

## ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук Кулагина Виктора Владимировича на диссертационную работу Ефименко Евгения Сергеевича «Самосогласованные нелинейные эффекты при ионизации вещества и вакуума сильносфокусированными фемтосекундными лазерными импульсами», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 - Лазерная физика.

В диссертационной работе Е.С. Ефименко теоретически и численно исследуется пробой вещества и вакуума сверхмощным лазерным излучением. Данное направление имеет огромное значение как с точки зрения ценности фундаментального научного знания, так и с точки зрения практического использования полученных результатов. Актуальность проведенных исследований подчеркивается еще и тем, что в работе рассматриваются теоретические и практические аспекты пробоя вакуума, которые будут определять направления развития перспективных мультитераваттных лазерных систем в ближайшие годы.

Представленная диссертация содержит введение, обзор литературы, четыре содержательные главы, а также заключение, содержащее основные результаты работы.

Первая глава посвящена важной задаче распространения сильно сфокусированного мощного лазерного излучения в ионизируемой среде. Важным результатом является возможность формирования сильно неоднородного распределения плазмы при резкой фокусировке лазерного излучения даже в отсутствие каких-либо неустойчивостей. Лазерные системы с сильной фокусировкой позволяют получить минимальный размер фокального пятна, поэтому широко применяются в исследованиях и в технологии, в связи с чем данный результат представляет широкий интерес. Помимо этого в главе демонстрируются особенности ионизационной динамики в зависимости от поляризации и длительности лазерного импульса. Трехмерные моделирования с учетом соударений и керровской нелинейности подтверждают адекватность использованной модели.

Вторая глава продолжает исследование различных ионизационных неустойчивостей и фокусируется на нелинейном режиме вынужденного ионизационного рассеяния. Последовательный процесс исследования трехволнового процесса начинается с анализа линейного режима на основе дисперсионного уравнения для плоской электромагнитной волны в условиях туннельной ионизации. Найдена область параметров, где инкремент неустойчивости превосходит скорость фоновой ионизации, т.е. становится возможным развитие ионизационной неустойчивости. На основе численного моделирования исследуется нелинейный режим ионизационного рассеяния фемтосекундных лазерных импульсов. Показано, что формируется сильно модулированное распределение плазмы, при этом система поле-плазма оказывается очень чувствительной к малым возмущениям поля. Важным следствием этого является принципиальная возможность реализации концепции усиления предельно коротких лазерных импульсов с помощью эффекта вынужденного ионизационного рассеяния, хотя, по-видимому, еще потребуются значительные усилия для ее экспериментального осуществления.

Если в первых двух главах рассматривались задачи, где основным механизмом была туннельная ионизация газа, в третьей главе исследуется пробой капли воды лазерным излучением тераваттного уровня мощности. Анализируется влияние формирующейся внутри объема капли плотной плазмы на энергетические и спектральные характеристики рассеянного излучения. Результаты по пробое одиночной капли с учетом определенных приближений обобщаются на взаимодействие с аэрозолем, что может представлять интерес для задач атмосферной оптики. К сильным сторонам этой главы можно отнести прямое сравнение результатов численного моделирования, полученных на основе предложенной самосогласованной модели, с данными проведенного в ИПФ РАН эксперимента по взаимодействию сфокусированного лазерного импульса с одиночной каплей и аэрозолем.

В четвертой главе рассматривается динамика плотной электрон-позитронной плазмы, формирующейся в результате пробоя вакуума. Данное направление исследований набирает свою



популярность по мере приближения запуска мультипетаваттных лазерных установок. В главе рассмотрен случай предельной фокусировки лазерного излучения в форме дипольной волны, позволяющей максимизировать поле в области фокуса. Основное внимание уделено нелинейным режимам, приводящим в результате самосогласованной токовой динамики к формированию структурированных плазменных распределений. Впервые показано, что при мощности, превышающей 20 ПВт, возможно сжатие плазменного распределения и пинчевание, что позволяет получить сверхвысокую плотность электрон-позитронной плазмы.


Результаты работы широко опубликованы в высокорейтинговых журналах, что подтверждает высокую оценку научным сообществом полученных результатов. Научная новизна и надежность проведенных исследований и полученных результатов не вызывает сомнений, научные положения, выводы и заключения, сформулированные в диссертации, полностью обоснованы. Достоверность представленных результатов подтверждается широким диапазоном используемых в работе методов исследований от аналитической теории и численного моделирования до прямого сравнения результатов с экспериментальными данными. Содержание автореферата соответствует диссертации.

По содержанию диссертации могут быть сделаны следующие замечания. В четвертой главе следовало бы рассмотреть более детально возможные механизмы ограничения максимальной плотности электрон-позитронной плазмы при пинчевании. К числу мелких недостатков можно отнести наличие некоторого количества ошибок и опечаток в тексте, кроме того, не везде объясняются введенные обозначения и указываются параметры моделирований.

В целом диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, а отмеченные замечания никоим образом не снижают качество и значимость проведенных исследований и полученных результатов. Диссертация отвечает 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 Евгений Сергеевич Ефименко безусловно заслуживает присвоения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

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

Старший научный сотрудник ГАИШ МГУ,  
кандидат физико-математических наук



В.В. Кулагин

«19» ноября 2020 г.

Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга  
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова  
119991, Москва, Университетский проспект, 13,  
специальность 01.04.03 - Радиофизика  
(8-495)-939-53-27, victorvkulagin@yandex.ru

Подпись с.н.с. ГАИШ МГУ, кандидата физ.-мат. наук В.В. Кулагина заверяю

Директор ГАИШ МГУ  
профессор



К.А. Постнов