

**Отзыв официального оппонента на диссертацию Андреева Степана Николаевича «Моделирование и оптимизация лазерно-плазменных источников корпускулярного и электромагнитного излучения», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика»**

В последние годы значительно возросло количество научных работ, в которых исследуются различные явления при взаимодействии мощных ультра-коротких лазерных импульсов с веществом в условиях, когда необходимо учитывать релятивистские эффекты. Рост интереса обусловлен существенным прогрессом на пути генерации субпикосекундных импульсов с плотностью потока лазерного излучения превышающей  $10^{18} \text{ Вт}/\text{см}^2$ . При воздействии на мишени столь мощных импульсов открываются новые возможности на пути ускорения электронов и протонов, генерации гамма-квантов и пучков нейtronов. Аналитическое описание этих процессов представляет значительные трудности. Поэтому весьма популярным стало привлечение численных методов, позволяющих получить количественное описание представляющих интерес явлений в условиях близких к экспериментальным. Именно такой подход развивается в диссертации С.Н. Андреева, в которой с использованием современного численного кода и адекватных физических моделей рассмотрен ряд принципиально важных задач ускорения заряженных частиц, генерации нейтронных пучков и гамма-квантов тормозного излучения.

В первой главе диссертации исследуются движение заряженной частицы в электромагнитном поле, приводящем к движению частицы со скоростью сравнимой со скоростью света. Прежде всего, проанализировано движение частицы в поле монохроматической эллиптически поляризованной плоской волны. Показано, что движение частицы можно представить в виде дрейфа с постоянной скоростью и осцилляций с периодом, зависящим от плотности потока излучения. В случаях линейно и циркулярно поляризованных волн получены формулы для периода осцилляций и средней энергии заряженной частицы. Формулы для средней энергии можно рассматривать как обобщение предложенной ранее иностранными учеными формул для средней энергии, применимой в условиях, когда влияние магнитного поля на движение частицы слабее, чем электрического, на условия в которых скорость частицы становится сравнимой со скоростью света. В этой же главе рассмотрено движение заряженной частицы в поле лазерного импульса, длительность которого много больше периода. В адиабатическом приближении дано обобщение формул, описывающих движение частицы в монохроматическом поле, на случай воздействия импульса. Аналитическое рассмотрение дополнено двумерными численными расчетами движения

частицы. Выполнены расчеты движения частицы в поле импульса линейно поляризованного излучения имеющего длину волны в один микрон. Длительность импульса изменялась в интервале от 3 фсек до 100 фсек, а плотность потока изменялась от  $10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup> до  $10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup>. Установлено, что при небольших плотностях потока адиабатическое приближение дает точность большую, чем 10 процентов, если длительность импульса примерно в три раза больше основного периода осцилляций. При большой плотности потока, когда амплитуда скорости осцилляций частицы с массой покоя много больше скорости света, ограничение на длительность импульса становится более жестким и усиливается пропорционально корню из плотности потока.

Во второй главе с использованием численных методов изучается ускорение электронов и ионов при воздействии мощного фемтосекундного лазерного импульса на тонкие пленки. В основу численных расчетов положена двумерная версия кода KARAT. Для тестирования кода использовались известные экспериментальные данные по ускорению протонов при воздействии высококонтрастного фемтосекундного импульса на пленку из майлара. Установлена величина параметра укрупнения, при которой достигалась достаточная точность расчета максимальной энергии протонов, как с фронтальной, так и тыльной стороны пленки. При этом максимальная энергия протонов соответствовала измеренной экспериментально для пленок различной толщины. Важное место в этой главе занимает численное моделирование ускорения электронов и протонов при воздействии лазерного импульса с большой плотностью потока на металлическую мишень, с фронтальной стороны которой есть слой водородной плазмы с экспоненциально нарастающей концентрацией частиц. Мишень представлена в виде слоя электронов и ионов алюминия с концентрацией в четыре раза большей критической. На тыльной стороне мишени расположен тонкий слой протонов и электронов с такой же концентрацией, как в мишени. На переднем фронте лазерного импульса закономерности ускорения электронов с неплохой точностью описываются формулами, приведенными в первой главе. В более поздние моменты времени существенное влияние на процесс ускорения электронов оказывают собственные электрические поля, порождаемые лазерным импульсом. Ускорение протонов в значительной мере обусловлено электростатическими полями, возникающими из-за разделения зарядов. Показано также, что в области разреженной плазмы с фронтальной стороны мишени первоначальное ускорение протонов можно связать с давлением света. Полученные численно максимальные энергии электронов и протонов находятся в согласии с имеющимися экспериментальными данными и допускают расчет по приближенным формулам, предложенным в диссертации. В этой же главе изучено отражение импульса лазерного излучения плазмой с концентрацией электронов близкой к критической. При малых

