

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Института физики
им. Л.В. Киренского Сибирского
отделения Российской академии наук
– обособленного подразделения
ФИЦ КНЦ СО РАН

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу
**Галёва Романа Владимировича «Исследование процессов поглощения и
преобразования лазерного излучения в твердых и
жидкокристаллических сплошных средах»**, представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
1.1.9 – механика жидкостей, газа и плазмы.

Диссертация Галёва Р.В. посвящена исследованию с использованием численного моделирования поверхностных и объемных источников тепла, входящих в уравнение теплопроводности, необходимого при рассмотрении технологических процессов лазерной обработки материалов, а также изучению особенностей взаимодействия электромагнитного поля и нематического жидкого кристалла (НЖК). Исследования проводятся на базе трехмерного уравнения ориентационной динамики НЖК, уравнений Максвелла и положений геометрической оптики с использованием компьютерных кодов, реализованных автором.

Актуальность работы определяется развитием лазерной техники, в частности появлением новых волоконных лазеров, разработкой новых способов обработки материалов, таких как «селективное лазерное спекание» керамических и металлических порошков для создания трехмерных изделий со сложной формой и пространственной композицией материалов. Актуальность также определяется экспериментальным обнаружением особенностей НЖК, состоящих в изменении частотного спектра и пространственного распределения фазы периодического колебания во

времени электромагнитного излучения при прохождении через область, занятую средой ЖК, которые можно использовать для создания миниатюрных систем управления параметрами излучения в оптоволокне с целью упрощения получения электромагнитного излучения с заданными характеристиками.

Научная новизна состоит в следующем.

Разработан параллельный расчетный код для решения методом «Finite Difference Time Domain» (FDTD) уравнений Максвелла для анизотропной неоднородной среды, способный моделировать взаимодействие лазерного излучения с твердыми и жидкокристаллическими сплошными средами.

При численном моделировании задач лазерной резки показана необходимость учета многократных отражений для правильного вычисления теплового потока; в задаче о лазерном сверлении продемонстрирована важность учета интерференции; в задаче о лазерном спекании объяснены причины различного поведения керамических и металлических частиц. Метод FDTD впервые применен к задачам лазерного сверления и селективного лазерного спекания.

В оптоволоконных системах управления электромагнитным излучением с помощью полости, заполненной нематическим ЖК, показана предпочтительность использования определенной формы полости, обеспечивающей меньшее рассеяние и предотвращающей ненужную фокусировку пучка.

Предложен способ управления величиной углового момента оптического вихря путем изменения толщины слоя и/или силы дисклинации нематического жидкого кристалла.

Разработан расчетный код для совместного решения уравнений Максвелла и уравнений динамики ЖК-среды, показана возможность возникновения стохастических режимов при определенных поляризации и знаке диэлектрической анизотропии; воспроизведено в численном расчете явление самофокусировки лазерного пучка в нелинейной среде.

По материалам диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 7 работ, удовлетворяющих требованиям ВАК.

В ведущей организации основные результаты диссертационной работы докладывались автором и обсуждались 13 апреля 2022 года на научном семинаре отдела оптики ИФ СО РАН им. Л.В. Киренского под руководством академика В.Ф. Шабанова.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 63 наименований, двух приложений.

Общий объем диссертации составляет 146 страниц, включая 85 рисунков и 4 таблицы.

Во **Введении** описана актуальность темы исследования, сформулированы цели диссертационной работы, перечислены полученные в диссертации новые результаты и положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

В **Главе 1** описан метод численного решения уравнений Максвелла (FDTD), который используется в работе тогда, когда метод геометрического приближения неприменим в силу условий задачи (характерные размеры сравнимы с длиной волны, имеется развитая пористая поверхность раздела двух сред). Описана реализация FDTD на кубической декартовой сетке для анизотропной среды. Предложена задача для верификации анизотропного кода. Подробно описан метод численного моделирования для расчета энергии лазерного излучения поглощенной поверхностью металла в канале реза. Метод основан на положениях геометрической оптики и использует трассировку луча. Так как в литературе широко распространен подобный метод, с тем отличием, что трассировкой пренебрегают без дополнительных слов, обосновывающих это пренебрежение, то в главе отдельно приведен расчет, который показывает существенную разницу в результатах с трассировкой и без трассировки, из чего делается вывод, что в общем случае при моделировании нельзя пренебрегать трассировкой луча, а если трассировкой решено пренебречь, то следует это решение обосновывать.

