

4845953

На правах рукописи

Головин Григорий Владимирович

**ВТОРИЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА
ЧАСТИЦ И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ПЛАЗМЫ
ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА:
ВНУТРЕННЯЯ ЭЛЕКТРОННАЯ КОНВЕРСИЯ,
ОЖЕ-ПРОЦЕССЫ И ГЛУБОКО НЕУПРУГИЙ УДАР**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

12 МАЙ 2011

Москва - 2011

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Савельев-Трофимов Андрей Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Заdernовский Анатолий Андреевич
Московский государственный институт
радиотехники, электроники и автоматики
(технический университет), Москва

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Зворыкин Владимир Дмитриевич
Учреждение Российской академии наук
Физический институт имени П.Н. Лебедева
РАН, Москва

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Защита состоится 19 мая 2011 г. в 16.30 на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 при Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1 Москва, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А.Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Автореферат разослан: «14» апреля 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 501.001.31
кандидат физ.-мат. наук, доцент

Исве...
Ильина



I. Общая характеристика работы

Актуальность темы

Прогресс в области лазерных технологий в последние десятилетия (в частности, появление технологии усиления чирпированных импульсов) привел к тому, что исследователям стали доступны сверхмощные лазерные системы «пастольного» типа, способные генерировать импульсы с энергией до нескольких десятков Дж и длительностью вплоть до десяти фс. При фокусировке интенсивность такого излучения достигает 10^{22} Вт/см², а соответствующая напряженность поля значительно превосходит внутриатомную ($\approx 10^9$ В/см). Существенная доля энергии лазерного импульса в этом режиме тратится на ускорение электронов вещества, способных достигать энергий в 1 ГэВ. В свою очередь, существование таких электронов приводит к ускорению протонов, нейтронов и тяжелых ионов, а также к генерации рентгеновских квантов с энергиями, сопоставимыми с предельными для современных ускорителей. При этом характерный масштаб ускоряющего градиента для лазерно-плазменных установок более чем в 1000 раз превышает таковой для традиционных ускорителей, что приводит к соответствующему уменьшению конечного размера установок и сопряженных с экспериментами затрат.

Таким образом, плазма сверхмощного фемтосекундного лазерного импульса является крайне привлекательным инструментом во множестве задач ядерной физики: лазерный термоядерный синтез (в том числе быстрый поджиг), инициирование ядерных реакций, разделение изотопов, создание инверсной населенности на ядерных переходах. Как импульсный источник рентгеновского, электронного и ионного излучений высокой яркости, такая плазма может применяться для диагностики быстротекающих процессов рентгеновскими методами, фемтосекундной рентгеновской кристаллографии, рентгеновской и ВУФ литографии, получения изображений в рентгеновском диапазоне для медицины и материаловедения, ионной имплантации, импульсной нейтронной диагностики, протонной терапии.

В области не рекордных, но зато коммерчески широко освоенных «умеренных» интенсивностей (10^{16} - 10^{17} Вт/см²), плазма фемтосекундного лазерного импульса представляет особый интерес для низкоэнергетической ядерной физики. Благодаря таким механизмам поглощения энергии лазерного импульса, как резонансное поглощение, аномальный скин-эффект и нагрев на границе вакуум-плазма, энергия электронного, ионного и рентгеновского излучения плазмы достигает десятков кэВ. Соответственно, становится возможным прямое возбуждение и исследование свойств ядерных состояний, энергия которых лежит в этих пределах.

В настоящий момент построены модели и оценены эффективности основных механизмов, характерных для такого способа возбуждения: неупругого электронного удара, обратной внутренней электронной конверсии, возбуждения за счет переходов на атомных оболочках, фотопоглощения рентгеновского излучения плазмы и др. В то же время экспериментальные подтверждения возбуждения ядерных переходов в плазме, созданной фемтосекундным лазерным импульсом (плазме ФЛИ) сталкиваются с серьезными трудностями, о чем свидетельствует большое число попыток с негативными результатами. Трудности эти обусловлены, прежде всего, низкой эффективностью процессов возбуждения и, как следствие, малым выходом возбужденных ядер, а также сложностью отделения продуктов распада ядерных состояний от мощного собственного излучения плазмы. Единственным успешным способом такой селекции до сих пор была селекция по времени. Действительно, время жизни плазмы ФЛИ лежит в пределах 1-10 пс, в то время как время жизни низколежащих ядерных состояний обычно больше 1 нс. Сигнал от распада ядерных состояний значительно запаздывает по отношению к излучению плазмы и может быть, следовательно, выделен. Таким образом был зарегистрирован распад ядерного состояния изотопа ^{181}Ta с энергией 6,238 кэВ и временем жизни 6,05 мкс, что является одним из немногих имеющихся на сегодняшний день подтверждений возможности возбуждения низкоэнергетических ядерных переходов в плазме ФЛИ. Необходимо однако заметить, что отношение сигнал/шум в этом эксперименте было достаточно низким, что вкупе с неудачными попытками других научных групп повторить данный эксперимент спровоцировало вопросы о достоверности полученного результата.

В подавляющем большинстве работ в качестве продуктов распада низколежащих ядерных состояний пытались регистрировать кванты гамма-излучения. В то же время известно, что основным каналом распада таких состояний является конверсионный канал, в результате которого энергия возбуждения ядра передается одному из электронов внутренних атомных оболочек, отрывая его от атома. Регистрация характеристических конверсионных электронов - технически сложный процесс, связанный с необходимостью измерения электронных спектров с высоким временным разрешением в режиме счета единичных электронов.

