. Этот механизм имеет место как для чистых НЖК, так и для НЖК с примесью красителей.

Предложена модель самовоздействия светового пучка в НЖК в присутствии постоянного электрического поля. Аналитически рассчитано деформированное поле директора. Проведены численные расчеты абберационной картины, результаты которых хорошо согласуются с экспериментом. Получены аналитические выражения для каустик абберационной картины.

В третьей главе описаны исследования взаимодействия света с холестерическими жидкими кристаллами и с жидкими кристаллами вблизи точек фазовых переходов смектик–нематик и нематик–изотропная фаза.

В холестерических жидких кристаллах обнаружена оптическая генерация деформаций поля директора в виде метастабильных квадратных решеток, соответствующих неустойчивости Хельфриха, ранее наблюдавшейся в низкочастотных полях. Причиной их возникновения являлось изменение шага холестерической спирали, которое в эксперименте происходило либо за счет изменения конформационного состава молекул жидкого кристалла (в этом случае было возможно быстрое “стирание” решеток при перестройке длины световой волны) либо за счет нагрева жидкого кристалла. Изучены особенности дифракции света на решетках, обусловленных неустойчивостью Хельфриха.

Обнаружено, что воздействие света на смектическую фазу жидких кристаллов в области температур фазового перехода смектик-нематик реализуется в двух структурных режимах, локальном и режиме протяженных деформаций.

Обнаружено, что при переходе нематического жидкого кристалла в изотропную фазу под действием светового пучка формируется аксиально симметричная анизотропная структура.

Четвертая глава диссертации посвящена результатам исследования оптической ориентации в поглощающих жидких кристаллах.

Установлено, что в НЖК с примесью азобензольных красителей возникает дополнительная зависимость оптического вращающего момента от угла между световым полем и директором, которая даже может приводить к изменению направления крутящего момента. Благодаря этой зависимости был впервые осуществлен чисто оптический переход первого рода между стационарными состояниями поля директора. Переход характеризуется широкой областью бистабильности. Такой переход наблюдался в НЖК с примесью дендримеров, содержащих терминальные азобензольные фрагменты, при нормальном падении света на планарный образец. Род наблюдаемого перехода может быть изменен путем изменения внешнего низкочастотного электрического поля или поворотом плоскости поляризации пучка света. В этой же жидкокристаллической системе наблюдался также переход первого рода при изменении низкочастотного поля и фиксированной интенсивности света. Развито теоретическое описание этих ориентационных переходов в случае падения на НЖК необыкновенной световой волны, дающее достаточно хорошее описание экспериментальных результатов.

В диссертации также наблюдался другой тип скачкообразных ориентационных переходов, которые могут происходить только при наклонном падении света на слой НЖК, к которому приложено низкочастотное поле. Дано теоретическое описание переходов таких типа, объясняющее их основные закономерности.

Проведено сравнение оптической ориентации в НЖК с примесью низкомолекулярных азокрасителей и НЖК с примесью высокомолекулярных соединений, содержащих фрагменты, аналогичные по строению низкомолекулярным красителям. Наблюдено, что переход от низкомолекулярных к высокомолекулярным добавкам в несколько раз повышает вращающий оптический момент и приводит к смене характера ориентационной оптической нелинейности.

В диссертации предложен механизм оптической ориентации в поглощающих жидких кристаллах, отличный от механизма Яноши (известного пионерскими исследованиями по нелинейной оптике жидких кристаллов, допированных красителями).

Он основан на учете ориентационной селективности возбуждения молекул поляризованным светом и нецентрального характера межмолекулярных сил и по оценкам приводит к таким же величинам эффектов, что и механизма Яноши.

Переходя к оценке диссертации в целом, следует констатировать, что она является объемным исследованием, содержащим важные новые оригинальные результаты и выполненном в современном научном стиле с широким применением компьютерных вычислений.

Достоверность основных результатов диссертации не вызывает сомнений, так как в эксперименте она подтверждается соответствием результатов полученных на образцах различного состава, а также согласием результатов теоретических расчетов с экспериментом. Многие результаты работы подтверждены в последующих публикациях других авторов.

Новизна работы обусловлена тем, что большая часть оптических эффектов, исследованных в диссертации, впервые обнаружена в работах автора диссертации. Важнейшими новыми результатами диссертанта являются первое наблюдение светоиндуцированного фазового перехода, аналогичного переходу Фредерикса, а также выяснение специфических свойств оптической ориентации директора непоглощающих НЖК по сравнению с его ориентацией низкочастотными полями, обнаружение возрастания эффективности оптической ориентации в НЖК при переходе от низкомолекулярных к высокомолекулярным допантам и реализация с их помощью светоиндуцированного фазового ориентационного перехода первого рода.