В **Главе 2** описан личный вклад в работу, посвященную резке металлов. Личный вклад состоял в численном моделировании, которое дополняло экспериментальную часть работы. Кратко представлены выводы коллективной работы. Проведено моделирование распределения лазерного излучения в изотропных средах. На примере задачи о лазерном сверлении металла сравнены два метода: FDTD и геометрическая оптика. Показаны области совпадения и различия расчетов. Наглядно показана важность учета интерференции отраженного излучения. Сделано предположение о том, что сокращение длины волны излучения или увеличение поперечного радиуса пучка способно уменьшить размер «гофра» в канале сверления и, за счет этого, улучшить качество поверхности отверстия при лазерном сверлении металлов. На примере задачи о селективном спекании сравнены два модельных материала и сделано предположение, что для равномерного прогрева важно учитывать совокупное влияния двух явлений (фокусировки и скин-эффекта). Если же материал уже задан, то для равномерного прогрева нужно подбирать или длину волны, или радиус шаровых частиц, а в случае

спекания смеси шаровых частиц из разных материалов (металл и керамика) одним лазерным пучком (длина излучения уже задана единой), для вариативного управления равномерностью прогрева смеси остается только радиус шаровых частиц.

Глава 3 посвящена некоторым вопросам изменения электромагнитного излучения в неподвижной анизотропной среде. Смоделированы два варианта исполнения полости в оптоволокне для разрабатываемой экспериментаторами системы управления свойствами лазерного излучения. Сравнены две формы полости в оптоволокне (круглое отверстие поперек оптоволокна, поперечный разрез оптоволокна), заполненные НЖК, через которые проходит лазерное излучение. Показано, что на рассеяние излучения влияет кривизна поверхности полости - плоские стенки разреза рассеивают меньше чем боковая цилиндрическая поверхность отверстия, и потому поперечный разрез предпочтительнее сквозного отверстия. Кроме того, показано, что от ширины зазора разреза также зависит пропускная способность системы - в этом отношении система ведет себя как «оптический резонатор с потерями, что указывает на возможность управления излучением при помощи ширины зазора.

Кроме влияния формы полости на излучение в главе исследована способность НЖК изменять свойство пучка света закручивать экран-мишень. Способность закручивания рассматривается в работе как z-компонента момента вектора Пойнтинга - на основании интерпретации вектора Пойнтинга, как плотности импульса электромагнитного поля. Применены методы численного моделирования для исследования зависимости момента вектора Пойнтинга пучка света, пропущенного через слой НЖК, от силы дисклинации, от ширины слоя НЖК, а также от первоначального момента вектора Пойнтинга. Показано, что имеется возможность управления моментом вектора Пойнтинга путем пропускания излучения через слой НЖК с заданными параметрами.

В **Главе 4** описан численный метод для моделирования взаимного воздействия электромагнитного излучения и среды НЖК. Кроме уравнений Максвелла, решаются «материальные» уравнения, где подвижность НЖК выражается в изменении директора, тогда как скорость самой среды НЖК принята равной нулю. Рассмотрены некоторые вопросы, связанные с методологией (формулы вычисления данных, условия на временной шаг, критерии сходимости расчета), а также реализацией и верификацией кода.

Отмечено, что для сходимости расчета без учета упругости НЖК необходима круговая поляризация проходящего пучка при положительной анизотропии НЖК, при линейной поляризации проходящего пучка света и в

отсутствии упругости численные расчеты расходятся. В этой связи отмечено сходство численного расчета и экспериментальных результатов - в статьях о «нематиконах» (пространственных структурах НЖК в пучке света) экспериментаторы упоминают оба параметра: и поляризацию излучения, и знак анизотропии НЖК, стремясь (для сохранения стабильной структуры НЖК) подбирать их точно в такой же комбинации, как в данной главе эти параметры подбираются для сходимости численных расчетов. Поэтому в данной работе проведен качественный анализ аналитического выражения для «электроориентационного» эффекта, выражающегося в изменении направления директора под действием переменного электромагнитного поля в некоторой точке пространства. Выяснен характер эффекта: при положительной анизотропии НЖК, директор ориентируется в плоскости «поляризации» (плоскость, в которой лежит эллипс, заметаемый электрическим вектором излучения за период колебания, взятым в некоторой точке пространства); при отрицательной анизотропии НЖК, директор стремится сориентироваться по нормали к плоскости «поляризации». Сделано предположение о том, что расхождение численных расчетов отражает реальную нестабильность. Проведено моделирование прохождения пучка лазерного излучения через слой нематического жидкого кристалла. Полученные результаты сравниваются с результатом оценочной формулы Б.Я. Зельдовича. Сделан вывод о важности учета не только изменения параметров среды, но и изменения параметров излучения, закономерно следующим за изменением среды.

В Заключении изложены результаты работы.

В Приложении А описано аналитическое решение задачи «собственные моды оптоволокна» и предложен компьютерный алгоритм для построения решения.