Описанная выше селекция продуктов ядерного распада по времени существенно затруднена, если время жизни ядерного состояния не так велико, как у ^{181}Ta . В этом случае электронная и ионная компоненты излучения плазмы и вторичные продукты их взаимодействия с мишенью и стенками камеры мешают регистрации «ядерного» сигнала. Возможное решение проблемы - возбуждение не в объеме плазмы, а на внешней мишени под воздействием ее излуче-

ния. В экспериментах по этой схеме регистрирующая аппаратура будет фиксировать лишь незначительную рассеянную часть плазменного излучения. Так как прямое воздействие лазерного излучения на исследуемый изотоп отсутствует, в процессе эксперимента он не расходуется, что также является преимуществом при работе с редкими элементами. Недостатком же данной схемы является очевидное падение плотности всех компонент излучения плазмы, достигающих внешней мишени.

Поток корпускулярного излучения плазмы ФЛИ может инициировать не только ядерные, но и экзотические атомные процессы, затрудняющие регистрацию ядерного возбуждения. Одним из них является существенно неупругая ударная ионизация, при которой налетающий ион передаст большую часть своей энергии выбиваемому электрону. Экзотичность состоит в том, что в предельном случае свободного электрона эта часть должна быть значительно меньше - порядка отношения масс электрона и иона; в имеющихся на текущий момент экспериментальных исследованиях она действительно не превышает 10^{-4} . Существенно неупругая ударная ионизация представляет интерес и для прикладной физики (например, при расчете радиационных повреждений в биологических тканях или других материалах, создании измеряющей радиацию аппаратуры, при исследовании явлений, происходящих в верхних слоях атмосферы), и для фундаментальной (проверка моделей ударной ионизации в предельных и асимптотических случаях).

Цели диссертационной работы

1. Разработать методику регистрации электронных спектров в режиме счета одиночных электронов с временным разрешением при облучении внешней мишени излучением плазмы фемтосекундного лазерного импульса умеренной интенсивности, а также определить границы ее применимости.
2. Провести регистрацию и интерпретацию электронных спектров ^{57}Fe в области 5-20 кэВ, соответствующей внутренней электронной конверсии при распаде возбужденного состояния этого изотопа с энергией 14,4 кэВ и временем жизни 98 нс.

Научная новизна

1. Зарегистрированы максимумы в электронном спектре ^{57}Fe после воздействия на него излучения плазмы фемтосекундного лазерного импульса с интенсивностью 10^{17} Вт/см². Максимумы на энергии 7,2 и 13,6 кэВ, возникающие на временах <120 нс после создания плазмы, интерпретированы как результат внутренней электронной конверсии при распаде возбужденного состояния изотопа ^{57}Fe с энергией 14,4 кэВ и временем жизни 98 нс. Максимум на энергии 5,7 кэВ, возникающий в это же время, а также в интервалах 140-190

и 530-740 нс после создания плазмы, интерпретирован как результат оже-перехода при заполнении вакансии на К-оболочке, появляющейся в первом случае из-за внутренней электронной конверсии на эту оболочку, а во втором - как результат ударной ионизации ионами плазмы. Показано, что основной вклад в максимумы в электронном спектре, соответствующие распаду ядерного состояния изотопа ^{57}Fe , обеспечивает фотопоглощение рентгеновского излучения плазмы.

2. Измерена энергетическая зависимость и оценено абсолютное значение (10^{-4} барн/эВ-стер) дифференциального сечения ионизации К-оболочки атома Fe протонами с передачей более половины энергии налетающих частиц к выбиваемым электронам при энергиях первых от 10 до 18 кэВ.
3. Показано, что наличие малоинтенсивного ($\sim 10^{11}$ Вт/см 2) короткого предимпульса, опережающего основной фемтосекундный импульс на 10 нс, обеспечивает подавление ускорения ионов водорода и кислорода из поверхностного слоя мишени и эффективное ускорение многозарядных ионов основного ее материала горячими электронами плазмы.

Практическая ценность

1. Разработана методика регистрации электронных спектров в режиме счета одиночных электронов с временным разрешением при облучении внешней мишени излучением плазмы фемтосекундного лазерного импульса умеренной интенсивности, определены границы ее применимости.
2. Зарегистрирован спектр вторичных электронов, выбитых из поверхности мишени из ^{57}Fe рентгеновским и электронным излучением плазмы фемтосекундного лазерного импульса с интенсивностью 10^{17} Вт/см 2 , с максимумами на энергиях, соответствующих конверсионным и сопутствующим оже-переходам при релаксации первого возбужденного состояния этого изотопа. Анализ спектра продемонстрировал неполноту существующих на настоящий момент моделей возбуждения низколежащих ядерных состояний и необходимость их развития.
3. Полученные результаты по существенно неупругой ударной ионизации могут быть использованы для тестирования теорий ударной ионизации при экстремальных долях энергии, передаваемой от налетающего иона к выбиваемому электрону.

