

Заключение диссертационного совета МГУ.013.4  
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук  
Решение диссертационного совета от «27» ноября 2024 г. № 13

О присуждении Рыжикову Платону Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Энергия, импульс и угловой момент электромагнитного поля в средах с нелокальным нелинейным оптическим откликом» по специальности 1.3.19. Лазерная физика (физико-математические науки) принята к защите диссертационным советом 02 октября 2024 г., протокол № 10.

Соискатель Рыжиков Платон Сергеевич, 1997 года рождения, в 2020 году окончил магистратуру физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по направлению 03.04.02 «Физика». В 2024 году окончил очную аспирантуру физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по специальности «Лазерная физика».

Соискатель работает ведущим математиком на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Диссертация выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Макаров Владимир Анатольевич, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет, кафедра общей физики и волновых процессов, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

- Розанов Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук», лаборатория атомной радиоспектроскопии, главный научный сотрудник
- Манцызов Борис Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет, кафедра общей физики, профессор

- Фёдоров Михаил Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Отдел Технологий и Измерений Атомного Масштаба Центра Естественно-Научных Исследований, главный научный сотрудник

дали положительные отзывы на диссертацию.

Выбор официальных оппонентов обосновывался их глубокой экспертизой в области нелинейной оптики и лазерной физики. Оппоненты имеют большое число работ по специальности диссертации, опубликованных в высокорейтинговых журналах. В частности, Н.Н. Розанов является автором ряда работ, близких к теме диссертации. Оппоненты не имеют совместных проектов и публикаций с соискателем.

Соискатель имеет 8 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 8 работ, из них 8 статей (6.29 п.л.), опубликованных, в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

1. Ryzhikov P. S., Makarov V. A. Intrinsic symmetry of nonlocal nonlinear optical susceptibilities // *Laser Physics Letters*. — 2022. — Т. 19, № 3. — С. 035401. — WoS JIF=1.4 / 0,56 п.л. / вклад соискателя 60%.

2. Рыжиков П. С., Макаров В. А. Тензор энергии-импульса Минковского в нелинейной оптике сред с нелокальностью оптического отклика // *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. — 2022. — Т. 162, № 1. — С. 45—54. — РИНЦ ИФ=1.173 / 0,80 п.л. / вклад соискателя 80%.

3. Ryzhikov P. S., Makarov V. A. The additional optical angular momentum flux in media with nonlocality of nonlinear optical response // *Laser Physics Letters*. — 2022. — Т. 19, № 11. — С. 115401. — WoS JIF=1.4 / 0,90 п.л. / вклад соискателя 80%.

4. Ryzhikov P. S., Makarov V. A. Intrinsic symmetry of nonlocal nonlinear optical susceptibility tensor in degenerate multi-wave mixing // *Laser Physics Letters*. — 2023. — Т. 20, № 10. — С. 105401. — WoS JIF=1.4 / 0,74 п.л. / вклад соискателя 70%.

5. Рыжиков П. С., Макаров В. А. Энергия, импульс и угловой момент электромагнитного поля в среде с нелокальностью оптического отклика при вырожденном по частоте нелинейном взаимодействии волн // *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. — 2024. — Т. 165, № 2. — С. 152—164. — РИНЦ ИФ=1.173 / 1,20 п.л. / вклад соискателя 70%.

6. Ryzhikov P. S., Makarov V. A. Peculiarities of the intrinsic symmetry of linear and nonlinear optical susceptibility tensors in nonabsorbing inhomogeneous media with nonlocality of optical response // *Laser Physics Letters*. — 2024. — Т. 21, № 8. — С. 085401. — WoS JIF=1.4 / 0,71 п.л. / вклад соискателя 70%.

7. Ryzhikov P. S., Makarov V. A. Effect of the Contribution of the Local and Nonlocal Optical Response of an Isotropic Gyrotropic Medium on the Components of the Minkowski Energy–Momentum Tensor of the Electromagnetic Field of the Self-Focusing Beam // *Physics of Wave Phenomena*. — 2024. — Т. 32, № 3. — С. 227—231. — WoS JIF=1.1 / 0,52 п.л. / вклад соискателя 70%.

8. Рыжиков П. С., Макаров В. А. Орбитальная и спиновая составляющие плотности потока углового момента монохроматического излучения в непоглощающих средах с нелокальным нелинейным оптическим откликом // *Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия* — 2024. — Т. 79, № 4. — С. 2440403. — РИНЦ ИФ=0.459 / 0,86 п.л. / вклад соискателя 70%.

На диссертацию и автореферат поступило 4 дополнительных отзыва, все положительные.

Диссертационный совет отмечает, что представленная диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований был решён ряд фундаментальных вопросов нелинейной оптики сред, обладающих нелокальным оптическим откликом. Диссертация посвящена изучению особенностей аналитических выражений для плотностей и плотностей потоков энергии, импульса и углового момента электромагнитного поля в средах с нелокальным нелинейным оптическим откликом. Получены соотношения внутренней симметрии тензоров нелокальной нелинейной оптической восприимчивости в однородных и неоднородных средах произвольного класса пространственной симметрии. Получены аналитические выражения для плотностей и плотностей потоков энергии, импульса и углового момента электромагнитного поля, связанных с нелокальностью оптического отклика среды произвольного порядка нелинейности. Получены аналитические выражения для орбитальной и спиновой составляющих плотности и плотности потока углового момента электромагнитного поля в средах с нелокальным нелинейным оптическим откликом.