плотностях потока рассмотрено влияние длительности импульса на коэффициент отражения. Установлено, что по мере уменьшения длительности импульса коэффициент отражения заметно уменьшается. Это уменьшение связано с появлением в спектре воздействующего излучения частот больших плазменной. При больших плотностях потока в основу описания оптических свойств слоя плазмы положен численный код KARAT. Установлены зависимости коэффициентов отражения, пропускания и поглощения от плотности потока воздействующего излучения. Продемонстрировано существенное влияние модуляций плотности электронов, возникающих из-за пондеромоторного воздействия лазерного излучения, на оптические свойства. В условиях, когда амплитуда скорости осцилляций электронов с массой покоя сравнима со скоростью света, выявлено значительное увеличение поглощения. Показано, что при аномально больших плотностях потока, когда существенно релятивистское возрастание массы электрона, из-за понижения плазменной частоты реализуется эффект просветления плазменного слоя.

Несколько замечаний к этой главе. На странице 90 после формулы (15) приводится выражение для ширины электромагнитного импульса, определенной по половине максимума плотности потока, которая в  $\sqrt{2}$  раз меньше выражения используемого обычно, в том числе и в некоторых местах диссертации. В формулах (27) и (29) множитель в круглых скобках, возникший после подстановки коэффициента отражения вида (20), следует возвести в квадрат. Формула (36) для групповой скорости электромагнитной волны при частотах больших плазменной становится комплексной. Этот факт нуждается в пояснении. На рис.13 (см.стр.99) штриховыми кривыми представлены зависимости коэффициента поглощения от плотности потока излучения, полученные при воздействии фемтосекундного лазерного импульса на плазму плотность которой сравнима с критической. Обнаружено значительное увеличение поглощения при плотностях потока из интервала от  $10^{17} \text{ Вт}/\text{см}^2$  до  $10^{20} \text{ Вт}/\text{см}^2$ . Было бы полезно указать физические причины столь сильного поглощения. Анализ коэффициента отражения фемтосекундного лазерного импульса с основной частотой равной критической выполнен без учета пространственной дисперсии. Поэтому приведенные на рис.11 количественные зависимости, иллюстрирующие степень точности формул Френеля, нуждаются в уточнении, особенно для плазм с релятивистскими скоростями частиц.

Центральное место в диссертации занимает третья глава, в которой изучается генерация нейтронов и гамма-квантов тормозного излучения при воздействии мощного ультра-короткого лазерного импульса на плазму. Основу рассмотрения составляет расширенный двумерный численный код KARAT. Тестирование кода выполнено посредством сравнения результатов расчетов с выполненным ранее моделированием облучения мишени из дейтерированного

полиэтилена и с известными экспериментальными данными. Рассчитаны полные кинетические энергии электронов, дейtronов и ионов углерода. Найдена зависимость выхода нейтронов от энергии лазерного импульса, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными. В код KARAT добавлен блок, описывающий многократную фотоионизацию, что позволило сделать вывод о целесообразности использования мишеней с малым числом электронов для достижения более эффективного протекания DD-реакции. Выявлена возможность увеличения выхода нейтронов почти в двадцать раз при использовании слоистых мишеней, что согласуется с аналогичным выводом, полученным в работах посвященных проблеме инерционного термоядерного синтеза. В этой же главе код KARAT дополнен блоком, позволяющим описать генерацию гамма-квантов тормозного излучения при рассеянии электрона на ядре. Тестирование кода выполнено посредством сравнения расчетов с формулами, описывающими генерацию гамма-квантов при взаимодействии моноэнергетического пучка электронов с холодной плазмой. При этом установлена простая связь средней энергии гамма-квантов и начальной энергией электронов, которые отличаются примерно в 25 раз. Найдено распределение генерируемых электронов и гамма-квантов по углам. Распределения по углам быстрых электронов и генерируемых ими высокоэнергичных гамма-квантов схожи по форме. Напротив, диаграмма направленности гамма-квантов, испускаемых сравнительно медленными электронами, существенно отличается от диаграммы, отвечающей электронам, что объясняется частым изменение направления движения электронов в электромагнитном поле. В последнем разделе этой главы численно исследуется генерация нейтронов при воздействии фемтосекундного лазерного импульса с большой плотностью потока на мишень из дейтерия палладия. В такой мишени, во-первых, происходит эффективная генерация гамма-квантов тормозного излучения, а, во-вторых, велика концентрация дейтерия. Код KARAT дополнен блоком, описывающим реакцию фоторасщепления дейтрана. Помимо этого код включает блоки, описывающие реакции синтеза дейтранов по двум каналам: с выходом нейтрона и образованием ядра  $^3\text{He}$ ; с выходом протона и образованием ядра трития. Изучен энергетический спектр нейтронов, образующихся в процессе расщепления дейтранов. Этот спектр подобен спектру гамма-квантов участвующих в реакции фоторасщепления. Установлена зависимость длительности генерируемых импульсов нейтронов от толщины мишени и плотности потока лазерного излучения. Показано, что, несмотря на микронные размеры фокального пятна и малую длительность времени генерации нейтронов, пиковая интенсивность импульса нейтронов достигает величин характерных для самых мощных существующих источников нейтронов.