Защищаемые положения

1. Испарение поверхностного слоя поглощающей мишени коротким предимпульсом, имеющим наносекундную задержку относительно мощного фемтосекундного лазерного импульса, приводит к эффективному удалению прото-

- нов из поверхностного слоя и преимущественному ускорению ионов основного материала твердотельной мишени.
2. При воздействии на твердотельную мишень излучением плазмы, создаваемой фемтосекундным лазерным импульсом с интенсивностью порядка 10^{17} Вт/см², ток вторичных электронов больших энергий определяется, в первую очередь, глубоко неупругим рассеянием ионов, а также сопутствующими оже-процессами в электронной подсистеме. При этом может происходить передача до 50% энергии от налетающей частицы к выбиваемому электрону.
 3. При облучении мишени, содержащей изотоп ^{57}Fe , излучением плазмы, создаваемой фемтосекундным лазерным импульсом с интенсивностью порядка 10^{17} Вт/см², в электронном спектре наблюдаются максимумы, соответствующие внутренней электронной конверсии при распаде первого возбужденного уровня (14,4 кэВ, 98 нс) этого изотопа, а также сопутствующим ей оже-процессам. Основным фактором, приводящим к появлению этих максимумов, является рентгеновское излучение плазмы.

Апробация работы и публикации

По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 1 статья в журнале «Квантовая электроника» [1], 1 статья в журнале «Письма в ЖЭТФ» [6], 1 статья в сборнике трудов конференции [7] и 7 тезисов докладов.

Основные результаты исследований, представленных в диссертационной работе, докладывались автором на следующих научных конференциях: XIV-ая международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, Россия, 2007), 7-ой российский симпозиум «Проблемы физики ультракоротких процессов в сильнонеравновесных средах» (Новый Афон, Абхазия, 2009), международная конференция “Light at Extreme Intensities, LEI-2009” (Брашов, Румыния, 2009), 8-ая международная студенческая конференция «International OSA Network of Students, IONS-8» (Москва, Россия, 2010), международная школа по сверхбыстрой нелинейной оптике «66th Scottish Universities Summer School in Physics, SUSSP-66» (Эдинбург, Шотландия, 2010), международная конференция «Frontiers in Optics 2010/Laser Science XXVI» (Рочестер, США, 2010). Также диссертант является соавтором докладов, представленных на научных конференциях: русско-французско-немецкий симпозиум по лазерной физике (Нижний Новгород, Россия, 2009), международная конференция по когерентной и нелинейной оптике ICONO/LAT-2010 (Казань, Россия, 2010).

Личный вклад автора

Все изложенные в диссертационной работе оригинальные результаты получены автором, либо при его непосредственном участии. Автором осуществлялись модификации экспериментальной установки, ее автоматизация, проведение экспериментов, разработка алгоритмов и обработка экспериментальных данных, а также интерпретация полученных результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Работа изложена на 115 страницах, включает 59 рисунков, 10 таблиц и список литературы (общее число ссылок 183).

II. Содержание диссертации

В *первой главе* диссертационной работы плазма, образующаяся при взаимодействии фемтосекундного лазерного импульса умеренной интенсивности (10^{16} - 10^{17} Вт/см²) с поверхностью твердотельной мишени, характеризуется как источник рентгеновского излучения, а также потоков электронов и ионов. Для этого вначале дается общая картина такого взаимодействия: описываются механизмы поглощения энергии электронной подсистемой плазмы - столкновительный и бесстолкновительные (резонансное поглощение, вакуумный нагрев и аномальный скин-эффект), обсуждаются компоненты рентгеновского излучения плазмы (тормозное, рекомбинационное и характеристическое), рассматривается ускорение ионов амбиполярным полем. Перечисляются основные механизмы ускорения электронов и ионов при релятивистских интенсивностях ($>10^{18}$ Вт/см²).

Затем дается описание экспериментальной установки (см. Рис. 1). Описывается лазерная система на Ti:Sapphire и методика диагностики ее параметров (длительности импульса, энергии, контраста, спектра, пространственного качества излучения и его диаметра на мишени). Рассматриваются принцип действия, устройство и характеристики времяпролетного спектрометра электростатического поля, а также его регистрирующего элемента - детектора ВЭУ-7, построенного на базе двух микроканальных пластин. Дается обзор программного обеспечения экспериментальной установки и объясняется схема автоматизации эксперимента (включающая как программную, так и аппаратную части). Создание данной схемы позволило нивелировать влияние медленно меняющихся в процессе эксперимента параметров лазерного излучения за счет быстрого и многократного (с последующим усреднением) измерения необходимых спектров.

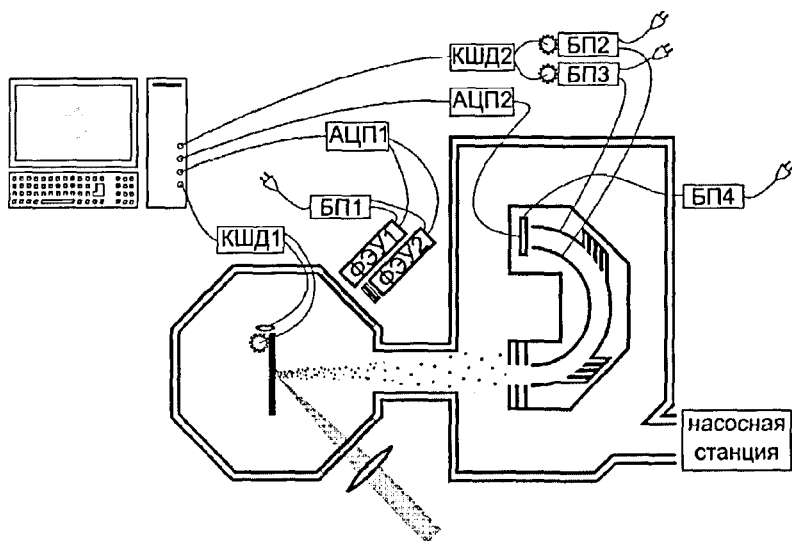


Рис. 1: Экспериментальная установка. Излучение лазерной системы фокусируется безабберационным объективом на поверхность первой мишени, установленной на двух подвижках. Рентгеновское излучение образовавшейся на поверхности плазмы диагностируется двумя ФЭУ, корпускулярное излучение попадает в спектрометр, отклоняется двумя концентрическими цилиндрическими пластинами и регистрируется детектором на базе двух МКП. Управление установкой (с помощью двух контроллеров шаговых двигателей - КШД), а также запись всех измеряемых сигналов (с помощью двух АЦП) проводится с помощью единственного компьютера.