Работы автора хорошо известны научной общественности. Они представляют собой существенный вклад в развитие нелинейной оптики жидких кристаллов.

Я лично, будучи давно знакомым с работами А.В.Золотко, считаю, что их научная значимость и объем позволяли бы А.В.Золотко представить к защите диссертацию еще лет 10 назад!

Следует также привести ряд конкретных частных замечаний по диссертации.

1. В диссертации не достаточно подробно приведены характеристики аппаратуры, использованной в проведении экспериментов и практически полностью отсутствует описание методики приготовления образцов, использованных в экспериментах.

2. Количественные экспериментальные данные по порогам переходов в основном приводятся как общая мощность светового пучка в точке перехода. Наряду с этими данными хотелось бы видеть в диссертации пороговые мощности пучка на единицу площади

3. Что касается теоретических расчетов влияния интенсивного света на изменение поля директора, то практически все соответствующие расчеты выполнены в одноконстантном приближении (по упругим константам). Учет различия упругих констант в жидких кристаллах позволил бы автору сделать более достоверными сравнения теории и экспериментально.

4. Следует сказать, что по поводу оформления диссертации и ее языка в целом претензий нет за исключением претензии по поводу вольностей в использовании терминологии. Например, «горизонтальная», «вертикальная» поляризация, «степень эллиптичности» и т. д. Число опечаток и описок, которые, к сожалению, есть в тексте диссертации, не превышает разумного предела, чтобы заслуживать их конкретное упоминание в отзыве.

Сделанные замечанию не затрагивают сущности проделанной в диссертации работы. Работа представляется цельным, законченным научным трудом. Полученные в диссертации результаты можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в области нелинейной оптики жидких кристаллов, перспективное для новых эффективных приложений жидких кристаллов.

Результаты диссертации хорошо апробированы. Они опубликованы в 48 статьях в рецензируемых научных журналах и доложены на многих российских и международных конференциях.

Автореферат точно соответствует основному содержанию диссертации.

Считаю, что диссертационная работа **"Оптическая ориентация жидких кристаллов"** полностью отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям и соответствует «Положению ВАК о порядке присуждения ученых степеней», утвержденному постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а ее автор, Золотыко Александр Степанович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Старший научный сотрудник ИТФ им. Ландау РАН,

доктор физико-математических наук, профессор

Подпись Белякова В.А. удостоверяю

Ученый секретарь ИТФ им. Ландау РАН, к.х.н.

Беляков В.А.

Крашаков С.А.



Официальный оппонент

старший научный сотрудник Института теоретической физики им.Л.Д.Ландау РАН,
Московская обл., Ногинский р-н, г.Черноголовка, пр.акад.Семенова, д. 1а

д.ф.-м.н., проф. Владимир Алексеевич Беляков,

тел. 8-499-137-32-44, E-Mail: bel@landau.ac.ru

Список публикаций

официального оппонента В.А. Белякова по тематике диссертации Золотько Александра Степановича “Оптическая ориентация жидких кристаллов”, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика

1. V.A. Belyakov, *Localized Modes in Optics of Chiral Liquid Crystals*, Mol. Cryst. Liq. Cryst., **612**, 81-97 (2015).
2. K. Nowicka, D. Dardas, W. Kuczyński, V.A. Belyakov, D.V. Shmeliova, *Director distribution and surface anchoring potential in Grandjean-Cano wedge*, Liquid Crystals, **41**(10), 1448-1454 (2014).
3. I. Ilchishina, E. Tikhonova, V. Belyakov, T. Mykytiuka, *Manifestation of the Chiral Liquid Crystal Boundary Conditions in Lasing Features*, Mol. Cryst. Liq. Cryst., **591**(1), 128-134 (2014).
4. V.A. Belyakov, S.V. Semenov, *Optical defect modes at an active defect layer in photonic liquid crystals*, ЖЭТФ, **145**(5), 906-922 (2014).
5. V.A. Belyakov, *Localized Optical Modes in Optics of Chiral Liquid Crystals*, In: “New Developments in Liquid Crystals and Applications”, P.K. Choudhury, (Ed.), Nova Publishers: New York, Chapter 7, p. 199-227 (2013). ISBN: 978-1-62618-677-4. 296 pp.
6. V.A. Belyakov, S.V. Semenov, D.V. Shmeliova, *Director Distribution in Cano-Grandjean Wedge Influenced by Surface Anchoring*, Mol. Cryst. Liq. Cryst., **559**, 31-38 (2012).
7. V.A. Belyakov, S.V. Semenov, *Optical defect modes in chiral liquid crystals*, ЖЭТФ, **139**(4), 798-815 (2011).