В Приложении Б описано оригинальное аналитическое решение задачи «падение плоской волны на слой холестерического жидкого кристалла» и предложен метод построения поля плоской электромагнитной волны, проходящей через стопку пластин с анизотропией холестерического типа.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертационной работы.

Замечания и вопросы по содержанию и оформлению диссертации следующие:

1. При решении задач о лазерной резке, сверлении и селективном спекании в диссертации определяется распределение поглощенной энергии в материале, но не учитываются процессы теплопроводности, приводящие к ее перераспределению. Такой учет мог бы повысить точность прогнозирования неравномерности прогрева различных участков и, в конечном счете, повысить качество лазерной обработки материалов. Представляется, что особенно существенными эффекты теплопроводности могли бы оказаться на начальном этапе лазерного сверления, когда, как показывают полученные автором результаты, из-за интерференции распределение поглощенной энергии сильно неравномерное, что должно создавать значительные градиенты температуры. Можно высказать в качестве пожелания для дальнейшей работы сопрягать расчет поглощения энергии лазерного излучения с решением задачи теплопроводности в образцах.

2. При моделировании прохождения света через полость в оптоволокне, заполненную жидким кристаллом, никак не объясняется из каких соображений было выбрано использованное в расчетах распределение директора внутри полости в виде клиновой дисклинации. Естественно, возникает вопрос, как бы изменились полученные результаты в случае других возможных конфигураций директора нематического жидкого кристалла.

3. При проведении верификации расчетного кода на задачах, имеющих точные решения, лучше было бы везде указывать величину погрешности численного решения. Это было бы содержательнее, чем, например, использованная оригинальная фраза «решения визуально неотличимы» при описании результатов моделирования эффекта Фредерикса.

4. В диссертации отмечается, что полученный при моделировании прохождения света через слой жидкого кристалла угол отклонения директора на порядок отличается от того, что дает оценка по формуле из статьи Б.Я. Зельдовича и Н.В. Табиряна. Это неудивительно, учитывая, что моделируется прохождение узкого пучка, а формула получена для плоской волны. Представляется, однако, что при моделировании нелинейных эффектов, связанных с взаимным влиянием электромагнитного излучения и динамики сплошной жидкокристаллической среды, можно было бы выполнить сравнение с результатами исследований других авторов. В частности, достаточно детально такие задачи были рассмотрены в работах С.И. Трашкева.

Несмотря на сделанные замечания следует сделать вывод о том, что результаты диссертации имеют научную ценность и обладают новизной. Диссертация представляет законченное исследование, выполненное на хорошем уровне и убедительно демонстрирующее высокую квалификацию

автора по указанной специальности. Выполненная работа полностью удовлетворяет всем квалификационным требованиям, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям, в том числе соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней». Галёв Роман Владимирович заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 «Механика жидкостей, газа и плазмы».

Сведения о ведущей организации:

Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

Россия, 660036 г. Красноярск, Академгородок, 50, строение No 38

Адрес официального сайта в сети интернет: <http://kirensky.ru/>

Телефон: +7(391) 243-26-35

адрес электронной почты: dir@iph.krasn.ru

Руководитель подразделения, давшего заключение на диссертацию:

Зырянов Виктор Яковлевич,

заведующий лабораторией молекулярной спектроскопии

Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН

доктор физ.-мат. наук, профессор

30 марта 2023 года

Подпись Зырянова В.Я. заверяю

уг. секретарь
К.С. - М. В.

В. Зырянов

СВЕДЕНИЯ О ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

по диссертации Галёва Романа Владимировича
"Исследование процессов поглощения и преобразования лазерного излучения в твердых и жидкокристаллических сплошных средах",
представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 - Механика жидкости, газа и плазмы

| | |
|--|---|
| Полное наименование организации в соответствии с уставом: | Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН |
| Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом: | ИФ СО РАН |
| Ведомственная принадлежность организации | Министерство науки и высшего образования РФ |
| Полное наименование структурного подразделения, составляющего отзыв: | Лаборатория молекулярной спектроскопии |
| Почтовый адрес организации: | Россия, 660036 г. Красноярск, Академгородок, 50, строение № 38 |
| Веб-сайт | http://kirensky.ru/ |
| Телефон | +7(391) 243-26-35 |
| Адрес электронной почты | dir@iph.krasn.ru |

Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющего отзыв, в рецензируемых научных изданиях за последние пять лет по теме диссертации (не более 15 публикаций).