После этого следует описание методики и результатов экспериментальной диагностики плазмы, созданной на поверхности стальной мишени сфокусированным импульсом лазерного излучения (длительность - 50 фс, энергия - 2 мДж, интенсивность $\approx 10^{17}$ Вт/см²). Методом поглотителей оценивается температура (как параметр экспоненциального распределения) рентгеновского излучения плазмы (12 ± 4 кэВ), определяется коэффициент преобразования энергии лазерного излучения в рентгеновский диапазон (10^{-7}). Далее прямым измерением спектров ускоренных в плазме электронов оценивается температура «горячего» электронного компонента излучения плазмы (10 ± 2 кэВ), а также коэффициент преобразования энергии лазерного импульса в энергию «горячих» электронов ($\approx 2\%$).

Затем прямым измерением ионных спектров определяется состав ионного излучения плазмы (см. Рис. 2), оцениваются температуры каждой ионной компоненты (см. Табл. 1). Проводится анализ обнаруженного нами неожиданного

результата - подавление ускорения примесных ионов (Н и О), адсорбированных в поверхностном слое мишени, и эффективного ускорения ионов материала мишени (Fe и С). Данный эффект объясняется характером взаимодействия лазерного импульса, содержащего предимпульс на наносекундном масштабе, с поверхностью твердой мишени. При этом предимпульс выполняет «очищающую» функцию – испаряет поверхностный слой с адсорбированными веществами, благодаря чему ионы основного материала мишени эффективно ускоряются амбиполярным полем, возникающим в плазме критической плотности под действием основного импульса.

Табл. 1: Отношение температур (как параметров экспоненциального распределения) ионов к их заряду. Материал мишени - Fe

Ион	Fe ¹⁺	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Fe ⁴⁺	Fe ⁵⁺	Fe ⁶⁺	Fe ⁷⁺	Fe ⁸⁺	C ¹⁺	C ²⁺	C ³⁺	C ⁴⁺	H ¹⁺
T/Z, кэВ	10±5	9±5	12±4	11±4	8±2	8±3	8±4	8±4	8±3	7±3	3±1	5±3	1±0,5

Все результаты диагностики излучения плазмы сопоставляются между собой, а также с приведенными в начале главы теоретическими оценками и результатами других научных групп.

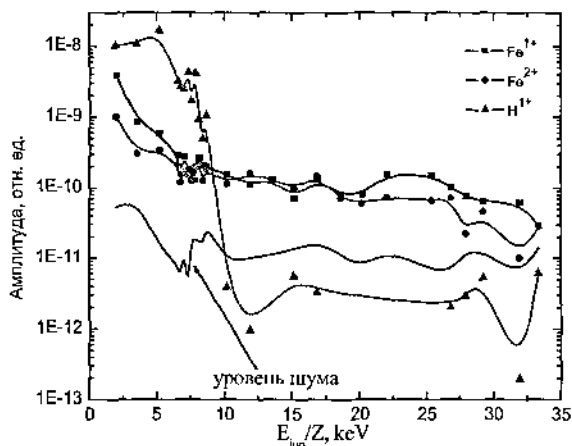


Рис. 2: Ионные спектры. Материал мишени - Fe

Во второй главе для всех стабильных изотопов, имеющих низколежащий ядерный уровень с энергией <20 кэВ, на основании известных формул рассчитывается эффективность основных механизмов возбуждения (фотовозбуждения, возбуждения через обратную внутреннюю конверсию и переходы на атомных оболочках, возбуждения неупругим электронным ударом) под воздействием излучения такой плазмы как в ее объеме, так и на внешней мишени (в го-

метрии, соответствующей нашей экспериментальной установке); рассматриваются отличия этих двух схем. Оценки выполнены в приближении плазмы как абсолютно черного тела с планковским спектром излучения и максвелловским спектром ускоряемых электронов. Затем рассматриваются каналы распада низкоэнергетических ядерных состояний (фоторелаксация и внутренняя конверсия). Для тех же изотопов производится (с помощью готового программного пакета, реализующего методику Дирака-Фока расчета волновой функции электронов, находящихся в самосогласованном поле атома) расчет спектров продуктов распада по превалирующему каналу - внутренней конверсии (конверсионных электронов). Приводятся энергетические спектры возможных оже-электронов, испущенных в результате различных оже-переходов на атомных оболочках (для изотопа ^{57}Fe см. Рис. 3 (а)).

