

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

Национального исследовательского
Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского,
доктор физико-математических наук



М.В. Иванченко

« 18 » *ноябрь* 2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о диссертации Александрова Леонида Николаевича

«Механизмы возбуждения квазипостоянных токов, инициирующих генерацию терагерцового излучения при воздействии на газы фемтосекундными лазерными импульсами»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.19 – лазерная физика

Диссертация Л.Н. Александрова посвящена теоретическому исследованию явления генерации квазипостоянных остаточных токов в процессе ионизации атомов и молекул газа короткими интенсивными лазерными импульсами. Это явление привлекает в настоящее время большое внимание в связи с возможностью использования его для генерации широкополосного терагерцового излучения, источником которого служат собственные колебания образованной плазмы. Большое число публикаций, вышедших в самых рейтинговых международных журналах в последнее десятилетие, указывает на не-

ослабевающий интерес к данной теме исследования. Создание источников широкополосного терагерцового излучения является чрезвычайно актуальным как для различных научных и технических приложений, так и для детектирования самих ионизирующих лазерных импульсов, а также диагностики ионизируемого газа. Таким образом, представленные в диссертации исследования относятся к достаточно быстро развивающемуся новому направлению в современной лазерной физике, связанному с развитием методов генерации терагерцового излучения, и **актуальность темы** диссертационной работы не вызывает сомнений.

Целью настоящей диссертационной работы являлось теоретическое исследование различных способов генерации остаточного тока при ионизации атомов и выстроенных полярных и неполярных молекул одноцветными и двухцветными лазерными импульсами. Поставленные в работе задачи решаются с использованием современных методов квантовой механики и атомной физики. Тематика исследования, формулировка целей и задач исследования, используемые методы решения, область приложения исследования свидетельствуют о том, что представленная диссертационная работа **соответствует паспорту специальности 1.3.19 – лазерная физика.**

Структура и содержание диссертации. Диссертация Л.Н. Александрова состоит из введения, трёх глав, заключения, приложения, содержащего описание численной схемы решения нестационарного уравнения Шрёдингера, списка литературы и изложена на 147 страницах, включая 46 рисунков. Список цитированной литературы содержит 160 библиографических ссылок.

Во введении кратко обосновывается актуальность диссертационной работы, определяются цели и задачи работы, обсуждается ее научная и практическая значимость, приводятся сведения о публикациях и апробации результатов, а также содержатся положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации рассматривается процесс генерации остаточного тока в атомарном газе двухцветным лазерным импульсом с квази-монохроматическими компонентами на основной и удвоенной частоте. На

основе численного решения нестационарного уравнения Шрёдингера для атома водорода находятся зависимости остаточной плотности тока от относительной фазы компонент полей при разных их интенсивностях, а также от частоты и эллиптичности компонент поля. Продemonстрировано, что оптимальная (с точки зрения эффективности генерации остаточной плотности тока) разность фаз между полем на основной и удвоенной частоте сильно зависит от интенсивности основного поля. Предложено объяснение данного эффекта кулоновским взаимодействием отрываемого электрона с родительским ионом. Проведены расчеты в рамках полуклассической модели, учитывающей взаимодействие фотоэлектрона с родительским ионом, подтверждающие важную роль кулоновского взаимодействия в процессе генерации остаточных токов. Продemonстрирована сильная зависимость остаточной плотности тока от частоты лазерного излучения, связанная с энергетической структурой атома. Продemonстрировано отсутствие сильного влияния эффектов перерассеяния электронов на родительских ионах на процесс генерации остаточных токов. Проведено сопоставление результатов численных расчётов, основанных на решении нестационарного уравнения Шрёдингера для атома водорода, с результатами выполненных в ИПФ РАН экспериментов по генерации терагерцового излучения при ионизации воздуха двухцветными лазерными импульсами.

Во второй главе исследовано взаимодействие одноцветного короткого лазерного импульса с молекулами, обладающими асимметричным потенциалом вдоль выделенного направления. На основе численного решения нестационарного уравнения Шрёдингера рассчитывается зависимость остаточной плотности тока, генерируемой молекулярным ионом HeH^{2+} , от фазы импульса, его интенсивности, длительности, межъядерного расстояния, а также от соотношения зарядов ядер молекулы. Продemonстрировано, что в процессе ионизации асимметричной молекулы возбуждается остаточная плотность тока, не исчезающая с увеличением длительности импульса и не зависящая от его фазы при большой длительности импульса

(много большей периода поля). На основе полуклассических расчетов показано, что ключевую роль в возникновении макроскопического направленного тока в ансамбле ориентированных асимметричных молекул играет кулоновское взаимодействие отрываемого электрона с родительским молекулярным ионом, обладающим асимметричным потенциалом вдоль выделенного направления. Показано, что при малой длительности импульса (порядка периода поля) остаточная плотность тока сильно зависит от фазы импульса (сдвига между ближайшими максимумами несущей и огибающей).

