

## ОТЗЫВ

**официального оппонента, доктора физико-математических наук Быченкова Валерия Юрьевича на диссертационную работу Ефименко Евгения Сергеевича «Самосогласованные нелинейные эффекты при ионизации вещества и вакуума сильнофокусированными фемтосекундными лазерными импульсами», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 - Лазерная физика**

Диссертация Е. С. Ефименко посвящена изучению некоторых нелинейных режимов взаимодействия мощного коротких импульсов лазерного излучения с веществом, в результате которого происходит образование плотной плазмы. Исследование охватывает диапазон интенсивностей лазера от суб- до ультра- релятивистских интенсивностей. При этом, образующаяся плазма может представлять собой как обычную электрон-ионную плазму, так и электрон-позитронную плазму, формируемую в процессе пробоя вакуума в полях сверхмощных лазерных установок. Самосогласованная динамика, реализуемая в процессе взаимодействия, позволяет последовательно описать целый ряд интересных нелинейных эффектов. Полученные результаты могут быть важны не только с точки зрения их значимости для фундаментальной науки, но и для научно-практических приложений, таких как: нелинейные свойства преломления в веществе, мониторинг и диагностика природных и антропогенных аэрозолей, лазерно-иницированное ускорение заряженных частиц, изучение вещества в экстремальных состояниях и лабораторная астрофизики.

Диссертация Е. С. Ефименко имеет объем 179 страниц, включая 60 рисунков и библиографию из 164 наименований. Изложению материалов диссертационной работы предпосылается вводная часть, в первой части которой обсуждается состояние исследований по предмету диссертации и их мотивация, а также цели диссертации, ее новизна и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, и апробация работы. Во второй части введения дается хорошо структурированный обзор литературы по эффектам, связанным с задачами диссертации. Содержание диссертационной работы представлено в последующих четырех главах.

В первой главе решается задача о распространении лазерного излучения в газовой среде из водорода при учете ионизации, в качестве механизма которой рассматривается туннельная ионизация. Здесь исследуется ионизационная динамика сфокусированных лазерных импульсов, характеризующаяся, например, тем, что максимальная плотность формирующейся плазмы превосходит стационарное значение. Основным результатом главы заключается в формировании мелкомасштабных плазменных структур при резкой фокусировке лазерного излучения. При этом, критический угол фокусировки зависит от длительности лазерного импульса. Кроме того, демонстрируется, что ионизационная динамика зависит и от поляризации излучения. Также анализируется влияние соударений в плазме и кубичной нелинейности на динамику системы.

Во второй главе рассмотрен нелинейный режим такого вынужденного рассеяния, при котором формируется волна ионизации, на которой происходит рассеяние волны накачки – ионизационное рассеяние. На основе дисперсионного уравнения для плоской электромагнитной волны в ионизируемой среде получено выражение для инкремента неустойчивости вынужденного рассеяния. Полученные аналитические оценки использованы для объяснения результатов численного моделирования нелинейного режима ионизационного рассеяния фемтосекундных лазерных импульсов. В частности, оценены эффективность рассеяния и сдвиг частоты рассеянного излучения. На основе проведенного исследования предложена схема усиления предельно коротких лазерных импульсов.

Третья глава посвящена исследованию самосогласованной ионизационной динамики лазерного излучения тераваттного уровня мощности, взаимодействующего с одиночной водяной каплей. В данной задаче капля воды выступает в качестве толстой линзы, обеспечивающей режим резкой фокусировки. В процессе фокусировки пробой вещества наблюдается в самом объеме капли. При этом показано, что внутри объема капли (во внутренних фокусах) достижимы плотности поглощенной энергии до  $100 \text{ кДж/см}^3$ . Результаты численного моделирования на основе предложенной модели используются для сравнения с результатами проведенного в ИПФ РАН эксперимента по взаимодействию фемтосекундного лазерного импульса с одиночной каплей или аэрозолем.

В отличие от трех предшествующих глав, в четвертой главе рассматриваются ультра-релятивистские лазерные интенсивности, достижение которых вероятно для лазеров следующего поколения, применительно к возможной в будущем экспериментальной проверке пробоя вакуума в результате развития квантово-электродинамических каскадов. Данная задача привлекает все большее внимание в связи с развитием технологии создания мультипетаваттных лазерных установок. Данная глава посвящена изучению возможных нелинейных режимов динамики плотной электрон-позитронной плазмы, формирующейся в результате развития квантово-электродинамического каскада при облучении затравочной мишени. В работе демонстрируются два интересных режима: режим токового расслоения при мощностях меньше 20 ПВт и режим токовой контракции (пинчевания) электрон-позитронной плазмы при мощностях больше 20 ПВт. Оба этих режима ведут к формированию мелкомасштабных плазменных структур со сверхвысокой плотностью электрон-позитронной плазмы. В заключение главы обсуждается практически интересная возможная постановка эксперимента по реализации рассмотренных режимов на будущих сверхмощных лазерных установках.