| № | Авторы | Название статьи, журнал, год, том, №, страницы |
|---|---|--|
| 1 | A.M. Parshin, V.Ya. Zyryanov, and V.F. Shabanov | Self-organized ensembles of nematic domains in magnetic and electric fields // Phys. Rev.E, 2022, 106, 024703 |
| 2 | Vladimir A. Gunyakov, Mikhail N. Krakhalev, Ivan V. Timofeev, Victor Ya. Zyryanov, Vasily F. Shabanov | Optical modes of multilayered photonic structure containing nematic layer with abnormal electroconvective rolls // Optical Materials, 2022, Volume 100, 109630 |
| 3 | Gunyakov V.A., Sutormin V.S., Myslivets S.A., Shabanov V.F., Zyryanov V.Y. | Synchronously controlled optical modes in the transmittance and reflectance spectra of multilayer photonic structure with dual-frequency nematic liquid crystal // Physical Review E. 2022. T. 105. № 2. С. А62. |
| 4 | О.О. Прищепа, В.С. Сутормин, М.Н. Крахалев [и др.] | Азимутальный поворот периодической структуры линейных дефектов в слое холестерика с планарно-коническими граничными условиями // Жидкие кристаллы и их практическое |

| | | |
|----|---|---|
| | | использование. 2022. Т. 22. № 3. С. 111-115. |
| 5 | В.С. Сутормин, М.Н. Крахалев, О.О. Прищепа, В.Я. Зырянов | Ориентационный переход в слое нематика с гомеотропно-коническими граничными условиями, индуцированный ионной модификацией поверхностного сцепления // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2022. Т. 22. № 3. С. 105-110. |
| 6 | А.М. Паршин, В.А. Гуняков, В.Я. Зырянов, В.Ф. Шабанов | Структура и оптические свойства самоорганизованных ансамблей нематических доменов на поверхности поликарбоната // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2022. Т. 22. № 1. С. 84-88. |
| 7 | Alexander M. Parshin, Victor Y. Zyryanov, and Vasily F. Shabanov | Interference oscillations in the optical response of a hybrid-aligned nematic with a surface disclination line to a pulsed magnetic field // Journal of the Optical Society of America B, 2021, Vol. 38, Issue 10, pp. 2993-2999 |
| 8 | Anna P. Gardymova, Mikhail N. Krakhalev, Vladimir Yu. Rudyak, Vadim A. Barbashov, Victor Ya. Zyryanov | Polymer-Dispersed Cholesteric Liquid Crystal under Homeotropic Anchoring: Electrically Induced Structures with $\lambda/2$ -Disclination // Polymers, 2022, 14(7), 1454 |
| 9 | Mikhail N. Krakhalev, Rashid G. Bikbaev, Vitaly S. Sutormin, Ivan V. Timofeev and Victor Ya. Zyryanov | Nematic and Cholesteric Liquid Crystal Structures in Cells with Tangential-Conical Boundary Conditions // Crystals, 2019, 9(5), 249 |
| 10 | Guan-Fu Sung, Po-Chang Wu, Victor Ya. Zyryanov, and Wei Lee | Electrically active and thermally passive liquid-crystal device toward smart glass // Photonics Research, 2021, Vol. 9, Issue 11, pp. 2288-2295 |
| 11 | Parshin A.M., Sutormin V.S., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. | Polar anchoring energy and tilt angle measured by magneto-optical technique in nematic doped with ionic surfactant // Liquid Crystals. 2020. V. 47, No. 12. P. 1825-1831. |
| 12 | Denis A. Kostikov, Mikhail N. Krakhalev, Oxana O. Prishchepa, Victor Ya. Zyryanov | Nematic Structures under Conical Anchoring at Various Director Tilt Angles Specified by Polymethacrylate Compositions // Polymers 2021, 13(17), 2993 |
| 13 | Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Sutormin V.S., Bikbaev R.G., Timofeev I.V., Zyryanov V.Ya. | Electrically induced transformations of defects in cholesteric layer with tangential-conical boundary conditions // Scientific Reports. 2020. V. 10(1). P. 4907-1–9. |

| | | |
|----|---|--|
| 14 | V. S. Sutormin, M. N. Krakhalev, I. V. Timofeev, R. G. Bikbaev, O. O. Prishchepa, and V. Ya. Zyryanov | Cholesteric layers with tangential-conical surface anchoring for an electrically controlled polarization rotator // Optical Materials Express, 2021, Vol. 11, Issue 5, pp. 1527-1536 |
| 15 | Oxana Prishchepa, Mikhail Krakhalev, Vladimir Rudyak, Vitaly Sutormin, Victor Zyryanov | Electrically turning periodic structures in cholesteric layer with conical-planar boundary conditions // Scientific Reports, 2021, volume 11, Article number: 8409 |

Директор ИФ СО РАН —

Д.А. Балаев

27.01.2023