Отметим ряд опечаток. На стр.154 после рис.19 дана ссылка на рис.6, который не имеет отношения к тому, что обсуждается в этом месте. Аналогичная неточность допущена на стр.161,

где в середине страницы дана ссылка на рис.8, на котором нет ничего об угловом распределении электронов.

В четвертой главе диссертации рассматриваются особенности воздействия на воду лазерного излучения с длиной волны близкой к трем микронам, когда относительно велик коэффициент поглощения. При этом рассматриваются сравнительно небольшие плотности потока излучения, при которых можно не учитывать процесс образования плазмы. Сформулирована модель, позволяющая описать генерацию электрических импульсов в воде находящейся над поверхностью кварца. При поглощении лазерного излучения происходит термическая диссоциация воды на ионы  $H^+$  и  $OH^-$ . Так как скорости дрейфа этих ионов разные, то возникает динамическое разделение зарядов, сопровождающееся появлением электрического поля. Кроме того, при достижении температуры предельного перегрева происходит взрывное вскипание и образуется паровая полость, границы которой оказываются заряженными. Основу модели составляют уравнения для температур кварца, воды и пара. Используя эти уравнения, показано как в воде возникают резкие градиенты температуры. Наличие градиентов температуры приводит к появлению градиентов концентраций ионов и их диффузионных потоков. Эволюция концентраций ионов описывается соответствующими уравнениями диффузии. В свою очередь различие концентраций ионов ведет к возникновению электрического поля, которое находится из уравнения Максвелла содержащего плотность заряда. Следствия модели проанализированы численно применительно к воздействию импульса эрбиевого лазера длительностью около ста наносекунд и плотностью потока около одного милливатта на квадратный сантиметр на слой воды в несколько микрон. Установлена форма электрического сигнала как при плотностях потока меньших отвечающей порогу взрывного вскипания, так и при плотности потока несколько большей пороговой. Показано, что при вскипании воды сигнал знакопеременный, а его величина почти на порядок больше, чем в условиях отсутствия паровой полости. В последней части этого раздела дан анализ эксперимента, в котором электрический сигнал возникал при воздействии наносекундного импульса HF-лазера на дно кюветы с водой, верхняя поверхность которой могла свободно перемещаться. Обнаруженный в эксперименте содержащий два пика электрический сигнал получил адекватное объяснение. Появление первого пика связано с процессом разделения зарядов и взрывным вскипанием воды, а генерируемый с задержкой слабый пик связан со схлопыванием паровой полости.

Несколько замечаний к тексту этой главы. Отметим неудачное употребление термина «период столкновений ионов» на стр. 197, обычно используют термин «время свободного пробега». Почему-то в этой главе вводятся разные обозначения для длительности импульса (см.

стр.192 и стр.222), которые отличаются не только друг от друга, но и от обозначений, используемых в других разделах. При формулировке модели ничего не сказано о возможном влиянии диффузии ионов на распределение температуры. Соответствующее обсуждение могло бы лучше понять степень точности описания профиля температуры.

Одно общее замечание. Ряд обозначений вводится повторно. Например, неоднократно описывается форма гауссовского импульса. В этом нужды нет.

В целом диссертация имеет форму законченного научного исследования. Она написана простым и ясным языком с необходимым числом пояснений деталей расчетов. В ней представлено большое количество новых научных результатов. Их достоверность следует из умелого использования современного численного кода и подтверждена в ряде весьма качественных экспериментов. Итоги исследования механизмов ускорения электронов и протонов, генерации нейтронов и гамма-квантов позволяют составить достаточно полное представление о перспективах использования мощных фемтосекундных импульсов для создания источников нейтронов и протонов, представляющих интерес для важных прикладных задач. Представленное в диссертации исследование закономерностей генерации электрических импульсов в воде вносит существенный вклад в развитие теории в этом направлении.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Все результаты диссертации опубликованы в центральных физических журналах.

Представленные в диссертации результаты позволяют говорить о решении автором актуальной научной проблемы – моделирование и оптимизация лазерно-плазменных источников корпскулярного и электромагнитного излучения.

Диссертация и автореферат Андреева С.Н. соответствуют всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Российской Федерации, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Андреев С.Н. заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «лазерная физика».

Заведующий сектором теории плазменных явлений ФИАН

доктор физико-математических наук

подпись С.А. Урюпина заверяю

Ученый секретарь ФИАН

доктор физико-математических наук

С.А. Урюпин

Н.Г. Полухина