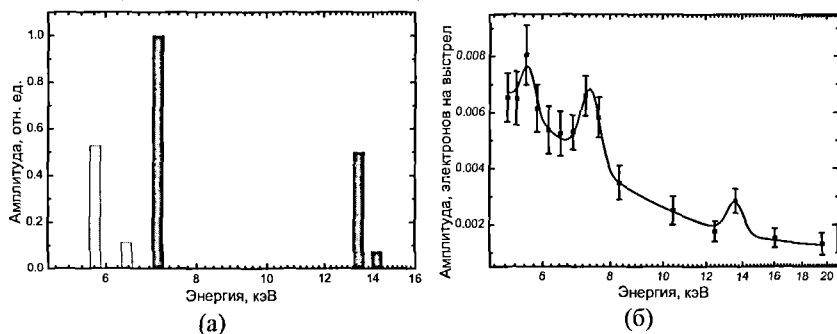


Рис. 3: (а) Теоретически рассчитанные спектры конверсионных (темные столбцы) и оже- (светлые столбцы) электронов изотопа ^{57}Fe ; (б) экспериментально измеренный спектр вторичных электронов изотопа ^{57}Fe в интервале времени 80-120 нс после создания плазмы, статистика - от 4000 до 6500 реализаций на точку по энергии

В главе также приводится исторический обзор экспериментов по возбуждению низкоэнергетических ядерных состояний в плазме лазерного импульса. По итогам расчетов, приведенных в главе, выбирается наиболее перспективный (с точки зрения эффективности возбуждения и легкости регистрации распада) изотоп (^{57}Fe , энергия первого возбужденного уровня - 14,4 кэВ, время жизни - 98 нс). С учетом измеренных характеристик излучения плазмы, а также геометрии экспериментальной установки, оценка на эффективность фотовозбуждения на внешней мишени для этого изотопа составила 0,2 ядра на лазерный выстрел.

В третьей главе приводится оригинальная методика регистрации электронных спектров в режиме счета одиночных электронов с временным разрешением при облучении внешней мишени излучением плазмы лазерного импульса умеренной интенсивности, а также определяются границы ее примени-

мости. Для этого описывается экспериментальная установка, отличающаяся от использованной ранее присутствием второй мишени, на которую воздействовало излучение плазмы. Мишень представляла собой кремниевую подложку с напыленным слоем изотопа ^{57}Fe (толщина напыления - 20 нм, содержание в напыленном слое $^{57}\text{Fe} \approx 98\%$). Объясняется алгоритм обработки и анализа экспериментальных данных, включающий фильтрацию снятых с детектора спектрометра сигналов, применяемую для устранения наводок и уменьшения искажающего влияния перескобания регистрирующей схемы, вызванного приходом на детектор мощного переотраженного электронного излучения плазмы. Затем исследуется статистика экспериментальных данных, что делает возможным построение достоверных интервалов в результирующих спектрах. Далее приводятся результаты эксперимента по регистрации распада низколежащего состояния с энергией 14,4 кэВ и временем жизни 98 пс изотопа ^{57}Fe , проведенного по предложенной методике. В зарегистрированных спектрах вторичных электронов выделяются три компонента (см. Рис. 3 (б)).

Первый, резонансный, объясняется существенно неупругой ударной ионизацией атомов второй мишени падающими ионами из плазмы. Он присутствует во временных диапазонах 140-190 и 530-740 пс после создания плазмы, соответствующих прилету на вторую мишень основного количества ионов H^+ и C^+ , O^+ , Fe^{2+} соответственно. Вторым, резонансным, объясняется конверсионным расходом возбужденного ядерного состояния и наблюдается на временах < 120 пс после создания плазмы, когда ионы еще не попадают на вторую мишень. Третий, также резонансный, является следствием оже-процессов, заполняющих вакансии на К-оболочках атомов Fe, созданных в результате ударной ионизации, либо конверсии (потому он наблюдается в указанных выше временных интервалах). Приводится подробное обоснование того, что второй компонент не может быть объяснен никакими атомными процессами и потому должен быть приписан распаду возбужденного ядерного состояния (сравн. Рис. 3 (а) и (б)). Основным аргумент состоит в том, что чисто атомные процессы (переходы между атомными оболочками) не могут быть причиной появления вторичных электронов с дискретной энергией, превышающей 7,1 кэВ - энергию связи самой глубокой оболочки для атома Fe. Мы же наблюдаем максимумы в электронных спектрах на энергиях 7,2 и 13,6 кэВ. Оценка числа возбужденных на второй мишени ядер ^{57}Fe , учитывающая геометрию экспериментальной установки и временной период регистрации, дает $1 \pm 0,5$, что согласуется со сделанной в Главе II оценкой (0,2).

Для выявления основного источника возбуждения ядер приводится результат дополнительного эксперимента, в котором для предотвращения возбуждения электронами перед второй мишенью была установлена лавсановая

пленка толщиной 20 мкм. Пленка задерживала электроны и ионы, летящие из плазмы с поверхности первой мишени, и пропускала только кванты жесткого рентгеновского излучения (для обоснования этого приводятся расчеты характерных тормозных путей). Конверсионные линии на электронных спектрах остались (см. Рис. 4), количество возбужденных ядер оценено в $0,9 \pm 0,3$. Делается вывод, что в проводимых экспериментах фотопоглощение является основным механизмом возбуждения изотопа ^{57}Fe , в то время как роль неупругого электронного рассеяния неочевидна.