Полученные в работе соотношения внутренней симметрии тензоров нелокальной нелинейной оптической восприимчивости вместе с ограничениями, накладываемыми пространственной симметрией среды, позволяют выразить все компоненты этих тензоров

через конечное число независимых компонент. Найденные выражения для компонент плотностей и плотностей потоков энергии, импульса и углового момента электромагнитного поля, а также орбитальной и спиновой составляющих углового момента, не только необходимы для проверки корректности решения задач нелинейной оптики, но и дают возможность использовать законы сохранения энергии, импульса и углового момента для их эффективного решения. Разработанные в диссертации методы получения связанных с нелокальностью оптического отклика добавок к классическим выражениям для энергии, импульса, углового момента и плотностей потоков этих величин в первом порядке по параметру пространственной дисперсии могут быть использованы для нахождения уточняющих их формул во втором и более высоких приближениях по этому параметру, а также для учета других оптических свойств среды.

Диссертация представляет собой самостоятельное законченное исследование, обладающее внутренним единством. Положения, выносимые на защиту, содержат новые научные результаты и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку:

I. Для однородных непоглощающих нелинейных сред произвольного класса пространственной симметрии, проявляющих нелокальность оптического отклика  $n$ -порядка, в первом приближении по параметру пространственной дисперсии  $d/\lambda$  ( $d$  – масштаб проявления нелокальности оптического отклика,  $\lambda$  – длина волны) справедливы следующие утверждения:

1. Соотношения внутренней симметрии тензора нелокальной нелинейной оптической восприимчивости  $n+2$ -го ранга, последний индекс которого связан с дифференцированием напряженности электрического поля по пространственным координатам, включают

- симметрию по перестановке любых индексов, относящихся к электрическим полям на одинаковых частотах.
- антисимметрию по перестановке первого и предпоследнего индексов с одновременной перестановкой первой и последней частот в последовательности частотных аргументов.
- равенство нулю суммы соответственно деленных на произведение кратностей вырождения первой и последней частот в последовательностях частотных аргументов трех компонент этого тензора, связанных циклической перестановкой первого, последнего и находящегося между

ними частотных аргументов, и такой же перестановкой индексов, соответствующих этим частотам.

2. Вклад нелокальности нелинейного оптического отклика отражается

- в формулах для плотностей энергии, импульса и углового момента электромагнитного поля в виде дополнительных слагаемых, содержащих пространственные производные напряженности электрического поля, в выражении для входящей в них поляризации среды.
- в формулах для компонент плотностей потоков энергии и импульса в виде новых слагаемых, содержащих компоненты тензора нелокальной оптической восприимчивости  $n$ -го порядка.
- в формулах для компонент плотности потока углового момента в виде двух новых групп слагаемых, первая из которых содержит явно зависящие от пространственных координат слагаемые, обусловленные спецификой выражения для плотности потока импульса в среде, демонстрирующей нелокальность нелинейного оптического отклика, а вторая состоит из явно независимых от пространственных координат слагаемых, не содержащих пространственных производных напряженности электрического поля.

3. Выражения для плотности и плотности потока углового момента электромагнитного поля могут быть представлены в виде трех групп слагаемых, первые две из которых являются соответственно орбитальной и спиновой составляющими этих величин, а интегральные вклады третьих групп слагаемых в формулы для полного углового момента и его потока равны нулю.

II. Отличительной чертой соотношений внутренней симметрии тензоров локальной нелинейной оптической восприимчивости  $n+1$ -го ранга и нелокальных нелинейных оптических восприимчивостей  $n+p+1$ -го ранга ( $p=1,2,\dots$ ), описывающих пространственную дисперсию в  $p$ -ом приближении по параметру  $d/\lambda$ , в неоднородных непоглощающих средах произвольного класса пространственной симметрии является

1. возникновение в соотношениях, связывающих компоненты тензора нелокальной линейной восприимчивости  $p+2$ -го ранга, пространственных производных от компонент тензоров нелокальных оптических восприимчивостей всех более высоких рангов, чем  $p+2$ .

2. возникновение в записанном в первом приближении по параметру пространственной дисперсии ( $\rho=1$ ) соотношении внутренней симметрии тензора локальной оптической восприимчивости, описывающего нелинейность  $n$ -го порядка, первых пространственных производных от компонент тензора нелокальной оптической восприимчивости того же порядка.

III. При самофокусировке эллиптически поляризованного гауссова пучка в непоглощающей однородной изотропной гиротропной среде, демонстрирующей кубическую нелинейность, максимальная величина обусловленных нелинейным откликом вещества компонент тензора энергии-импульса Минковского достигается в тех точках пространства, где поле пучка имеет линейную поляризацию, и может достигать десяти процентов от компонент тензора энергии-импульса, связанных с локальным линейным оптическим откликом среды, в тех точках среды, где его интенсивность в пятьдесят раз превышает максимальную интенсивность в падающем пучке. Нелокальность оптического отклика среды приводит к ненулевому значению спиновых составляющих плотности углового момента и плотности его потока в тех точках пространства, где пучок поляризован линейно.

На заседании 27 ноября 2024г. диссертационный совет принял решение присудить Рыжикову Платону Сергеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **18** человек, из них **8** докторов наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика (физико-математические науки), участвовавших в заседании, из **24** человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» – **18**, «против» – **0**, недействительных бюллетеней – **0**.

Председатель  
диссертационного совета МГУ.013.4,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Андреев Анатолий Васильевич

Ученый секретарь  
диссертационного совета МГУ.013.4,  
кандидат физико-математических наук

Коновко Андрей Андреевич

27 ноября 2024 г.