

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук,
ведущего научного сотрудника Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

Попруженко Сергея Васильевича

на диссертационную работу Александрова Леонида Николаевича

«Механизмы возбуждения квазипостоянных токов, инициирующих
генерацию терагерцового излучения при воздействии на газы
фемтосекундными лазерными импульсами»

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.3.19 – физика плазмы.

Диссертационная работа Л.Н. Александрова посвящена теоретическому исследованию эффекта возбуждения остаточных электронных токов при ионизации газовых сред интенсивным лазерным излучением. Такие токи являются источниками электромагнитных волн терагерцового диапазона частот, представляющих интерес для многих фундаментальных и прикладных задач нелинейной оптики и физики плазмы. Мощность, спектральный состав, длительность терагерцового импульса и другие его характеристики определяются структурой возбуждаемых токов, которая, в свою очередь, зависит от деталей процесса нелинейной ионизации атомов или молекул в газовой среде. Поэтому понимание физики процесса генерации терагерцового излучения и управление свойствами терагерцовых импульсов во многом базируются на возможностях детального описания процесса нелинейной ионизации атомов и молекул в сильных лазерных полях сложной конфигурации.

Изучению этого процесса в бихроматическом лазерном поле, состоящем из сильной волны инфракрасного или оптического диапазона и ее более слабой второй гармоники, и посвящена настоящая работа. Конкретно, речь в ней идет о вычислении, разными методами – от строгих квантовомеханических расчетов, основанных на численном решении нестационарного уравнения Шредингера, до аналитических полуклассических методов – зависимости величины тока, создаваемого отдельным атомом или молекулой, от параметров бихроматического поля: интенсивности основной гармоники и относительной фазы двух гармоник, от величины кулоновского поля атомного остатка, а также от ориентации молекулы. Для молекул с

асимметричным потенциалом рассмотрен также случай монохроматического лазерного поля.

Область физики, к которой относится диссертационная работа, быстро развивается в последние полтора–два десятилетия. Начиная с работ [К.У. Kim et al., Opt. Exp. 15, 4577 (2007); Т.И. Oh et al., Appl. Phys. Lett. 105, 041103 (2014)], в эксперименте активно разрабатывается метод генерации сверхкоротких терагерцовых импульсов высокой интенсивности с широким спектром, основанный на ионизации газовых сред сильными лазерными полями. На фоне других методов терагерцовой генерации, которые были известны ранее и также продолжают успешно разрабатываться в последние годы, генерация в бихроматическом лазерном поле выделяется следующими существенными преимуществами: удастся получить терагерцовые поля рекордной напряженности, сверхкороткой длительности, вплоть до одного цикла, и с широким, практически однородным спектром, сравнительно легко перестраиваемом в интервале, границы которого приближенно задаются величинами в 0.1 и 10ТГц. Эти особенности делают технологию генерации терагерцовых полей на основе ионизации газов бихроматическими лазерными импульсами перспективной для использования в ряде приложений, в том числе в фундаментальных физических экспериментах по нелинейной атомной оптике в присутствии сильных квазистатических электрических и магнитных полей. Приведенные аргументы обосновывают актуальность проделанного в диссертационной работе исследования. Следует также отметить, что целый ряд первоклассных работ по ионизационной генерации сильных терагерцовых полей, включая экспериментальные, был выполнен в Институте прикладной физики РАН (см. ссылки в списке литературы к диссертации). Таким образом, автор диссертационной работы трудится в составе большого коллектива, занимающего передовые позиции в данной области исследований.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, трех приложений и списка литературы, включающего 160 наименований.

Во введении дан краткий обзор области исследований, сформулированы цели работы, обоснованы ее актуальность и практическая значимость, перечислены выносимые на защиту положения, кратко изложено содержание диссертации, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора.

В первой главе рассмотрено формирование остаточных токов при ионизации атомных систем в случае, когда их структуру можно считать пространственно изотропной, что отвечает либо атомарным газам, либо

молекулярным со случайной ориентацией молекул. Основным объектом исследования здесь была зависимость оптимальной (с точки зрения возбуждения максимального остаточного тока) относительной фазы основной и второй гармоник лазерной частоты от интенсивности лазерного излучения. Показано, что эта зависимость обусловлена, в основном, кулоновским взаимодействием между фотоэлектроном и атомным остатком. Таким образом, здесь, как и в ряде других задач нелинейной атомной оптики, мы сталкиваемся с ситуацией, когда общепринятое в этой области физики приближение сильного поля [Л.В. Келдыш, ЖЭТФ **47**, 1945 (1964)], пренебрегающее кулоновским взаимодействием, оказывается недостаточным даже для качественного описания эффекта. Важнейшим результатом этой главы является теоретическое предсказание зависимости значения оптимальной фазы от интенсивности импульса накачки, подтвержденное экспериментом, поставленным в ИПФ РАН. Результаты этого эксперимента, опубликованные совместно с соискателем, вошли в состав диссертационной работы [И.Е. Иляков и др., Письма в ЖЭТФ **101**, 78 (2015)]. Также исследованы теоретически зависимости остаточного тока от эллиптичности лазерного излучения и его частоты.

Вторая глава посвящена исследованию влияния асимметрии молекулярного потенциала на процесс ионизации и, как следствие, на формирование остаточных токов. Показано, что использование молекул с асимметричным потенциалом повышает эффективность возбуждения остаточного тока, причем ненулевой ток возникает даже в случае монохроматического лазерного излучения, когда в изотропной среде он отсутствует. В целом, такой вывод не удивителен: для возбуждения остаточного тока необходимо либо асимметричное ионизирующее поле, что достигается использованием второй гармоники с изменяемой относительной фазой, либо асимметрия ионизации, обусловленная строением атомной системы. Тем не менее, полученный результат полезен: он позволяет сформулировать постановку эксперимента по генерации терагерцового излучения в ориентированных молекулярных средах. Показано также, что, как и в случае атомов, в расчете величины остаточного тока нельзя пренебречь кулоновским взаимодействием фотоэлектрона с ядром и, более того, для молекул кулоновский эффект оказывается более существенным, именно он приводит к появлению асимметрии тока.