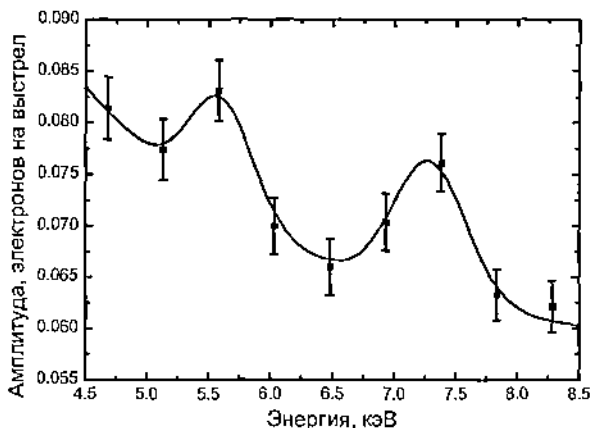


Рис. 4: Спектр вторичных электронов в интервале времени 30-120 нс после создания плазмы, статистика - от 4000 до 5000 реализаций на точку по энергии. Между мишенями помещена пленка из лавсана

Использование дополнительной внешней мишени в рассматриваемой в настоящей диссертационной работе методике регистрации электронных спектров с временным разрешением является ключевой идеей, так как это позволяет значительно подавить поток частиц из плазмы, выделив на его фоне слабый сигнал от вторичных процессов, происходящих на дополнительной мишени. В свете регистрации распада возбужденных низкоэнергетических ядерных состояний такая схема эксперимента имеет как плюсы, так и минусы по сравнению с прямой регистрацией частиц из плазмы. Баланс между ними на основе полученных экспериментальных результатов работы по общим схемам подведен в конце главы. Показано, что в задаче о регистрации распада 14,4 кэВ состояния изотопа ^{57}Fe со временем жизни 98 нс, возбужденного рентгеновским излучением плазмы, схема регистрации вторичных электронов с использованием дополнительной мишени в ≈ 4 раза эффективнее, чем прямая регистрация частиц из плазмы (где эффективность понимается как произведение отношения коли-

чества зарегистрированных конверсионных электронов к числу распадов на геометрический фактор уменьшения потока излучения плазмы).

В *результатах и выводах* приводятся основные результаты диссертационной работы, а также делаются выводы по ним.

III. Результаты и выводы

Плазма, образующаяся при взаимодействии фемтосекундного лазерного импульса умеренной интенсивности (энергия - 1,5 мДж, длительность - 55 фс, диаметр пятна фокусировки 3,5 мкм, интенсивность $\approx 10^{17}$ Вт/см²) с поверхностью твердотельной мишени из Fe, была охарактеризована как источник рентгеновского излучения, а также потоков электронов и ионов. Температура рентгеновского излучения была измерена с помощью метода поглотителей и составила 12 ± 4 кэВ, что согласуется с теоретической оценкой в 14 кэВ. Конверсия лазерной энергии в энергию рентгеновского излучения составила 10^{-7} . Температура «горячего» электронного компонента прямыми измерениями спектра была оценена в 10 ± 2 кэВ, что согласуется с теоретической оценкой в 14 кэВ (механизм ускорения - резонансное поглощение), а также с температурой рентгеновского излучения. Доля «горячих» электронов от их общего числа составила $\approx 4\%$, конверсия энергии лазерного излучения в энергию зарегистрированных электронов оказалась $\approx 2\%$.

Исследование ионных потоков из плазмы показало наличие в них как ионов материала мишени (Fe^{1+} - Fe^{8+} , C^{1+} - C^{4+}), так и примесных ионов (O^{1+} , H^+), адсорбированных на поверхности мишени из воздуха и паров масла, с энергиями вплоть до нескольких десятков кэВ. Доля ионов мишени с энергией выше 2 кэВ составила $>50\%$, для энергий выше 10 кэВ - практически 100%. Наблюдаемый эффект очистки мишени связан с наличием короткого предимпульса, опережавшего основной лазерный импульс на 10 пс (контраст по интенсивности $\approx 10^6$), который приводил к испарению поверхностного слоя с примесными ионами. В результате этого ионы мишени эффективно ускорялись амбиполярным полем до средней энергии на заряд, составившей 10 ± 2 кэВ, что совпадает со средней энергией «горячего» электронного компонента. Примесные ионы ускорялись малым количеством «горячих» электронов вне пределов максимума амбиполярного поля, средняя энергия их составила ≈ 1 кэВ. Также были зарегистрированы отрицательные ионы O^{1-} с энергиями до 12 кэВ со средней энергией 2 ± 1 кэВ, образующиеся при перезарядке положительно заряженных ионов и нейтралов плазмы в процессе их пролета до детектора на молекулах остаточного газа.

На примере стабильных изотопов, имеющих ядерное состояние с энергией менее 20 кэВ (^{57}Fe , ^{73}Ge , ^{83}Kr , ^{169}Tm , ^{181}Ta , ^{187}Os , ^{201}Hg), были исследованы