В третьей главе рассматривается генерация остаточной плотности тока при взаимодействии интенсивного одноцветного лазерного импульса с полярными и неполярными молекулами, выстроенными под произвольным углом к направлению электрического поля в лазерном импульсе. На основе численного решения нестационарного уравнения Шрёдингера в одноэлектронном приближении для модельного потенциала молекулы рассчитываются зависимости остаточной плотности тока от угла ориентации молекулы при различных межъядерных расстояниях и соотношениях зарядов ядер. Показано, что компонента остаточной плотности тока, направленная вдоль электрического поля, определяется косинусом угла ориентации молекулы и при угле, отличном от 90 градусов, намного больше ортогональной компоненты. Это открывает возможность для зондирования вращательной динамики молекулярного ансамбля с помощью измерения энергии генерируемого терагерцового излучения (определяемой квадратом остаточной плотности тока). Для демонстрации этого в работе рассматривается ансамбль изначально не выстроенных молекул, выстраивание которых происходит под действием короткого предимпульса и описывается на основе аналитического решения уравнения Шрёдингера для жесткого ротатора, взаимодействующего с предимпульсом. Рассчитывается математическое ожидание квадрата остаточной плотности тока для ансамбля молекул, взаимодействующих с ионизирующим коротким лазерным импульсом, и

показывается, что это математическое ожидание коррелирует с математическим ожиданием квадрата косинуса угла ориентации молекул. Помимо этого рассматривается метод зондирования вращательной динамики ансамбля неполярных молекул, для чего предлагается использовать бихроматический ультракороткий лазерный импульс, производящий ионизацию молекул и генерацию остаточной плотности тока.

В приложении описываются детали численного метода решения нестационарного уравнения Шрёдингера.

Научная новизна исследования. Диссертационная работа Л.Н. Александрова представляет собой цельное, обладающее новизной исследование в развивающейся области современной физики – оптико-терагерцовой конверсии в ионизируемых средах. Новизна наиболее существенных результатов состоит в следующем: показано, что оптимальный фазовый сдвиг между компонентами на основной и удвоенной частоте бихроматического лазерного импульса, отвечающий максимальной остаточной плотности тока, существенно зависит от интенсивности лазерного излучения в результате конкуренции двух различных механизмов генерации остаточного тока, один из которых обусловлен действием лазерного поля на оторванный электрон, а второй – действием кулоновского потенциала родительского иона; впервые продемонстрирована возможность генерации остаточного тока в длинном квазимонохроматическом лазерном импульсе за счет асимметрии потенциала ионизируемой частицы и найдены условия для высокоэффективного возбуждения остаточного тока; предложен новый полностью оптический метод измерения степени упорядоченности и вращательной динамики молекулярного ансамбля, основанный на измерении энергии терагерцового излучения, генерируемого в ходе ионизации интенсивным фемтосекундным импульсом ансамбля молекул. Полученные автором результаты являются новыми и актуальными в данной области и, несомненно, должны привлечь внимание соответст-

вующих специалистов. **Достоверность** полученных результатов и **научная обоснованность** выводов диссертации, степень адекватности предложенных методов и моделей подтверждаются физической аргументированностью и согласием результатов с результатами прямого численного решения нестационарного уравнения Шрёдингера и с результатами экспериментов.

Практическая значимость работы. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при разработке источников импульсного широкополосного терагерцового излучения, основанных на преобразовании спектра лазерного излучения в ионизируемой среде, а также методов зондирования вращательной и колебательной динамики молекул.