Третья глава посвящена анализу одной из перспективных возможностей применения эффекта генерации терагерцового излучения для исследования вращательной динамики молекул и определения степени упорядоченности молекулярного ансамбля. В проведенных расчетах показано, что между

величиной остаточного тока и углом молекулярного дипольного момента относительно поляризации поля существует сильная корреляция, что потенциально позволяет контролировать динамику collapses and revivals вращательных волновых пакетов молекул при помощи терагерцового сигнала. Полученные результаты обобщаются затем на случай неполярных молекул, в газе которых генерация терагерцовых волн возможна только за счет асимметрии лазерного поля (достигаемой, например, путем добавления второй гармоники). Показано, что и в этой ситуации зависимость величины остаточного тока от угла, задающего ориентацию молекулы, сохраняется и, более того, она «выживает» после усреднения по относительной фазе компонент бихроматического поля, что повышает работоспособность данного метода диагностики молекулярного газа.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации. В приложениях описан численный метод, использованный для решения нестационарного уравнения Шредингера.

Представленные в диссертационной работе результаты являются новыми. В частности, впервые показано, что оптимальный для достижения максимума остаточного тока фазовый сдвиг между полем на основной и удвоенной частоте сильно зависит от интенсивности лазерной волны. Продемонстрирована возможность возбуждения остаточного терагерцового тока за счет асимметрии потенциала ионизируемой частицы. Предложен новый оптический метод измерения степени упорядоченности и вращательной динамики молекулярного ансамбля. Полученные результаты могут быть востребованы в таких исследовательских центрах как Объединенный институт высоких температур РАН, Институт общей физики РАН, НИЦ «Курчатовский институт», Физический институт РАН, Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ и многих других российских и зарубежных НИИ, вузах и лабораториях, проводящих исследования в физике взаимодействия интенсивного лазерного излучения с веществом.

Результаты диссертационной работы прошли существенную апробацию в научном сообществе. Соискателем было представлено около двух десятков докладов на российских и международных научных конференциях и семинарах; им опубликовано 9 работ по теме диссертации, 4 из которых – в журналах, индексируемых системой Web of Science. Значительная часть результатов опубликована в таких высокорейтинговых журналах как Physical Review A и Journal of Physics B. Представленные результаты получены

автором лично. Автореферат полно и достоверно передает содержание диссертации.

При изучении работы у меня возникли вопросы и замечания, сформулированные ниже.

1. В главе 1 при обсуждении роли кулоновского взаимодействия в формировании остаточного тока (стр. 30 – 32) используется понятие механизма формирования тока: «Назовем описанный выше механизм формирования остаточного тока кулоновским». Такая терминология представляется неточной. В рассматриваемом случае (в отличие от случая асимметричной молекулы, исследованного во второй главе) остаточный ток возникает вне зависимости от присутствия кулоновского взаимодействия. Последнее меняет величину тока и его зависимость от относительной фазы. Поэтому корректно было бы говорить о кулоновском эффекте, а не о новом механизме.
2. Выражение (1.11) для временной задержки имеет приписываемый ему смысл в классической механике. В квантовой механике, даже в квазиклассическом пределе, никакой реальной задержки при туннелировании, по-видимому, нет, а соответствующее время имеет другой, более формальный смысл (см., например, дискуссию в обзорах *J. Phys. B* **47**, 204002 (2014); *Photonics* **2**, 042002 (2020)). Непонятно также, в каких единицах измеряется временная задержка в указанной формуле. Чему она равна численно при рассматриваемых параметрах и насколько ее введение в расчеты влияет на результат?
3. В разделе 1.6.2 обсуждается зависимость величины остаточного тока от частоты лазерного излучения. Наблюдаемая в квантово-механическом и отсутствующая в классическом расчете сильная квазипериодическая зависимость приписывается влиянию высоколежащих связанных (ридберговских) состояний. Не исключено, однако, что эффект связан с закрытием каналов ионизации, наблюдаемым, как известно, при изменении интенсивности или частоты излучения. Рассматривалась ли такая возможность?
4. В разделе 2.2.1 рассматривается ионизация асимметричной молекулы, причем считается, что асимметрия обусловлена различными по величине зарядами ядер. Какой физической системе соответствует эта модель? Ограничивает ли она применимость полученных результатов случаем положительно заряженных молекулярных ионов?

Перечисленные замечания и недостатки не снижают общей положительной оценки работы, ее научной значимости и новизны.

Диссертационная работа Александрова Л.Н. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным «Положением о порядке присуждения учёных степеней» № 842 от 24.09.2013г. (ред. 01.10.2018г.), а ее автор Александров Леонид Николаевич за решение задачи об установлении физических механизмов формирования квазистатических токов при ионизации газов фемтосекундными лазерными импульсами и детальное исследование зависимости этих токов от параметров лазерного поля и атомной системы заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Официальный оппонент, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»; 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38; +74995038777(347), www.gpi.ru, sergey.popruzhenko@gmail.com; доктор физико-математических наук (научная специальность – 01.04.02 – теоретическая физика).

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

 Попрузенко С.В.

"17" ноября 2021 г.

Подпись Попрузенко С.В. заверяю.
ВРИО ученого секретаря
д.ф.-м.н.



 Глушков В.В.

"18" 11 2021 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)
Почтовый адрес: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38
Телефон: +7 (499) 503-87-34
e-mail: office@gpi.ru