особенности возбуждения и регистрации произошедшего распада низкоэнергетических ядерных уровней как в объеме плазмы лазерного импульса с интенсивностью 10^{17} Вт/см², так и с помощью ее излучения на внешней мишени (в приближении плазмы как абсолютно черного тела). Для случая возбуждения в объеме плазмы были оценены эффективности основных механизмов возбуждения (фотовозбуждение, обратная внутренняя электронная конверсия и неупругий электронный удар). Количество возбужденных ядер по этим оценкам составило вплоть до $1,5 \cdot 10^3$ на выстрел (^{187}Os , фотовозбуждение). Эффективности этих же механизмов были также оценены для случая возбуждения на внешней мишени (в геометрии, соответствующей нашей экспериментальной установке). Количество возбужденных ядер по этим оценкам составило вплоть до 0,2 на выстрел (^{187}Os , фотовозбуждение). Выявлены основные факторы, обуславливающие специфику возбуждения на внешней мишени - падение плотности всех компонент излучения плазмы и их разнесение по времени, приводящие, в частности, к полному подавлению ОВЭК на внешней мишени. Теоретически обосновано отсутствие влияния неоднородных уширений (в частности, из-за эффекта Доплера) ядерного перехода на эффективность фотовозбуждения. Для исследуемых изотопов рассчитаны спектры конверсионных и оже-электронов. Показано, что для легких изотопов (^{57}Fe , ^{73}Ge , ^{83}Kr) и ^{181}Ta существуют конверсионные линии, регистрация которых будет говорить о произошедшем распаде ядерного уровня. Для тяжелых изотопов (^{169}Tm , ^{187}Os , ^{201}Hg) все конверсионные линии перекрываются с оже-линиями, поэтому для регистрации ядерного распада предложено использовать селекцию по времени образования электронов.

Была развита методика, включающая систему автоматизации эксперимента и алгоритмы обработки экспериментальных данных, обеспечивающая регистрацию электронных спектров в режиме счета одиночных электронов с временным разрешением при облучении внешней мишени излучением плазмы лазерного импульса умеренной интенсивности в диапазонах 1-40 кэВ по энергии и 50 - 15000 нс после создания плазмы по времени. С помощью этой методики исследовались спектры вторичных электронов, выбитых из второй мишени (^{57}Fe) излучением плазмы фемтосекундного лазерного импульса с интенсивностью $\approx 10^{17}$ Вт/см², сформированной на поверхности первой. В зарегистрированных спектрах наблюдалось три компонента.

Первый, нерезонансный, связан с существенной (почти полной) передачей энергии от падающего иона к выбиваемому электрону. Он наиболее выражен во временных интервалах 140-190 и 530-740 нс после создания плазмы, соответствующих прилету на вторую мишень основного количества ионов H^+ и C^+ , O^+ , Fe^{2+} соответственно. Дважды дифференцированное сечение такого процесса оценено в 10^{-4} барн/эВ-стер. Проведено сопоставление с единственной

существующей моделью ударной ионизации (моделью Рудда), не ограниченной в применении для столь высокой доли передаваемой энергии. Сопоставление показало количественное расхождение эксперимента с теорией, однако дало качественную картину происходящего - высокая доля передаваемой энергии связана с увеличением эффективной массы выбиваемого электрона, обусловленного сильной связью с ядром. Полученные результаты могут быть использованы для тестирования теорий ударной ионизации при экстремальных долях энергии, передаваемой от налетающего иона к выбиваемому электрону.

Второй, резонансный, компонент (максимумы с энергиями 7,2 и 13,6 кэВ) является следствием конверсионного распада 14,4 кэВ уровня изотопа ^{57}Fe и наблюдается на временах <120 нс после создания плазмы. Он исчезал при замене мишени с ^{57}Fe на ^{56}Fe , у которого отсутствует низколежащий ядерный уровень. Отношение амплитуд максимумов составило $2,4 \pm 0,9$, что совпадает с теоретически рассчитанным (≈ 2). Количество возбужденных ядер на второй мишени оценено в $1 \pm 0,5$. Для выяснения механизма возбуждения между мишенями была помещена пленка лавсана, поглощавшая корпускулярное и пропускавшая рентгеновское излучение плазмы. Сигнал от конверсионных электронов остался, количество возбужденных ядер на второй мишени было оценено как $0,9 \pm 0,3$. Таким образом, основным механизмом возбуждения ядер можно считать фотопоглощение, однако роль неупругого электронного рассеяния требует дальнейших исследований.

Третий, также резонансный, компонент связан с оже-переходом, возникающим при заполнении К-оболочки, когда вакансия на ней образуется либо за счет ударной ионизации ионами (максимум на энергии 5,7 кэВ наблюдался на временах 140-190 и 530-740 нс после создания плазмы, соответствующих прилету на вторую мишень ионов H^+ , C^+ , O^+ , Fe^{2+}), либо за счет конверсии (такой же максимум наблюдался на временах 90-120 нс, до прилета на вторую мишень даже быстрых протонов). Зарегистрированные в последнем временном интервале оже-переходы являлись еще одним подтверждением произошедшего конверсионного распада ядерного состояния.

Полученное в экспериментах количество возбужденных ядер по порядку совпадает с выполненными в приближении плазмы как абсолютно черного тела теоретическими оценками по механизму фотопоглощения (0,2 ядра на лазерный выстрел). Однако попытка расчета эффективности фотопоглощения, основанная на экспериментальных оценках светимости плазмы, приводит к значительному (на несколько порядков) расхождению теории с экспериментом, причем теория дает заниженное значение. Это говорит о неполноте существующих на настоящий момент моделей возбуждения низколежащих ядерных состояний и необходимости их развития.

Таким образом, по диссертационной работе можно сделать следующие выводы.