По диссертации имеются следующие замечания:

1. Прямое сопоставление расчётов остаточной плотности тока, возбуждаемой в атомарном водороде, с экспериментальными измерениями энергии терагерцового излучения в воздухе (рис. 1.12) выглядит недостаточно обоснованным по нескольким причинам. (а) Несмотря на близкие потенциалы ионизации у атома водорода и молекул азота и кислорода эффект от взаимодействия оторванного электрона с родительским ионом может существенно отличаться из-за разной формы потенциалов родительских ионов. (б) Сам по себе вопрос о применимости одноэлектронного приближения для расчёта остаточной плотности тока в азоте и кислороде является открытым. (в) Возбуждённые электронные уровни молекулы кислорода находятся существенно ниже, чем в случае атома водорода, благодаря чему в кислороде существенно больший вклад в терагерцовое излучение может давать кубическая нелинейность связанных электронов (которой пренебрегается в используемой в диссертации модели, основанной на расчёте остаточной плотности тока свободных электронов).

2. В главе 3 при рассмотрении возможности контроля вращательной динамики неполярных молекул с использованием генерации терагерцового излучения бихроматическими лазерными импульсами рассчитывается зависимость квадрата остаточной плотности тока от угла между осью молекулы и направлением электрического поля (рис. 3.12). Полученная зависимость является немонотонной при некоторых значениях относительной фазы (сдвига фаз между одноцветными компонентами в бихроматическом поле). Было бы уместным привести детальный анализ причины возникновения данной немонотонности. Кроме этого, использование усреднения квадрата остаточной плотности тока по относительной фазе для оценки энергии терагерцового излучения, генерируемого длинной плазменной искрой, приведенное на рис. 3.13, выглядит недостаточно обоснованным.

3. При формулировке результатов, касающихся разработки полностью оптического метода измерения упорядоченности молекул, следовало бы более конкретно выделить новизну по отношению к проведенным ранее исследованиям (см. работы [69, 153] в списке литературы к диссертации) по измерению степени угловой упорядоченности неполярных молекул с использованием детектирования генерируемого терагерцового излучения.

4. В диссертации недостаточно полно освещены механизмы возбуждения квазипостоянных токов, инициирующих генерацию терагерцового излучения при воздействии на газы фемтосекундными лазерными импульсами. В частности, не упоминаются пондеромоторный механизм, в котором ток создаётся за счёт действия усреднённой пондеромоторной силы в неоднородном поле [P. Sprangle et al., Phys. Rev. E 69, 066415 (2004); C.D'Amico et al., Phys. Rev. Lett. 98, 235002 (2007); V.A. Kostin, N.V. Vvedenskii, Opt. Lett. 247, 35 (2010)], механизм, свя-

занный с действием силы Лоренца на свободные электроны в однородном поле [J. Reñano et al., Phys. Rev. E 81, 026407 (2010)], механизм, связанный с ускорением рождаемых свободных электронов внешним постоянным (или переменным более низкочастотным) полем [А.М. Быстров и др., Письма в ЖЭТФ, т. 82, с. 852 (2005); A. Houard et al., Phys. Rev. Lett. 100, 255006 (2008)].

5. В главе 3 нумерация формул начинается с (3.12) вместо (3.1). Далее, после формулы (3.18) нумерация начинается снова с номера (3.9). Таким образом, разным формулам соответствует один и тот же номер, и есть разногласие с описаниями формул в тексте. Это затрудняет прочтение главы 3.

Перечисленные замечания не снижают высокой оценки выполненных исследований и не ставят под сомнение достоверность и значимость полученных результатов, а также сделанных на их основе выводов. Результаты диссертации Л.Н. Александрова опубликованы в 9 печатных работах, в том числе в 4 статьях в международных реферируемых журналах, включая такие ведущие специализированные физические журналы, как «Physical Review A» и «Journal of Physics B». Основные выводы диссертации полностью соответствуют целям, задачам и положениям, выносимым на защиту. Автореферат диссертации правильно и полно отражает содержание работы.

Результаты диссертационной работы Л.Н. Александрова могут быть рекомендованы для использования в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского, Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, Институте прикладной физики РАН и др.

Диссертация Л.Н. Александрова «Механизмы возбуждения квазипостоянных токов, инициирующих генерацию терагерцового излучения при воздействии на газы фемтосекундными лазерными импульсами» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям. По объёму выполненных исследований, новизне предложенных подходов, значимости полученных результатов Л.Н. Александров заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Отзыв обсужден и принят на семинаре кафедры электродинамики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского 15 ноября 2021 года (протокол № 2).

Заведующий кафедрой электродинамики ННГУ
доктор физ.-мат. наук, профессор



А.В. Кудрин

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" (ННГУ), 603022, Россия, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, тел. +7(831)462-30-85, e-mail: unn@unn.ru, www.unn.ru