В качестве научной новизны работы выделю следующее. Предложена схема усиления предельно коротких лазерных импульсов на основе вынужденного ионизационного рассеяния. На основе предложенной самосогласованной модели пробоя капли воды показано формирование сильно поглощающих областей внутри микро-капли с плотностью поглощенной энергией до 100

кДж/см<sup>3</sup> для лазера с интенсивностью  $\sim 10^{14}$ Вт/см<sup>2</sup>. Продемонстрированы новые режимы взаимодействия релятивистски-интенсивного лазерного излучения с формируемой электрон-позитронной плазмой. Научная новизна работы Е. С. Ефименко подтверждается большим числом его публикаций по тематике диссертационного исследования в высокорейтинговых журналах, докладами на международных и всероссийских конференциях и не вызывает сомнений.

Автор продемонстрировал высокую квалификацию в области лазерной физики. Результаты диссертационной работы являются оригинальным. Согласие результатов проведенных теоретических исследований с результатами других авторов и экспериментальными данными позволяет с уверенностью говорить о достоверности полученных в диссертационной работе результатов.

Диссертация Е. С. Ефименко выглядит как добротное, достоверное и завершенное исследование, в котором решены важные задачи, имеющие существенное значение для лазерно-плазменной физики высоких плотностей энергий. Результаты диссертации обоснованы. Вместе с тем она не лишена и недостатков:

1. Постановка задачи о распространении лазерного импульса в ионизирующей среде (Гл.1) опирается как на уравнения Максвелла, так и материальное уравнение. Модель последнего важна и влияет на результат. Следовало бы обсудить условия применимости использованного приближения, сформулировав условия применимости полученных результатов.
2. Описание структуры поля при острой фокусировке опирается на 2-мерную модель распространения лазерной волны в вакууме (Гл.1), тогда как типично используемая фокусировка – 3-мерная и использованного разделения ТЕ и ТМ волн нет. Следовало бы объяснить, к каким схемам фокусировки могла бы относиться такая модель.
3. Обсуждая ионизационную динамику лазерных импульсов, соискатель отмечает возникновение эффекта усиления поля при плазменном резонансе вблизи критической плотности. Однако остается неясным физика его роли в обсуждаемых характеристиках. Является ли существенным то, благодаря каким эффектам и на каком уровне ограничивается поле в плазменном резонансе?
4. При численном моделировании КЭД каскадов использовалась модель волны с резким фронтом, отвечающим включению поля за время порядка периода лазерной волны, что трудно представить с точки зрения экспериментальной реализации. Насколько оправдана такая модель? А также, мощные, мульти-ПВт, импульсы сами по себе ожидаемо будут короткими, что не согласуется с принятым приближением полубесконечной волны. Стоило бы обсудить как это отразится на предложенном сценарии эволюции электрон-позитронной плазмы?

5. Встречаются небрежности изложения. Например, стандартно введенное определение безразмерной амплитуды лазерного поля  $a_0$  (стр. 32) эволюционирует к  $A_0$  (стр. 43), а величиной  $a_0$  оказывается ширина пучка (стр. 43), напряженность электрического поля  $E_0$  в формуле (1.17) оказывается безразмерной величиной  $A_0$ , в тексте встречаются то  $\omega$ , то  $\omega_0$  и то  $\lambda$ , то  $\lambda_0$ , в подписях к рисункам хорошо бы видеть не только длительность импульса, но и его интенсивность.

Отмеченные выше недостатки не влияют на общую высокую оценку работы. Как по значению, так по объему и качеству полученных результатов, рецензируемая диссертационная работа полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. в редакции Постановления Правительства РФ № 335 от 21.04.2016 г., а ее соискатель Евгений Сергеевич Ефименко заслуживает присвоения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

*Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.*

Доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник ФИАН,  
и.о. Зав. Сектором лазерно-плазменной  
физики высоких энергий

Москва 119991, Ленинский проспект, д.53  
Тел.: +7 499 1326906  
e-mail: [bychenkovvy@lebedev.ru](mailto:bychenkovvy@lebedev.ru)

Подпись В. Ю. Быченкова удостоверяю  
Ученый секретарь ФИАН

/В.Ю.Быченков/  
11.11.2020г.



/А.В.Колобов/  
12.11.2020г.