1. Была разработана методика регистрации электронных спектров в режиме счета одиночных электронов с временным разрешением при облучении внешней мишени излучением плазмы фемтосекундного лазерного импульса умеренной интенсивности, а также определены границы ее применимости.
2. С помощью разработанной методики зарегистрированы максимумы в электронном спектре ^{57}Fe после воздействия на него излучения плазмы фемтосекундного лазерного импульса с интенсивностью 10^{17} Вт/см². Максимумы на энергии 7,2 и 13,6 кэВ, возникающие на временах <120 пс после создания плазмы, интерпретированы как результат внутренней электронной конверсии при распаде возбужденного состояния изотопа ^{57}Fe с энергией 14,4 кэВ и временем жизни 98 пс. Максимум на энергии 5,7 кэВ, возникающий в это же время, а также в интервалах 140-190 и 530-740 пс после создания плазмы, интерпретирован как результат оже-перехода при заплывании вакансии на К-оболочке, появляющейся в первом случае из-за внутренней электронной конверсии на эту оболочку, а во втором - как результат ударной ионизации ионами плазмы.
3. Показано, что основной вклад в максимумы в электронном спектре, соответствующие распаду ядерного состояния изотопа ^{57}Fe , обеспечивает фотопоглощение рентгеновского излучения плазмы.
4. Измерена энергетическая зависимость и оценено абсолютное значение (10^{-4} бари/эВ-стер) дифференциального сечения ионизации К-оболочки атома Fe протонами с передачей более половины энергии налетающих частиц к выбиваемым электронам при энергиях первых от 10 до 18 кэВ. Полученные результаты по существенно неупругой ударной ионизации могут быть использованы для тестирования теорий ударной ионизации при экстремальных долях энергии, передаваемой от налетающего иона к выбиваемому электрону.
5. Показано, что наличие малоинтенсивного ($\approx 10^{11}$ Вт/см²) короткого предимпульса, опережающего основной фемтосекундный импульс на 10 пс, обеспечивает подавление ускорения ионов водорода и кислорода из поверхностного слоя мишени и эффективное ускорение многозарядных ионов основного ее материала горячими электронами плазмы.

IV. Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Головин Г.В., Савельев А. Б., Урюпина Д. С., Волков Р. В. Внутренняя электронная конверсия изомерного состояния с энергией 14.4 кэВ ядра ^{57}Fe ,

- возбуждаемого излучением плазмы мощного фемтосекундного лазерного импульса // Квантовая электроника. 2011. Т. 41. № 3. С. 222.
2. Golovin G., Uryupina D., Volkov R., and Savel'ev A. Secondary Processes Induced by Femtosecond Laser Plasma X-Ray and Corpuscular Emission in External Target. // FIO'10 Book of abstracts, October 24-28, 2010, Rochester, NY, USA, JTUA18
 3. Golovin G., Shulyapov S. Decay of 14.4 keV ^{57}Fe nuclear state excited with help of plasma created by the femtosecond laser pulse. // Technical Digest on CD-ROM of the International Conference on Coherent and Nonlinear Optics "ICONO/LAT-2010", August 23 – 26, 2010, Kazan, Russia, YSTuE18
 4. Golovin G., Uryupina D., Volkov R., and Savel'ev A. Registration of 14.4 keV ^{57}Fe nuclear state excitation induced with the help of plasma created by the powerful femtosecond laser pulse. // SUSSP-66 Book of Abstracts, August 11-21, 2010, Edinburgh, UK, p.16
 5. Golovin G., Uryupina D., Volkov R., and Savel'ev A. Nuclear excitation induced by Femtosecond Laser Plasma X-Ray and Corpuscular Emission in External Target. // IONS'8 Book of abstracts, 21-25 June, 2010, Moscow, Russia, p.40
 6. Головин Г.В., Савельев А. Б., Урюпина Д. С., Волков Р. В., Марьин Б.В. Наблюдение высокоэнергетичных электронов при облучении поверхности металлической мишени протонами со средней энергией 25 кэВ // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 89. № 10. С. 584-588.
 7. Golovin G., Uryupina D., Volkov R., and Savel'ev A. Registration of 14.4 keV ^{57}Fe conversional decay after nuclei excitation induced with the help of plasma created by the powerful femtosecond laser pulse // Light at Extreme Intensities, Opportunities and Technological Issues of the Extreme Light Infrastructure: LEI 2009 / под ред. D. Dumitras. Brasov (Romania): AIP, 2010. С. 86-91.
 8. Головин Г. В., Савельев А. Б., Урюпина Д. С., Волков Р. В. Регистрация электронов с энергией до 15 кэВ при облучении поверхности мишени ионами с энергией менее 100 кэВ, ускоряемых в лазерной плазме: ионизация глубоких оболочек и возбуждение ядерных уровней. // Тезисы докладов 7-го российского симпозиума «Проблемы физики ультракоротких процессов в сильнонеравновесных средах», 23 июля – 1 августа, 2009, Новый Афон, Абхазия, с. 22.
 9. Головин Г. В., Савельев А. Б., Михеев П. М., Урюпина Д. С. Регистрация конверсионного распада ядер ^{57}Fe , возбужденных излучением плазмы мощного фемтосекундного лазерного импульса. // Тезисы докладов IV-ой международной конференции «ОПТИКА-2007», 15 – 19 октября, 2007, Санкт-Петербург, Россия, с. 20.
 10. Головин Г. В. Регистрация конверсионного распада ядер железа, возбужденных излучением плазмы мощного фемтосекундного лазерного импульса. // Тезисы докладов XIV-ой международной конференции «Ломоносов», 11-14 апреля, 2007, Москва, Россия, с. 26.

Подписано в печать 11.04.2011 г.
Печать лазерная (цифровая)
Тираж 100 экз.

Ттиография Legis-Print
115230, Москва, Варшавское шоссе, д. 42
Тел.: 8 (495) 785-00-38, 8 (926) 850-53-16
www.autorefae-print.ru